

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Introducción: Secciones I-IV



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Secciones I-IV

Índice

Sección I	Introducción	11
I.A	Objetivo	13
I.B	Estructura del documento y forma de utilizar las directrices y la orientación	14
I.C	Sustancias químicas que figuran en el Anexo C: Definición, riesgos, toxicidad	15
1.	¿Cuáles son las sustancias que figuran en el Anexo C?	15
1.1	Definición	15
1.2	Características	15
1.3	Usos	15
2.	¿Cuáles son los riesgos que implican para los seres humanos las sustancias del Anexo C?	16
2.1	Exposición	16
2.2	PCDD y PCDF	16
2.3	PCB	17
2.4	HCB	17
3.	¿Cómo se mide la toxicidad de las sustancias del Anexo C?	17
3.1	Equivalencia de toxicidad	17
3.2	Ingestas tolerables	18
	Referencias	20
I.D	Artículo 5 y Anexo C del Convenio de Estocolmo	21
I.E	Relación con el Convenio de Basilea	28
I.F	Relación con otras preocupaciones ambientales	29

Sección II	Consideración de alternativas en la aplicación de mejores técnicas disponibles	31
II.A	Consideración de alternativas en el Convenio de Estocolmo	33
II.B	El Convenio de Estocolmo y las nuevas fuentes	33
II.C	Una forma de considerar alternativas	34
1.	Examinar la propuesta de nueva instalación en el contexto del desarrollo sostenible	34
2.	Identificar alternativas posibles y accesibles	34
3.	Realizar una evaluación comparativa entre las alternativas propuestas e identificadas, y las posibles y accesibles	35
4.	Determinar la prioridad	35
II.D	Otras consideraciones del Convenio de Estocolmo	36
1.	Aspectos de salud, seguridad y medio ambiente	36
2.	Consideraciones sociales y económicas	36
3.	Consideraciones del Anexo C	37
Sección III	Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales: Orientación, principios y consideraciones transectoriales	39
III.A	Orientación	41
III.B	Principios y planteamientos generales	43
III.C	Consideraciones transectoriales	45
	(i) Sustancias químicas que figuran en el Anexo C: Mecanismos de formación	45
	(ii) Consideraciones sobre la gestión de desechos	47
	(iii) Co-beneficios de la aplicación de mejores técnicas disponibles a las sustancias del Anexo C	60
	(iv) Gestión de gases de combustión y otros residuos	62
	(v) Capacitación de los responsables de la toma de decisiones y el personal técnico	79
	(vi) Pruebas de laboratorio, monitoreo y registro	80

Sección IV	Resúmenes de las categorías de fuentes que figuran en las secciones V y VI	89
Preámbulo		91
Resúmenes de la sección V: categorías de fuentes incluidas en la parte II del Anexo C		91
A.	Incineradoras de desechos	91
	(i) Desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado	91
	(ii) Desechos médicos	92
B.	Hornos de cemento que queman desechos peligrosos	93
C.	Producción de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que producen cloro elemental	94
D.	Procesos térmicos de la industria metalúrgica	95
	(i) Producción secundaria de cobre	95
	(ii) Plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero	95
	(iii) Producción secundaria de aluminio	96
	(iv) Producción secundaria de zinc	97
Resúmenes de la sección VI: categorías de fuentes incluidas en la parte III del Anexo C		97
A.	Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos	97
B.	Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en la Parte II del Anexo C	98
	(i) Producción secundaria de plomo	98
	(ii) Producción primaria de aluminio	98
	(iii) Producción de magnesio	99
	(iv) Producción secundaria de acero	99
	(v) Fundición primaria de metales comunes	100
C.	Fuentes de combustión domésticas	101
D.	Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales	102
E.	Instalaciones de combustión de madera u otros combustibles de biomasa	102
F.	Procesos de producción de productos químicos determinados que liberan sustancias químicas que figuran en el Anexo C	103

G.	Crematorios	104
H.	Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible.....	104
I.	Destrucción de carcasas de animales	105
J.	Teñido (con cloranil) y terminado (con extracción alcalina) de textiles y cueros.....	105
K.	Plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso.....	106
L.	Recuperación del cobre de cables por combustión lenta.....	107
M.	Refinerías de aceites de desecho	107

Tablas

Sección I

Tabla 1.	Factores de equivalencia de toxicidad	19
----------	---	----

Sección III

Tabla 1.	Comparación de los sistemas de control de PCDD/PCDF.....	64
Tabla 2.	Características de los materiales de los filtros de tela	68
Tabla 3.	Comparación de sistemas de eliminación de polvo	69
Tabla 4.	Métodos de muestreo y análisis de PCDD/PCDF y PCB en gases de chimenea	81
Tabla 5.	Conversiones de condiciones de referencia.....	83
Tabla 6.	Métodos de bioensayo para mediciones de residuos y gases de escape en pequeñas incineradoras de desechos	84

Anexos

Sección III

Anexo 1.	Tratamiento de desechos en cuarentena.....	58
Anexo 2.	Un ejemplo de gestión de desechos médicos.....	59

Cuadros

Sección I

Cuadro 1.	Artículo 5 del Convenio de Estocolmo	21
Cuadro 2.	Anexo C del Convenio de Estocolmo	23

Ilustraciones

Sección III

Figura 1.	Jerarquía de la gestión de desechos.....	49
Figura 2.	Principio del precipitador electrostático.....	66
Figura 3.	Precipitador electrostático por condensación	67
Figura 4.	Esquema de un filtro de tela.....	67
Figura 5.	Adsorción/depuración con secado por atomización	70
Figura 6.	Reactor de reducción catalítica selectiva de alta temperatura para eliminar simultáneamente NO _x y PCDD/PCDF	74

Sección I

Introducción

En virtud del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, las Partes, en algunos casos, promoverán, y en otros, requerirán el empleo de mejores técnicas disponibles, y promoverán la aplicación de mejores prácticas ambientales. En resumen, cada Parte:

- Elaborará, en un plazo de dos años a partir de la entrada en vigor del Convenio para dicha Parte, un plan de acción (nacional o regional) para identificar, caracterizar y combatir las liberaciones de las sustancias incluidas en el Anexo C; dicho plan deberá comprender inventarios de fuentes y tener en cuenta las categorías de fuentes que figuran en las partes II y III del Anexo C (inciso a) del artículo 5).
- En el caso de **nuevas fuentes**:

Promoverá y, de conformidad con el calendario de aplicación de su plan de acción, requerirá el empleo de las mejores técnicas disponibles dentro de las categorías de fuentes identificadas y con arreglo a tal acción, centrándose especialmente en un principio en las categorías de fuentes incluidas en la parte II del Anexo C; el requisito de utilización de las mejores técnicas disponibles con respecto a las categorías de fuentes incluidas en la parte II se adoptará gradualmente lo antes posible y a más tardar cuatro años después de la entrada en vigor del Convenio para esa Parte (inciso d) del artículo 5).

En el caso de las categorías antes identificadas, promoverá la utilización de las mejores prácticas ambientales (inciso d) del artículo 5).

Promoverá, de conformidad con su plan de acción, el empleo de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales dentro de las categorías de fuentes como las que figuran en la parte III del Anexo C y a las que una Parte no se haya referido en el marco de lo anterior (inciso e) ii) del artículo 5).

- En el caso de **fuentes existentes**:

Promoverá, de conformidad con su plan de acción, el empleo de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para las categorías de fuentes incluidas en la parte II del Anexo C y para las categorías de fuentes como las que figuran en la parte III del mismo anexo (inciso e) i) del artículo 5).

Al emplear mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para las categorías de fuentes antes mencionadas, las Partes tendrán en cuenta la orientación general sobre medidas de prevención y reducción de liberaciones que figuran en el Anexo C, y las directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales que se adopten por decisión de la Conferencia de las Partes (ver incisos d) y e) del artículo 5).

En su primera reunión, celebrada en Punta del Este, Uruguay, del 2 al 6 de mayo de 2005, la Conferencia de las Partes del Convenio de Estocolmo estableció, por su decisión SC-1/19, un Grupo de expertos sobre las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales cuyo mandato es concluir el trabajo futuro de mejorar y reforzar, cuando sea necesario, “el proyecto de directrices generales sobre mejores técnicas disponibles y la orientación general sobre mejores prácticas ambientales a las que se hace referencia en el artículo 5 y el Anexo C del Convenio”¹, y que figuran en el documento UNEP/POPS/COP.1/INF/7.

En su tercera reunión, celebrada en Dakar, Senegal, del 30 de abril al 4 de mayo de 2007, la Conferencia de las Partes en el Convenio de Estocolmo, por su decisión SC-3/5, adoptó el presente proyecto revisado de directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales, e invitó a las Partes y otras entidades a transmitir a la secretaría sus observaciones sobre la experiencia en la aplicación del proyecto revisado de directrices.

De conformidad con los incisos d) y e) del artículo 5 del Convenio, al aplicar las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales se tomarán en cuenta las directrices y la orientación general, una vez adoptadas por la Conferencia de las Partes. También podrán utilizarse para asistir en la toma de decisiones nacionales sobre aplicación de planes de acción y otras medidas relacionadas con las obligaciones estipuladas en el artículo 5 y el Anexo C.

I.B Estructura del documento y forma de utilizar las directrices y la orientación

La **sección I** de las presentes directrices constituye la introducción y presenta el objetivo y estructura del mismo, una breve descripción de las características y riesgos de las sustancias químicas incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, las disposiciones del Convenio de Estocolmo relacionadas directamente con el tema, artículo 5 y Anexo C, un resumen de las medidas necesarias en virtud de tales disposiciones, así como una explicación de la relación entre estas disposiciones y el Convenio de Basilea sobre el control de movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación.

La **sección II** proporciona orientación para la consideración de alternativas y comporta una lista de verificación que puede utilizarse al aplicar mejores técnicas disponibles a nuevas fuentes. Contiene también información sobre otras consideraciones del Convenio de Estocolmo.

La **sección III** contiene una orientación general, principios aplicables y descripciones de consideraciones comunes a diversas categorías de fuentes.

La **sección IV** contiene la serie de resúmenes de todas las categorías de fuentes que figuran en las secciones V y VI.

Las **secciones V y VI** presentan directrices específicas para cada una de las categorías de fuentes que figuran en las partes II y III del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Para cada una de estas directrices, se proporciona la siguiente información:

- Descripción de los procesos
- Fuentes de las sustancias incluidas en el Anexo C
- Medidas primarias y secundarias
- Niveles de desempeño
- Informe de desempeño
- Estudios de caso

Para cada una de las directrices se proporcionan referencias e información bibliográfica.

I.C Sustancias químicas que figuran en el Anexo C: Definición, riesgos, toxicidad

1. ¿Cuáles son las sustancias que figuran en el Anexo C?

1.1 Definición

Las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo son: dibenzoparadióxinas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB).

1.2 Características

Además de que está documentada su toxicidad, las sustancias incluidas en el Anexo C se bioacumulan y se transportan a grandes distancias. Las sustancias persistentes no se degradan con facilidad en el medio ambiente. Los productos bioacumulables suelen ser solubles en grasas y se acumulan en los niveles tróficos superiores, en particular en los seres humanos. Por ser compuestos semivolátiles, las sustancias del Anexo C experimentan evaporaciones y condensaciones en el medio ambiente, lo que las hace móviles.

1.3 Usos

Las PCDD y los PCDF nunca se han utilizado como productos comerciales ni han sido fabricados de manera intencional sino para ser usados en laboratorios.

Por su resistencia a la combustión y características aislantes, los PCB se han utilizado como refrigerantes y lubricantes en transformadores, condensadores y otros equipos eléctricos. Entre los productos que pueden contener PCB se encuentran los antiguos aparatos de iluminación incandescentes y los artefactos eléctricos que tienen condensadores de PCB.

El HCB ha tenido un uso generalizado como plaguicida, para proteger de hongos las semillas de cebolla, sorgo, trigo y otros granos. También se ha utilizado para fabricar fuegos artificiales, municiones y caucho sintético. Se utiliza asimismo como solvente en la producción de plaguicidas.

Sin embargo, las directrices y orientación general que se presentan a continuación no se aplican a la producción comercial de PCB y HCB, sino a los procesos que ocasionan su formación y liberación accidentales.

2. ¿Cuáles son los riesgos que implican para los seres humanos las sustancias del Anexo C?

2.1 Exposición

Puesto que las sustancias del Anexo C están presentes en el medio ambiente, prácticamente todos los seres vivos, incluidos los seres humanos, han estado expuestos a ellos. La exposición se da principalmente por los alimentos grasos, incluso la leche materna, pero también por circunstancias accidentales o laborales. Los efectos en la salud que se han asociado a estas exposiciones dependen de diversos factores, en particular del grado, duración y frecuencia de la exposición.

2.2 PCDD y PCDF

Gran parte de la información sobre la toxicidad de estas sustancias se basa en importantes estudios del miembro más tóxico de la familia, la 2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina (TCDD), realizados en animales de laboratorio. La TCDD y sus compuestos asociados pueden provocar una gran variedad de efectos en animales y muchos de estos efectos también en seres humanos.

Basándose principalmente en estudios sobre casos de exposición accidental u ocupacional grave, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) determinó que la 2,3,7,8-TCDD es la más tóxica de todos los compuestos de dioxinas, y que es carcinógeno en seres humanos. Los estudios en animales también han demostrado un riesgo mayor de cáncer asociado a la exposición prolongada a PCDD/PCDF.

La exposición a la TCDD ocasiona muy diversos efectos en la reproducción y el desarrollo de algunas especies de animales de laboratorio, por ejemplo viabilidad disminuida, alteraciones estructurales, retraso en el crecimiento y alteraciones funcionales. También hay evidencias de efectos neuroconductuales y efectos sobre el sistema inmune y diversas funciones endocrinas, como las de la tiroides. Ante tales evidencias de efectos en animales, sobre todo con dosis elevadas pero, a veces, con dosis cercanas a las pertinentes para seres humanos, a los científicos les preocupa que se puedan producir los mismos efectos en seres humanos, especialmente niños en desarrollo, por exposición prenatal.

2.3 PCB

Los efectos más frecuentes en la salud de personas que han estado expuestas a grandes cantidades de PCB se reflejan en enfermedades de la piel. Los estudios realizados a trabajadores expuestos arrojan alteraciones en sangre y orina, que pueden ser indicios de trastornos hepáticos. En los incidentes *yusho* y *yucheng*, cerca de dos mil personas, respectivamente, de Japón y Taiwán, estuvieron expuestas a altas concentraciones de PCB y PCDF por consumo de aceite de arroz contaminado. En ambas cohortes se presentó enfermedad hepática fatal (entre otros indicadores) con una frecuencia dos o tres veces mayor que la de los índices nacionales (IARC). Las exposiciones a PCB en la población general no producen efectos dermatológicos o hepáticos. La mayoría de los estudios relativos a los efectos de PCB en la salud de la población general se realizaron en niños cuyas madres habían estado expuestas.

El IARC ha determinado que los PCB son probablemente carcinógenos para seres humanos. En algunos estudios en trabajadores se indica una relación entre los PCB y ciertos tipos de cáncer en humanos, por ejemplo cáncer de hígado y vías biliares. Las ratas que consumieron alimentos con niveles elevados de PCB durante dos años desarrollaron cáncer de hígado.

Los PCB pueden estar asociados a efectos en el desarrollo o endocrinos. Los neonatos de madres que estuvieron expuestas a niveles relativamente altos de PCB en el lugar de trabajo o que consumieron grandes cantidades de pescado contaminado con PCB presentaron un peso ligeramente inferior a los de madres no expuestas. En los neonatos de madres que consumieron pescado contaminado con PCB se observaron además respuestas anormales en pruebas de conducta infantil. Algunas de estas conductas, como problemas de habilidades motoras y disminución de la memoria a corto plazo, duraron varios años.

2.4 HCB

El Departamento de salud y servicios humanos de Estados Unidos (*United States Department of Health and Human Services*) ha determinado que existen razones para suponer que el HCB es carcinógeno. Los estudios en animales muestran que la ingesta a largo plazo de grandes cantidades de HCB puede perjudicar el hígado, tiroides, sistema nervioso, huesos, riñones, sangre y los sistemas inmune y endocrino.

3. ¿Cómo se mide la toxicidad de las sustancias del Anexo C?

3.1 Equivalencia de toxicidad

En el caso de PCDD/PCDF, los compuestos más tóxicos tienen cloros en las posiciones 2, 3, 7 y 8. En el caso de PCB, la toxicidad más alta se observa en compuestos en los que la molécula puede adoptar una conformación planar, análoga a la de los PCDD/PCDF. La toxicidad de mezclas de estos materiales se evalúa en una misma cifra única llamada equivalente tóxico (EQT).

Para determinar el EQT de una mezcla se multiplica la cantidad de cada uno de los miembros tóxicos de la familia por un coeficiente de ponderación del compuesto más tóxico, 2,3,7,8-TCDD. Este factor de ponderación se denomina factor de equivalencia de toxicidad (FET). El primer programa, elaborado por el Comité sobre los Retos de la Sociedad Moderna de la Organización del Tratado del Atlántico Norte en 1988 y denominado I-FET, abarcaba 17 PCDD/PCDF. Veintinueve de los 419 PCDD, PCDF y PCB por separado tenían FET asignados por la OMS en 1997 y revisados en 2005 (Tabla 1). El HCB no tiene EQT.

3.2 Ingestas tolerables

La ingesta diaria tolerable (IDT) es la cantidad diaria ingerida por kg de peso corporal de una sustancia química que no se considera nociva para la salud si es ingerida todos los días durante toda la vida. La IDT para las sustancias químicas que contribuyen al FET fue definida por la OMS en 1998 en 1-4 pg/kg de peso corporal/día.² En 2001, el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios estableció una ingesta mensual tolerable provisional (IMTP) de 70 pg/kg de peso corporal/mes, que equivale aproximadamente a 2.3 pg/kg de peso corporal/día.

■ **Tabla 1. Factores de equivalencia de toxicidad**

Congéneres	OMS/1997 FET en mamíferos	FET-I	OMS/2005 FET en mamíferos
PCDD			
2,3,7,8-TCDD	1	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	1	0.5	1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	0.0001	0.001	0.0003
PCDF			
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8-PeCDF	0.05	0.05	0.03
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0.5	0.3
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.1	0.1
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0.01	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	0.0001	0.001	0.0003
PCB			
No. IUPAC Estructura			
<i>no-orto</i> sustituidos			
77 3,3',4,4'-TCB	0.0001	n.d.	0.0001
81 3,4,4',5-TCB	0.0001		0.0003
126 3,3',4,4',5-PeCB	0.1		0.1
169 3,3',4,4',5,5'-HxCB	0.01		0.03
<i>mono-orto</i> sustituidos			
105 2,3,3',4,4'-PeCB	0.0001		0.00003
114 2,3,4,4',5-PeCB	0.0005		0.00003
118 2,3',4,4',5-PeCB	0.0001		0.00003
123 2',3,4,4',5-PeCB	0.0001		0.00003
156 2,3,3',4,4',5-HxCB	0.0005		0.00003
157 2,3,3',4,4',5'-HxCB	0.0005		0.00003
167 2,3',4,4',5,5'-HxCB	0.00001		0.00003
189 2,3,3',4,4',5,5'-HpCB	0.0001		0.00003

n.d.: No disponible

Referencias

Documentos

Government of Japan. 2003. *Dioxins*. Information pamphlet. Government of Japan, Ministry of the Environment, Environmental Management Bureau, Office of Dioxins Control.

Sitios en Internet

International Agency for Research on Cancer (IARC) Monographs. <http://monographs.iarc.fr>.

Joint Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization (FAO/WHO) Expert Committee on Food Additives (JECFA), fifty-seventh meeting, Rome, 5–14 June 2001. *Summary And Conclusions*.

<http://www.fda.gov/ohrms/dockets/dockets/95s0316/95s-0316-rpt0254-05-vol186.pdf>.

United States Center for Disease Control. *TOXFAQs for Hexachlorobenzene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. www.atsdr.cdc.gov/tfacts90.html.

United States Center for Disease Control. *TOXFAQs for Polychlorinated Biphenyls*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. www.atsdr.cdc.gov/tfacts17.html.

WHO (World Health Organization). *Dioxins and Their Effect on Human Health*. WHO, Geneva. www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/en/.

WHO (World Health Organization). 2005. Project for the re-evaluation of human and mammalian toxic equivalency factors (TEFs) of dioxins and dioxin-like compounds, http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_update/en/

■ Cuadro 1. Artículo 5 del Convenio de Estocolmo

ARTICULO 5

**Medidas para reducir o eliminar las liberaciones derivadas
de la producción no intencional**

Cada parte adoptará como mínimo las siguientes medidas para reducir las liberaciones totales derivadas de fuentes antropógenas de cada uno de las sustancias incluidas en el Anexo C, con la meta de seguir reduciéndolas al mínimo y, en los casos en que sea viable, eliminarlas definitivamente:

- (a) Elaborará en un plazo de dos años a partir de la entrada en vigor del presente Convenio para dicha Parte, y aplicará ulteriormente, un plan de acción o, cuando proceda, un plan de acción regional o subregional como parte del plan de aplicación especificado en el artículo 7, destinado a identificar, caracterizar y combatir las liberaciones de las sustancias incluidas en el anexo C y a facilitar la aplicación de los apartados b) a e). En el plan de acción se incluirán los elementos siguientes:
 - (i) Una evaluación de las liberaciones actuales y proyectadas, incluida la preparación y el mantenimiento de inventarios de fuentes y estimaciones de liberaciones, tomando en consideración las categorías de fuentes que se indican en el anexo C;
 - (ii) Una evaluación de la eficacia de las leyes y políticas de la Parte relativas al manejo de esas liberaciones;
 - (iii) Estrategias para cumplir las obligaciones estipuladas en el presente párrafo, teniendo en cuenta las evaluaciones mencionadas en los incisos i) y ii);
 - (iv) Medidas para promover la educación, la capacitación y la sensibilización sobre esas estrategias;
 - (v) Un examen quinquenal de las estrategias y su éxito en cuanto al cumplimiento de las obligaciones estipuladas en el presente párrafo; esos exámenes se incluirán en los informes que se presenten de conformidad con el artículo 15; y
 - (vi) Un calendario para la aplicación del plan de acción, incluidas las estrategias y las medidas que se señalan en ese plan;
- (b) Promover la aplicación de las medidas disponibles, viables y prácticas que permitan lograr rápidamente un grado realista y significativo de reducción de las liberaciones o de eliminación de fuentes;

- (c) Promover el desarrollo y, cuando se considere oportuno, exigir la utilización de materiales, productos y procesos sustitutivos o modificados para evitar la formación y liberación de productos químicos incluidos en el anexo C, teniendo en cuenta las orientaciones generales sobre medidas de prevención y reducción de las liberaciones que figuran en el anexo C y las directrices que se adopten por decisión de la Conferencia de las Partes;
- (d) Promover y, de conformidad con el calendario de aplicación de su plan de acción, requerir el empleo de las mejores técnicas disponibles con respecto a las nuevas fuentes dentro de las categorías de fuentes que según haya determinado una Parte justifiquen dichas medidas con arreglo a su plan de acción, centrándose especialmente en un principio en las categorías de fuentes incluidas en la parte II del anexo C. En cualquier caso, el requisito de utilización de las mejores técnicas disponibles con respecto a las nuevas fuentes de las categorías incluidas en la lista de la parte II de ese anexo se adoptarán gradualmente lo antes posible, pero a más tardar cuatro años después de la entrada en vigor del Convenio para esa Parte. Con respecto a las categorías identificadas, las Partes promoverán la utilización de las mejores prácticas ambientales. Al aplicar las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales, las Partes deberán tener en cuenta las directrices generales sobre medidas de prevención y reducción de las liberaciones que figuran en dicho anexo y las directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales que se adopten por decisión de la Conferencia de las Partes;
- (e) Promover, de conformidad con su plan de acción, el empleo de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales:
 - (i) Con respecto a las fuentes existentes dentro de las categorías de fuentes incluidas en la parte II del anexo C y dentro de las categorías de fuentes como las que figuran en la parte III de dicho anexo; y
 - (ii) Con respecto a las nuevas fuentes, dentro de categorías de fuentes como las incluidas en la parte III del anexo C a las que una Parte no se haya referido en el marco del apartado d).

Al aplicar las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales, las Partes tendrán en cuenta las directrices generales sobre medidas de prevención y reducción de las liberaciones que figuran en el anexo C y las directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales que se adopten por decisión de la Conferencia de las Partes;

- (f) A los fines del presente párrafo y del anexo C:
 - (i) Por “mejores técnicas disponibles” se entiende la etapa más eficaz y avanzada en el desarrollo de actividades y sus métodos de operación que indican la idoneidad práctica de técnicas específicas para proporcionar en principio la base de la limitación de las liberaciones destinada a evitar y, cuando no sea viable, reducir en general las liberaciones de las sustancias incluidas en la parte I del anexo C y sus efectos en el medio ambiente en su conjunto. A este respecto:

- (ii) “Técnicas” incluye tanto la tecnología utilizada como el modo en que la instalación es diseñada, construida, mantenida, operada y desmantelada;
- (iii) “Disponibles” son aquellas técnicas que resultan accesibles al operador y que se han desarrollado a una escala que permite su aplicación en el sector industrial pertinente en condiciones económica y técnicamente viables, teniendo en consideración los costos y las ventajas; y
- (iv) Por “mejores” se entiende más eficaces para lograr un alto grado general de protección del medio ambiente en su conjunto;
- (v) Por “mejores prácticas ambientales” se entiende la aplicación de la combinación más adecuada de medidas y estrategias de control ambiental;
- (vi) Por “nueva fuente” se entiende cualquier fuente cuya construcción o modificación sustancial se haya comenzado por lo menos un año después de la fecha de:
 - a. Entrada en vigor del presente Convenio para la Parte interesada; o
 - b. Entrada en vigor para la Parte interesada de una enmienda del anexo C en virtud de lo cual la fuente queda sometida a las disposiciones del presente Convenio exclusivamente en virtud de esa enmienda.
- (g) Una Parte podrá utilizar valores de límite de liberación o pautas de comportamiento para cumplir sus compromisos de aplicar las mejores técnicas disponibles con arreglo al presente párrafo.

■ Cuadro 2. Anexo C del Convenio de Estocolmo

Anexo C

PRODUCCIÓN NO INTENCIONAL

Parte I: Contaminantes orgánicos persistentes sujetos a los requisitos del artículo 5

El presente anexo se aplica a los siguientes contaminantes orgánicos persistentes, cuando se forman y se liberan de forma no intencional a partir de fuentes antropógenas:

Sustancia química

Dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF)
 Hexaclorobenceno (HCB) (No. CAS: 118-74-1)
 Bifenilos policlorados (PCB)

II: Categorías de fuentes

Las dibenzoparadioxinas y los dibenzofuranos policlorados, el hexaclorobenceno, y los bifenilos policlorados se forman y se liberan de forma no intencionada a partir de procesos térmicos, que comprenden materia orgánica y cloro, como resultado de una

combustión incompleta o de reacciones químicas. Las siguientes categorías de fuentes industriales tienen un potencial de formación y liberación relativamente elevadas de estos productos químicos al medio ambiente:

- (a) Incineradoras de desechos, incluidas las co-incineradoras de desechos urbanos peligrosos o médicos o de fango cloacal;
- (b) Desechos peligrosos procedentes de la combustión en hornos de cemento;
- (c) Producción de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que producen cloro elemental para el blanqueo;
- (d) Los siguientes procesos térmicos de la industria metalúrgica:
 - (i) Producción secundaria de cobre;
 - (ii) Plantas de sinterización en la industria del hierro e industria siderúrgica;
 - (iii) Producción secundaria de aluminio;
 - (iv) Producción secundaria de zinc.

Parte III: Categorías de fuentes

Pueden también producirse y liberarse en forma no intencionada dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos policlorados, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados a partir de las siguientes categorías de fuentes, en particular:

- (a) Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos;
- (b) Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en la parte II;
- (c) Fuentes de combustión domésticas;
- (d) Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas o calderas industriales;
- (e) Instalaciones de combustión de madera u otros combustibles de biomasa;
- (f) Procesos de producción de productos químicos determinados que liberan de forma no intencional contaminantes orgánicos persistentes formados, especialmente la producción de clorofenoles y cloranil;
- (g) Crematorios;
- (h) Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible;
- (i) Destrucción de carcasas de animales;
- (j) Teñido (con cloranil) y terminación (con extracción alcalina) de textiles y cueros;
- (k) Plantas de desguace para el tratamiento de vehículos una vez acabada su vida útil*;
- (l) Combustión lenta de cables de cobre**;

(m) Desechos de refinerías de petróleo***.

IV: Definiciones

1. A efectos del presente anexo:

- (a) Por “bifenilos policlorados” se entienden compuestos aromáticos formados de tal manera que los átomos de hidrógeno en la molécula bifenilo (2 anillos bencénicos unidos entre sí por un enlace único carbono-carbono) pueden ser sustituidos por hasta diez átomos de cloro; y
- (b) Las “dibenzoparadioxinas policloradas” y los “dibenzofuranos policlorados” son compuestos tricíclicos aromáticos constituidos por dos anillos bencénicos unidos entre sí, en el caso de las dibenzoparadioxinas policloradas por dos átomos de oxígeno, y en el caso de los dibenzofuranos policlorados por un átomo de oxígeno y un enlace carbono-carbono y cuyos átomos de hidrógeno pueden ser sustituidos hasta por ocho átomos de cloro.

2. En el presente anexo la toxicidad de los dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos policlorados se expresa utilizando el concepto de equivalencia tóxica, que mide la actividad tóxica relativa tipo dioxina de distintos congéneres de las dibenzoparadioxinas y los dibenzofuranos policlorados, bifenilos policlorados coplanares en comparación con la 2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina. Los valores del factor tóxico equivalente que se utilizarán a efectos del presente Convenio serán coherentes con las normas internacionales aceptadas, en primer lugar con los valores del factor de equivalentes tóxicos para mamíferos de la Organización Mundial de la Salud 1998 con respecto a las dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos policlorados y bifenilos policlorados coplanares. Las concentraciones se expresan en equivalentes tóxicos.

Parte V: Orientaciones generales sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales

En esta Parte se transmiten a las Partes orientaciones generales sobre la prevención o reducción de las liberaciones de las sustancias incluidas en la parte I.

A. Medidas generales de prevención relativas a las mejores técnicas disponibles y a las mejores prácticas ambientales

Debe asignarse prioridad al estudio de criterios para evitar la formación y la liberación de las sustancias incluidas en la parte I. Entre las medidas útiles podrían incluirse:

- (a) Utilización de una tecnología que genere pocos desechos;
- (b) Utilización de sustancias menos peligrosas;
- (c) Fomento de la regeneración y el reciclado de los desechos y las sustancias generadas y utilizadas en los procesos;

- (d) Sustitución de materias primas que sean contaminantes orgánicos persistentes o en el caso de que exista un vínculo directo entre los materiales y las liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes de la fuente;
- (e) Programas de buen funcionamiento y mantenimiento preventivo;
- (f) Mejoramiento de la gestión de desechos con miras a poner fin a la incineración de desechos a cielo abierto y otras formas incontroladas de incineración, incluida la incineración de vertederos. Al examinar las propuestas para construir nuevas instalaciones de eliminación de desechos, deben considerarse alternativas como, por ejemplo, las actividades para reducir al mínimo la generación de desechos urbanos y médicos, incluidos la regeneración de recursos, la reutilización, el reciclado, la separación de desechos y la promoción de productos que generan menos desechos. Dentro de este criterio deben considerarse cuidadosamente los problemas de salud pública;
- (g) Reducción al mínimo de esos productos químicos como contaminantes en otros productos;
- (h) Evitación del cloro elemental o productos químicos que generan cloro elemental para blanqueo.

B. Mejores técnicas disponibles

El concepto de mejores técnicas disponibles no está dirigido a la prescripción de una técnica o tecnología específica, sino a tener en cuenta las características técnicas de la instalación de que se trate, su ubicación geográfica y las condiciones ambientales locales. Las técnicas de control apropiadas para reducir las liberaciones de las sustancias incluidas en la parte I son en general las mismas. Al determinar las mejores técnicas disponibles se debe prestar atención especial, en general o en casos concretos, a los factores que figuran a continuación, teniendo en cuenta los costos y beneficios probables de una medida y las consideraciones de precaución y prevención:

- (a) Consideraciones generales:
 - Naturaleza, efectos y masa de las emisiones de que se trate: las técnicas pueden variar dependiendo del tamaño de la fuente;
 - (ii) Fechas de puesta en servicio de las instalaciones nuevas o existentes;
 - (iii) Tiempo necesario para incorporar la mejor técnica disponible;
 - (iv) Consumo y naturaleza de las materias primas utilizadas en el proceso y su eficiencia energética;
 - (v) Necesidad de evitar o reducir al mínimo el impacto general de las liberaciones en el medio ambiente y los peligros que representan para éste;
 - (vi) Necesidad de evitar accidentes y reducir al mínimo sus consecuencias para el medio ambiente;

- (vii) Necesidad de salvaguardar la salud ocupacional y la seguridad en los lugares de trabajo;
 - (viii) Procesos, instalaciones o métodos de funcionamiento comparables que se han ensayado con resultados satisfactorios a escala industrial;
 - (ix) Avances tecnológicos y cambio de los conocimientos y la comprensión en el ámbito científico.
- (b) Medidas de reducción de las liberaciones de carácter general: Al examinar las propuestas de construcción de nuevas instalaciones o de modificación importante de instalaciones existentes que utilicen procesos que liberan las sustancias incluidas en el presente anexo, deberán considerarse de manera prioritaria los procesos, técnicas o prácticas de carácter alternativo que tengan similar utilidad, pero que eviten la formación y liberación de esos productos químicos. En los casos en que dichas instalaciones vayan a construirse o modificarse de forma importante, además de las medidas de prevención descritas en la sección A de la parte V, para determinar las mejores técnicas disponibles se podrán considerar también las siguientes medidas de reducción:
- (i) Empleo de métodos mejorados de depuración de gases de combustión, tales como la oxidación termal o catalítica, la precipitación de polvos o la adsorción;
 - (ii) Tratamiento de residuos, aguas residuales, desechos y lodos de alcantarillado mediante, por ejemplo, tratamiento térmico o volviéndolos inertes o mediante procesos químicos que les quiten la toxicidad;
 - (iii) Cambios de los procesos que den lugar a la reducción o eliminación de las liberaciones, tales como la adopción de sistemas cerrados;
 - (iv) Modificación del diseño de los procesos para mejorar la combustión y evitar la formación de las sustancias incluidas en el anexo, mediante el control de parámetros como la temperatura de incineración o el tiempo de residencia.

C. Mejores practicas ambientales

La Conferencia de las Partes podrá elaborar orientación con respecto a las mejores prácticas ambientales.

El Convenio de Basilea sobre el control de movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación fue adoptado en 1989 y entró en vigor en 1992. Al igual que el Convenio de Estocolmo, el Convenio de Basilea es un acuerdo internacional que hace referencia directa a la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el control de las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. El Convenio establece obligaciones para los países que son Partes, entre otros objetivos, para reducir la generación de desechos peligrosos, garantizar la existencia de instalaciones de eliminación adecuadas; y garantizar el manejo ambientalmente racional de los desechos.

El párrafo 2 del artículo 6 del Convenio de Estocolmo, sobre las medidas para reducir o eliminar liberaciones de existencias y desechos, contiene las siguientes disposiciones:

“La Conferencia de las Partes cooperará estrechamente con los órganos pertinentes del Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación para, entre otras cosas:

- a) Fijar niveles de destrucción y transformación irreversible necesarios para garantizar que no se exhiban las características de contaminantes orgánicos persistentes;
- b) Determinar los métodos que constituyan la eliminación ambientalmente racional a que se hace referencia anteriormente; y
- c) Adoptar medidas para establecer, cuando proceda, los niveles de concentración de las sustancias incluidas en los Anexos A, B y C para definir el bajo contenido de contaminante orgánico persistente a que se hace referencia en el inciso ii) del apartado d) del párrafo 1.”³

En su octava reunión, celebrada en diciembre de 2006, la Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea adoptó unas directrices técnicas generales actualizadas para el manejo ambientalmente racional de desechos que constituyen contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos, o con bifenilos policlorados, terfenilos policlorados o bifenilos polibromados. Las directrices técnicas generales elaboradas en virtud del Convenio de Basilea abordan asuntos relacionados con las tres grandes temáticas definitorias que plantea el párrafo 2 del artículo 6 del Convenio de Estocolmo.

Además, la octava reunión de la Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea también adoptó las siguientes tres nuevas directrices específicas:

- Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en los plaguicidas aldrina, clordano, dieldrina, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex o toxafeno o HCB como producto químico industrial, o que los contengan o estén contaminados con ellos.

- Directrices técnicas para la gestión ambientalmente racional de desechos consistentes en 1, 1,1 tricloro-2,2 bis (clorofenil) etano (DDT), que lo contengan o estén contaminados con él.
- Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de desechos que contengan dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), hexaclorobenceno o bifenilos policlorados producidos de forma no intencional, o que estén contaminados con ellos.

I.F Relación con otras preocupaciones ambientales

Los efectos adversos del mercurio y sus compuestos son mundialmente reconocidos. Por consiguiente, se han adoptado decisiones sobre la necesidad de más actividades y medidas internacionales que reduzcan o eliminen las liberaciones de mercurio y sus compuestos hacia el medio ambiente. Algunas de las fuentes que liberan los contaminantes orgánicos persistentes que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo puedan también liberar altos niveles de mercurio en el medio ambiente. También es posible que liberen otros contaminantes ambientales o gases de invernadero. Teniendo en cuenta estos efectos, al aplicar las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales establecidas en las presentes directrices relativas a la liberación de contaminantes orgánicos persistentes, las Partes deberán considerar también la aplicación de las medidas adecuadas para garantizar de igual manera la reducción de las liberaciones de mercurio y otros contaminantes.

En las definiciones del Convenio de Estocolmo, específicamente en el artículo 5 y el Anexo C, el término “mejores prácticas ambientales” se refiere a la aplicación de la combinación más adecuada de medidas y estrategias de control ambiental, y el término “mejor” se define como lo más eficaz para lograr un alto grado general de protección del medio ambiente en su conjunto.

Al reducir las liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes debe procurarse evitar el incremento de las liberaciones de otros contaminantes.

- ¹ El proyecto de directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación sobre mejores prácticas ambientales relativas al artículo 5 y al anexo C del Convenio fue elaborado por el Grupo de expertos sobre las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, establecido para tales efectos por la sexta reunión del Comité Intergubernamental de Negociación de un instrumento internacional jurídicamente vinculante para la aplicación de medidas internacionales respecto de ciertos contaminantes orgánicos persistentes (véase UNEP/POPS/INC.6/22, párrafo 75).
- ² 1 pg (picogramo) = 1×10^{-15} kilogramo (1×10^{-12} gramo).
- ³ El artículo 6, párrafo 1 d) ii) del Convenio de Estocolmo estipula que cada Parte: “d) Adoptará las medidas adecuadas para que esos desechos, incluidos los productos y artículos cuando se conviertan en desechos ... (ii) se eliminen de un modo tal que el contenido del contaminante orgánico persistente se destruya o se transforme en forma irreversible de manera que no se presenten las características de contaminante orgánico persistente o, de no ser así, se eliminen en forma ambientalmente racional cuando la destrucción o la transformación irreversible no represente la opción preferible desde el punto de vista del medio ambiente o su contenido de contaminante orgánico persistente sea bajo, teniendo en cuenta las reglas, normas y directrices internacionales, incluidas las que puedan elaborarse de acuerdo con el párrafo 2, y los regímenes mundiales y regionales pertinentes que rigen la gestión de los desechos peligrosos”.
- * *N. de T.*: De aquí en adelante: “Plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso”.
- ** *N. de T.*: De aquí en adelante: “Recuperación del cobre de cables por combustión lenta”.
- *** *N. de T.*: De aquí en adelante: “Refinerías de aceites de desecho”.

Sección II

Consideración de alternativas en la aplicación
de mejores técnicas disponibles

II.A Consideración de alternativas en el Convenio de Estocolmo

El Convenio de Estocolmo proporciona una orientación general sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en las que se insta a las Partes a dar prioridad al estudio de métodos para evitar la formación y liberación de las sustancias incluidas en la parte I del Anexo C del Convenio.⁴ El Convenio hace referencia al “estudio de alternativas” refiriéndose en particular a las mejores técnicas disponibles:

“Al examinar las propuestas de construcción de nuevas instalaciones o de modificación importante de instalaciones existentes que utilicen procesos que liberan las sustancias incluidas en el presente anexo, deberán considerarse de manera prioritaria los procesos, técnicas o prácticas de carácter alternativo que tengan similar utilidad, pero que impidan la formación y liberación de esos productos químicos”.⁵

II.B El Convenio de Estocolmo y las nuevas fuentes

Las Partes tienen la obligación de requerir el uso de mejores técnicas disponibles cuando en sus planes de acción hayan identificado fuentes nuevas, dentro de las categorías de fuentes, que justifiquen tal medida. Al comienzo se debe dar prioridad a las categorías de fuentes incluidas en la parte II del Anexo C del Convenio.⁶

Al ejecutar esta obligación, las Partes deberían asegurarse de que se dé prioridad a procesos, técnicas o prácticas alternativas que, teniendo una utilidad similar, impidan la formación o liberación de las sustancias que figuran en la parte I del Anexo C.

En este sentido, el Convenio de Estocolmo es ambicioso, pues promueve la búsqueda de procesos, técnicas y prácticas que eviten la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes e insta a las Partes a considerarlos de manera prioritaria. Esto no significa que siempre deba impedirse la instalación de fuentes con potencial de formar y liberar en el medio ambiente las sustancias que figuran en la parte I del Anexo C. Es posible que la eliminación total no sea factible o viable. Las fuentes que figuran en las partes II y III del Anexo C tienen finalidades útiles, pese al potencial de formar o liberar contaminantes orgánicos persistentes.

Para decidir en qué circunstancias es mejor impedir una fuente de la parte II, de la parte III o alguna otra fuente señalada como prioritaria conviene estudiar la propuesta de instalación original así como las posibles alternativas, tomando en cuenta la viabilidad de las diversas opciones.

Cuando una Parte obliga a la aplicación de mejores técnicas disponibles para una nueva fuente de sustancias del Anexo C, los responsables de la toma de decisiones deben asegurarse de que las alternativas que evitan la formación y liberación de tales sustancias químicas sean también consideradas. Para ello, deberían efectuar una comparación de los procesos propuestos, las alternativas posibles y la legislación aplicable, utilizando lo que podría llamarse “método de lista de verificación”, tomando en cuenta el contexto general del desarrollo sostenible y dando plena consideración a los factores ambientales, de salud, seguridad, así como socioeconómicos.

Los siguientes elementos formarían parte de este método.

1. Examinar la propuesta de nueva instalación en el contexto del desarrollo sostenible

Los responsables de la toma de decisiones deberían realizar un examen de la propuesta original de la nueva instalación así como de las alternativas posibles en el contexto de los planes de desarrollo sostenible del país. Este examen tiene por objeto que los responsables de la toma de decisiones conozcan mejor la propuesta de instalación y su utilidad prevista tomando en cuenta consideraciones sociales, económicas y ambientales, así como su posible contribución al desarrollo sostenible. También se debería estudiar la disponibilidad y viabilidad de la aplicación de medidas generales que reduzcan las liberaciones de las sustancias incluidas en el Anexo C, como las medidas que figuran en la parte V, sección B, inciso b), puntos i) al iv) del Anexo C.

2. Identificar alternativas posibles y accesibles

Habría que procurar identificar los procesos, técnicas o prácticas alternativas que, teniendo una utilidad similar, evitan la formación y liberación de las sustancias del Anexo C. Se deberían tomar en cuenta las orientaciones generales existentes para tales procesos, técnicas y prácticas (por ejemplo, las del Convenio de Basilea, la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), otros organismos intergubernamentales, así como gobiernos).

Con el fin de ayudar a las Partes a identificar posibles alternativas existentes y apropiadas, y en su calidad de centro de intercambio de información en virtud del artículo 9, la secretaría del Convenio elaborará, gestionará y dará a conocer un compendio de procesos, técnicas y prácticas disponibles que evitan la generación y liberación en el medio ambiente de las sustancias que figuran en el Anexo C, y que pueden ser utilizados como alternativas adecuadas para las instalaciones y procesos que generan estas sustancias. La elaboración y mantenimiento de dicho compendio por parte del centro de intercambio de información deberá tener las siguientes características:

- Realizarse de manera transparente
- Actualizarse periódicamente
- Proporcionar información que las Partes puedan utilizar de forma que se tomen en cuenta las circunstancias particulares de los países en desarrollo y algunos países con economías en transición
- Proporcionar información que las Partes puedan utilizar para tomar en consideración las diferencias regionales, y ayudarlas a centrarse en el desarrollo sostenible, incorporando los factores ambientales, de salud, seguridad y socioeconómicos

3. Realizar una evaluación comparativa entre las alternativas propuestas e identificadas, y las posibles y accesibles

Habiendo identificado las alternativas posibles y accesibles, los responsables de tomar decisiones deberían realizar evaluaciones de las distintas opciones, a saber, de la propuesta original de nueva instalación y todas las posibles alternativas que puedan considerarse. En algunos casos, y para ciertos tipos de instalaciones, quizás sea más apropiado que las autoridades de la localidad o zona realicen la evaluación comparativa. Sin embargo, en muchos casos, desde la perspectiva del desarrollo sostenible, quizás sea más apropiado que la evaluación comparativa se realice a otro nivel estratégico o de política. Al efectuar la evaluación comparativa, se deben tener en cuenta los elementos pertinentes de la lista indicativa del Anexo F⁷, Información sobre consideraciones socioeconómicas, y también los criterios pertinentes de la parte V, secciones A y B del Anexo C.

4. Determinar la prioridad

Se debería dar prioridad a la consideración de una propuesta alternativa respecto de otras opciones, incluso sobre la propuesta original de instalación cuando, sobre la base de la evaluación comparativa descrita en la subsección 3 *supra*, así como de las consideraciones y criterios pertinentes de los Anexos F y C del Convenio, se determina que esta alternativa identificada:

- Evita la formación y liberación de las sustancias que figura en el Anexo C
- Tiene una utilidad similar
- Se ajusta comparativamente bien a los planes de desarrollo sostenible del país, tomando en cuenta la integración efectiva de los factores social, económico, ambiental, de salud y seguridad

1. Aspectos de salud, seguridad y medio ambiente

El artículo 1 del Convenio estipula que “el objetivo del Convenio es proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes”. Al realizar evaluaciones comparativas de propuestas originales de instalaciones y posibles alternativas disponibles (como se indica en la subsección 3 de la sección II.C de las presentes directrices), se deben tener en cuenta los aspectos de salud, seguridad y medio ambiente.

Los efectos en la salud, la seguridad y el medio ambiente de las alternativas propuestas deberían compararse con los efectos de la propuesta original de instalación. El resultado de esta comparación debería constituir un factor importante en la consideración de la “utilidad similar” y en la determinación de la viabilidad y factibilidad.

2. Consideraciones sociales y económicas

El Anexo F del Convenio de Estocolmo contiene información pertinente sobre las consideraciones socioeconómicas relacionadas con posibles medidas de control para instrumentar las decisiones de la Conferencia de las Partes. Constituye al mismo tiempo una lista inicial de consideraciones y criterios sociales y económicos que las autoridades pueden utilizar al realizar evaluaciones comparativas de propuestas originales de instalaciones y sus alternativas posibles y accesibles. Se recomienda encarecidamente la elaboración de una lista de verificación por país, que comprenda los siguientes elementos, muchos de los cuales figuran en el Anexo F del Convenio:

- Viabilidad técnica
- Costos, incluidos los ambientales y de salud
- Rentabilidad
- Eficacia (capacidad de infraestructura, disponibilidad de personal debidamente capacitado)
- Riesgo
- Disponibilidad
- Acceso
- Facilidad de operación
- Repercusiones positivas o negativas para la sociedad, en particular repercusiones sobre la salud (pública, ambiental y ocupacional), agricultura (acuicultura y silvicultura incluidas), técnicas o conocimientos locales y tradicionales, diversidad

biológica, aspectos económicos, avance hacia el desarrollo sostenible y costos sociales

En muchos casos, las nuevas instalaciones propuestas tienen el potencial de reforzar los planes de desarrollo económico y reducción de la pobreza del país. La aplicación adecuada del Convenio de Estocolmo no debería interferir significativamente con este potencial; por el contrario, si se aplica de manera adecuada, el Convenio debe contribuir de manera positiva al desarrollo sostenible y a la reducción de la pobreza.

El Convenio⁸ estipula que las Partes que son países en desarrollo y Partes que son economías en transición tendrán acceso a recursos financieros nuevos y adicionales que les permitan sufragar el total acordado de los costos acumulados de las medidas de aplicación, en cumplimiento de las obligaciones estipuladas por el Convenio. Por ello, en la medida en que las Partes están obligadas a exigir mejores técnicas disponibles en las circunstancias concretas especificadas en el Convenio, deberían tener acceso a los costos totales acumulados acordados que implica el cumplimiento de dicha obligación.

En algunos casos, las alternativas adecuadas para nuevas fuentes de sustancias del Anexo C requieren menos gasto de bienes de capital importado, y se sustentan más bien de fuentes de mano de obra y conocimientos que existen en la localidad. Estas alternativas pueden evitar la formación y liberación de las sustancias que figuran en el Anexo C, adaptarse bien a los planes de desarrollo sostenible del país y ser tanto o más útiles que la propuesta original de instalación.

Por último, todas las obligaciones en virtud del Convenio contribuyen a lograr el objetivo del Convenio de proteger la salud humana y el medio ambiente contra las sustancias que figuran en el Anexo C.⁹ En su preámbulo¹⁰, el Convenio reconoce los “problemas de salud, especialmente en los países en desarrollo, derivados de la exposición local a los contaminantes orgánicos persistentes, en especial los efectos en las mujeres y, a través de ellas, en las futuras generaciones”. Al reducir las liberaciones de las sustancias del Anexo C, como parte de un proceso sólido y equilibrado de desarrollo sostenible, la aplicación adecuada del Convenio de Estocolmo puede reducir el peso de las enfermedades y déficits de salud en general que socavan los esfuerzos para lograr el desarrollo sostenible y reducir la pobreza.

3. Consideraciones del Anexo C

Todas las secciones pertinentes de la parte V, secciones A y B del Anexo C deberán ser consideradas al aplicar las presentes directrices.

- ⁴ Véase Convenio de Estocolmo, Anexo C, Parte V, sección A, encabezado.
- ⁵ Véase Convenio de Estocolmo, Anexo C, Parte V, sección B, inciso b).
- ⁶ Véase Convenio de Estocolmo, artículo 5 d).
- ⁷ La lista de elementos del anexo F del Convenio para productos químicos evaluados de conformidad con el artículo 8 (lista de productos químicos en los anexos A, B y C) también es pertinente para la evaluación comparativa.
- ⁸ Ver artículo 13.2 del Convenio de Estocolmo.
- ⁹ Ver artículo 1 del Convenio de Estocolmo.
- ¹⁰ Ver segundo párrafo del Convenio de Estocolmo.

Sección III

Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales: Orientación,
principios y consideraciones transectoriales

1. Consideraciones generales

El artículo 5 del Convenio de Estocolmo estipula que las Partes elaborarán, en un plazo de dos años a partir de la entrada en vigor del Convenio, un plan de acción para identificar, caracterizar y combatir las liberaciones de las sustancias incluidas en el Anexo C. Las sustancias que figuran en la lista son las dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), los dibenzofuranos policlorados (PCDF), así como el hexaclorobenceno (HCB) y los bifenilos policlorados (PCB), cuando no se producen de manera intencional.

El plan de acción, que también debe ser uno de los componentes del plan de aplicación nacional que cada Parte debe elaborar en virtud del artículo 7 del Convenio, comprenderá estrategias para cumplir con las obligaciones de reducir o eliminar las liberaciones de las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, así como un calendario del plan de acción. El plan determinará las prioridades de acción, entre ellas las relacionadas con las categorías de fuentes que ofrecen las oportunidades más eficaces y económicas de reducción o eliminación de liberaciones. También comprenderá un inventario de liberaciones de las sustancias del Anexo C.

De conformidad con el calendario de aplicación de su plan de acción y tomando en cuenta las directrices que adoptará la Conferencia de las Partes, las Partes promoverán y, en algunos casos, dispondrán el empleo de mejores técnicas disponibles y promoverán el empleo de mejores prácticas ambientales para las fuentes de liberaciones identificadas. Las Partes también promoverán y, cuando proceda, requerirán la aplicación de materiales o procesos sustitutos que eviten la formación y liberación de las sustancias incluidas en el Anexo C.

2. Aspectos jurídicos, de política y gobernabilidad

La forma en que cada gobierno promueva o requiera la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales variará de un país a otro, conforme a sus respectivos marcos jurídicos y condiciones socioeconómicas. Entre las estrategias de aplicación posibles que se podrían utilizar están el registro de liberaciones estimadas, los programas de información y educación, programas industriales voluntarios, instrumentos económicos y reglamentación. Todos estos aspectos deberían ser abordados en el plan de acción nacional de cada Parte.

Los tipos de medidas que se pueden promover o requerir como mejores técnicas disponibles para reducir o eliminar la liberación de las sustancias del Anexo C se pueden clasificar de la siguiente manera: aplicación de procesos alternativos, medidas primarias que impidan la formación de las sustancias incluidas en el Anexo C y medidas secundarias para el control y reducción de las liberaciones de estas sustancias.

3. Aspectos científicos y técnicos

La investigación científica aportará innovaciones en cuanto a la medición de las liberaciones y los niveles en el medio ambiente de las sustancias del Anexo C y a lo que se considera como “mejores” técnicas disponibles y “mejores” prácticas ambientales. Esta orientación general será actualizada periódicamente en función de estas innovaciones.

El Convenio define el término “mejores” como “más eficaces para lograr un alto grado general de protección del medio ambiente en su conjunto” (ver inciso f) iv) del artículo 5).

De conformidad con la decisión SC-1/15 de la Conferencia de las Partes del Convenio de Estocolmo, se deben realizar esfuerzos para asegurarse de que existan los mecanismos para proporcionar asistencia técnica y promover la transferencia de tecnología. Un caso particular es el de las Partes que actualmente no tienen acceso a esas técnicas por estar sujetas a derechos de propiedad intelectual.

Para cumplir con sus obligaciones de aplicar mejores técnicas disponibles, cada Parte tomará en consideración las presentes directrices, así como el nivel de desempeño de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales respecto a las liberaciones de PCDD/PCDF. Es prerrogativa de cada Parte establecer los límites reglamentarios de liberaciones con base en esta orientación.

4. Implicaciones económicas y sociales

Según el proceso que sea fuente de las sustancias incluidas en el Anexo C, serán en parte las condiciones económicas y sociales de un país las que determinarán lo que son “mejores” técnicas disponibles y “mejores” prácticas ambientales. Cuando los procesos son de escala relativamente grande, requieren grandes inversiones e implican flujos de material considerables y continuos (ej., hornos de cemento que queman desechos peligrosos, plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero, centrales que utilizan combustibles fósiles, grandes incineradores de desechos), las tecnologías y prácticas utilizadas, así como las empresas que las gestionan, son más o menos similares en todo el mundo. En estos casos, se pueden aplicar mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de manera muy similar en todos los países. Empero, cuando los procesos son de escala relativamente pequeña (crematorios, combustión doméstica, calderas industriales, vehículos motorizados) o implican la gestión de desechos a pequeña escala (incineración de desechos, quema a cielo abierto), las tecnologías y prácticas disponibles pueden variar mucho de un país a otro. En tales casos, para determinar cuáles son mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales se precisa un análisis de la viabilidad económica de las diversas opciones posibles. Como tal, una “mejor” opción puede ser la opción que sea más viable, en función del costo, en las condiciones socioeconómicas existentes.

5. Fuentes nuevas y fuentes existentes

Para las nuevas fuentes de sustancias dentro de las categorías de fuentes que requieren el uso de mejores técnicas disponibles, habiéndose identificado en sus planes de acción nacionales, las Partes deben centrarse inicialmente en las categorías de fuentes que figuran en la parte II del Anexo C. Las Partes introducirán paulatinamente los requerimientos de mejores técnicas disponibles para las nuevas fuentes de las categorías de la parte II del Anexo C tan pronto como sea posible, o a más tardar cuatro años después de la entrada en vigor del Convenio para dicha Parte. Se deberán promover mejores técnicas disponibles para las categorías de fuentes existentes que, según los planes de acción, requieran la aplicación de estas técnicas. En el caso de nuevas fuentes que según el plan de acción de la Parte no requieran medidas especiales, se promoverá el empleo de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.

El uso de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para nuevas fuentes garantiza que las liberaciones de las sustancias del Anexo C se reduzcan lo más posible. En el contexto del diseño y la operación de la planta, estas técnicas y prácticas deberán considerarse en una etapa en la que resulte eficiente y rentable incorporarlas. Dada la gran variedad de actividades industriales y no industriales implicadas, la estrategia nacional de desarrollo sostenible debe tener en cuenta la necesidad de garantizar que las inversiones en la economía nacional cumplan con esta orientación general y sus directrices.

El uso de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para las fuentes existentes señaladas en el plan de acción nacional de una Parte deberá promoverse de conformidad con dicho plan de acción.

Ocuparse de las fuentes existentes representa para las Partes una buena oportunidad de reducir el total de liberaciones. Al determinar las fuentes existentes que son prioritarias en su plan de acción nacional, cada Parte tendrá que considerar medidas que propicien los cambios necesarios en el proceso, o prácticas de gestión que puedan contribuir al logro de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales. Estas modificaciones podrían introducirse gradualmente y formar parte de los planes de modernización de una planta.

III.B Principios y planteamientos generales

Al aplicar las presentes directrices y orientación general a fuentes de sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo, las Partes quizás estimen útil considerar algunos principios y planteamientos generales de gestión ambiental que pueden reforzar los objetivos del Convenio. A continuación se presentan algunos de estos principios y planteamientos generales de gestión ambiental.

1. **Desarrollo sostenible.** “Desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”.¹¹

2. **Consumo sostenible.** “Utilización de bienes y servicios que responden a las necesidades básicas y contribuyen a una mejor calidad de vida, reduciendo al mínimo el uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones de desechos y contaminantes a lo largo del ciclo vital de los bienes o servicios, sin poner en peligro las necesidades de las generaciones futuras”.¹²

3. **Elaboración y aplicación de sistemas de gestión ambiental.** “Enfoque estructurado para determinar, aplicar y revisar políticas ambientales mediante el uso de un sistema que comprenda la estructura organizacional, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos”.¹³

4. **Uso de la ciencia, la tecnología y los conocimientos indígenas para tomar decisiones ambientales fundamentadas.** “Incrementar el uso de la tecnología y los conocimientos científicos e incrementar el uso beneficioso de los conocimientos locales y autóctonos de manera que se respete a los depositarios de esos conocimientos y de conformidad con la legislación nacional”; y “forjando alianzas entre las instituciones científicas, públicas y privadas, incluso integrando el asesoramiento de científicos en los procesos de adopción de decisiones a fin de afianzar el papel de la ciencia, la tecnología, el desarrollo y los sectores técnicos”.¹⁴

5. **Criterio de precaución.** “Con el fin de proteger el medio ambiente, los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades. Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente”.¹⁵

6. **Internalización de los costos ambientales y el principio de que el que contamina paga.** “Las autoridades nacionales deberían procurar fomentar la internalización de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos, teniendo en cuenta el criterio de que el que contamina debe, en principio, cargar con los costos de la contaminación, teniendo debidamente en cuenta el interés público y sin distorsionar el comercio ni las inversiones internacionales”.¹⁶

7. **Prevención de la contaminación.** “Empleo de procesos, prácticas, materiales, productos o energía que impiden o reducen la creación de contaminantes y desechos, y reducen el riesgo general para la salud humana y el medio ambiente”.¹⁷

8. **Prevención y control integrados de la contaminación.** “Este principio tiene por objeto la prevención y reducción integradas de la contaminación procedente de las actividades industriales a gran escala. También establece medidas para evitar o, cuando ello no sea posible, reducir las emisiones de las citadas actividades en la atmósfera, el agua y el suelo, incluidas las medidas relativas a los residuos, con el fin de alcanzar un nivel elevado de protección del medio ambiente considerado en su conjunto”.¹⁸

9. **Co-beneficios del control de otros contaminantes.** Por ejemplo, la prevención y control de otros contaminantes puede contribuir también a la reducción y eliminación de las sustancias del Anexo C.

10. **Producción más limpia.** “Aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva e integral a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia en general y reducir los riesgos al ser humano y el medio ambiente. La producción limpia

se puede aplicar a los procesos utilizados en cualquier sector industrial, a los productos mismos y a diversos servicios que se brindan a la sociedad”.¹⁹

11. **Análisis del ciclo de vida.** “Enfoque basado en el sistema que consiste en estimar los inventarios ambientales (es decir, generación, emisiones y descargas de desechos), la energía y la utilización de recursos relacionadas con un producto, proceso u operación en cada una de sus etapas del ciclo de vida”.²⁰

12. **Gestión del ciclo de vida.** “Concepto integral para la gestión total del ciclo de vida de bienes y servicios con miras a lograr una producción y consumo más sostenibles, partiendo de las herramientas de evaluación ambiental analíticas y de procedimiento existentes, e integrando los aspectos económicos, sociales y ambientales”.²¹

13. **Eliminación total.** “La reducción definitiva de la cantidad o concentración de la sustancia tóxica en una emisión, efluente o desecho liberado al medio ambiente por debajo de un nivel de cuantificación establecido. Por ‘nivel de cuantificación’ se entiende, con respecto a una sustancia, la concentración más baja que puede ser medida correctamente con métodos analíticos y de muestreo precisos pero de rutina”.²²

14. **Derecho de la comunidad a estar informada.** “En la esfera del medio ambiente, un mejor acceso a la información y una mayor participación del público en la toma de decisiones permiten tomar mejores decisiones y aplicarlas más eficazmente, contribuyen a sensibilizar al público respecto de los problemas medioambientales, le dan la posibilidad de expresar sus preocupaciones y ayudan a las autoridades públicas a tener debidamente en cuenta dichas preocupaciones”.²³

III.C

Consideraciones transectoriales

(i) Sustancias químicas que figuran en el Anexo C: Mecanismos de formación

1. Formación de las sustancias del Anexo C: panorama general

Las dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), los dibenzofuranos policlorados (PCDF), los bifenilos policlorados (PCB) y el hexaclorobenceno (HCB) se generan de manera no intencional en procesos químicos industriales, como la elaboración de productos químicos, y procesos térmicos, como la incineración de desechos. Los PCDD/PCDF son los únicos contaminantes orgánicos persistentes derivados cuyo mecanismo de formación ha sido estudiado exhaustivamente en los procesos relativos a la combustión y, en menor medida, en procesos químicos que no implican combustión. Aun así, no se conocen totalmente los mecanismos y las condiciones exactas de formación. Está claro

que el mecanismo o vía predominante puede variar de un proceso a otro, de modo que no hay un único factor controlador universal, sino que se trata de distintos factores.

Hay mucho menos información sobre la formación de los PCB y el HCB, en particular en procesos de combustión. En vista de las similitudes en la estructura y aparición de PCDD/PCDF, PCB y HCB, se suele suponer que, a excepción de las especies que contienen oxígeno, los parámetros y factores que favorecen la formación de PCDD/PCDF también producen PCB y HCB.

Por otro lado, en algunos procesos industriales se forma mucho más HCB que PCDD/PCDF o PCB. Las secciones V y VI, de la presente orientación, sobre los diversos tipos de incineración y procesos químicos proporcionan información más específica sobre procesos y productos derivados.

2. Formación de los PCDD/PCDF

2.1 Procesos térmicos²⁴

Se necesita carbono, oxígeno, hidrógeno y cloro, en su forma elemental, orgánica o inorgánica. En algún momento del proceso de síntesis, el carbono, ya sea que esté presente en un precursor o que sea generado por una reacción química, asumirá una estructura aromática.

Son dos las vías principales por las que se pueden sintetizar estos compuestos: a partir de precursores como los fenoles clorados o por síntesis *de novo* a partir de estructuras carbonáceas en cenizas volantes, carbón activado, hollín, moléculas más pequeñas, producto de una combustión incompleta. En condiciones de combustión deficiente, se pueden formar PCDD/PCDF durante el proceso mismo de combustión.

El mecanismo asociado con esta síntesis puede ser homogéneo (las moléculas reaccionan todas en la fase gaseosa o todas en la fase sólida) o heterogéneo (con reacciones entre moléculas en fase gaseosa y superficies).

Los PCDD/PCDF también se pueden destruir cuando se incineran a temperatura suficiente, con tiempos adecuados de residencia y una buena mezcla de gases de combustión y materiales de desecho o combustibles de alimentación. Las buenas prácticas de combustión implican la gestión de "las tres Tes": tiempo de residencia, temperatura y turbulencia, y suficiente exceso de oxígeno que permita una oxidación completa. Para evitar la reformación se requieren procedimientos de enfriamiento rápido y otros procedimientos conocidos.

Entre las variables conocidas por su impacto en la formación térmica de PCDD/PCDF se encuentran las siguientes:

- Tecnología: los PCDD/PCDF pueden formarse por combustión deficiente o en cámaras de post-combustión y dispositivos de control de contaminación atmosférica mal operados. Las técnicas de combustión varían desde las más sencillas y rudimentarias, como la quema a cielo abierto, hasta las muy complejas y avanzadas, como la incineración con mejores técnicas disponibles.

- Temperatura: Se ha registrado la formación de PCDD/PCDF en zonas de post-combustión o dispositivos de control de contaminación atmosférica en el rango de 200°C a 650°C; por lo general se considera que el rango de mayor formación es de 200°C y 450°C, con el punto máximo en torno a los 300°C.
- Metales: es conocida la función catalizadora del cobre, hierro, zinc, aluminio, cromo y manganeso en la formación, cloración y dechloración de PCDD/PCDF.
- Azufre y nitrógeno: El azufre y algunos productos químicos que contienen nitrógeno inhiben la formación de PCDD/PCDF, pero pueden provocar la formación involuntaria de otras sustancias.
- El cloro debe estar presente en forma orgánica, inorgánica o elemental. Su presencia en cenizas volantes o en su forma elemental en la fase gaseosa puede ser de particular importancia.
- Los PCB también son precursores para la formación de PCDF.

La investigación ha demostrado la importancia de otras variables y combinaciones de condiciones.

2.2 Procesos químicos industriales

Al igual que en los procesos térmicos, se requiere carbono, hidrógeno, oxígeno y cloro. Se considera que la formación de PCDD/PCDF en procesos químicos se encuentra favorecida por alguna o algunas de las siguientes condiciones:

- Temperaturas elevadas (>150°C)
- Condiciones alcalinas
- Catalizadores metálicos
- Radiación ultravioleta (UV) u otros radicales iniciadores

En la producción de productos químicos que contienen cloro, la tendencia a la formación de PCDD/PCDF se ha registrado de la siguiente manera:

Clorofenoles > clorobenzenos > alifáticos clorados > inorgánicos clorados

(ii) Consideraciones sobre la gestión de desechos

1. Resumen

La quema de desechos tiene un potencial comparativamente elevado de formación involuntaria de contaminantes orgánicos persistentes y de su liberación en el medio ambiente. Por eso las incineradoras de desechos figuran en las categorías de fuentes de la parte II del Anexo C del Convenio de Estocolmo. La quema de desechos a cielo abierto, incluida la quema en rellenos sanitarios, también puede provocar la formación y liberación accidental de contaminantes orgánicos persistentes, y esta fuente figura en

la parte III del Anexo C. La aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para estas fuentes debería tener en cuenta las prácticas de gestión ambientalmente racional de desechos. La gestión ambientalmente racional de desechos reduce las liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes y constituye también un factor importante para evitar problemas de salud y para promover el uso sostenible de los recursos.

Entre los principios importantes que se aplican a la prevención y reducción de desechos se encuentran el principio de reducción desde la fuente, el principio del ciclo de vida integrado y el de máxima recuperación de componentes reutilizables y reciclables, que se facilita en muchos casos separando desde la fuente los desechos que pueden ser compostados, reutilizados o reciclados. Los desechos restantes deberían tratarse y eliminarse de manera ambientalmente racional. Para que en todas las etapas –sistema de recolección, actividades de reciclado y eliminación final– las soluciones sean eficaces, deberían adaptarse a las circunstancias locales, tomando en cuenta factores como la posibilidad de evitar los desechos, su composición, los posibles procesos de reciclado, estructuras existentes, así como aspectos financieros, económicos y sociales.

En general, se debería dar prioridad a los métodos que evitan la formación y liberación de las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio. Se deberían emplear métodos mejorados de gestión de desechos con el fin de evitar la quema de desechos a cielo abierto y otros procesos no controlados, como la quema en vertederos. Al considerar propuestas para construir nuevas instalaciones de eliminación de desechos, se deberían considerar alternativas como actividades para reducir la generación de desechos urbanos y médicos, incluida la recuperación de recursos, reutilización, reciclado y separación de desechos, así como la promoción de productos que generan menos desechos. Con esta perspectiva, se debería prestar la debida atención a los aspectos de salud pública.

La presente sección aborda estas cuestiones, pero no puede sustituir un examen exhaustivo de todos los aspectos específicos relacionados con la gestión de desechos.

2. Introducción

2.1 Importancia de la gestión de desechos para el medio ambiente y la salud

La gestión adecuada de los desechos es un elemento importante de la protección de la salud humana y el medio ambiente. También contribuye a evitar la pérdida de recursos. Una utilización irresponsable de los rellenos sanitarios puede contaminar cuerpos acuíferos, la quema de desechos en rellenos sanitarios o en incineradores inapropiados o la quema a cielo abierto pueden liberar altos niveles de las sustancias incluidas en el Anexo C y otras sustancias tóxicas como hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y material particulado. Por tal motivo, un enfoque global que mejore el sistema de gestión de desechos tendrá un impacto positivo en diversas áreas.

La gestión de desechos implica muchas áreas distintas de intervención. Para empezar, la prevención y reducción de desechos puede contribuir a aminorar la generación de desechos y su potencial de riesgo. En los procesos industriales, el desarrollo y empleo de

tecnologías que generan pocos o cero desechos han tenido un efecto positivo en la reducción de la cantidad de desechos para tratamiento. Dar más peso a la responsabilidad del fabricante puede también contribuir a resolver, o por lo menos reducir, problemas de la gestión de desechos (ver Figura 1).

■ **Figura 1: Jerarquía de la gestión de desechos**



2.2 Definiciones

El Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación presenta la siguiente definición general de desechos:

“Por desechos se entienden las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional”.

El Convenio de Basilea define “eliminación” como cualquiera de las operaciones que pueden o no conducir a la posibilidad de la “recuperación de recursos, reciclado, regeneración, reutilización directa u otros usos”.

El Anexo I del Convenio de Basilea contiene 45 categorías de desechos peligrosos sujetos a movimientos transfronterizos que requieren control, siempre y cuando no entren en alguna de las siguientes categorías, y cuyas características se describen en el Anexo III del Convenio de Basilea:

- Explosivos
- Líquidos inflamables
- Sólidos inflamables
- Sustancias o desechos susceptibles de combustión espontánea
- Sustancias o desechos que, en contacto con el agua, emiten gases inflamables
- Oxidantes
- Peróxidos orgánicos
- Tóxicos (venenos) agudos
- Sustancias infecciosas
- Corrosivos
- Sustancias que liberan gases tóxicos en contacto con el aire o el agua
- Sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos)
- Ecotóxicos
- Sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, un producto de lixiviación, que posea alguna de las características antes expuestas

2.3 Importancia de crear estrategias nacionales de gestión de desechos

La gestión de desechos incide en toda la sociedad y su economía. Compete a las autoridades locales, regionales y nacionales; requiere una base jurídica, un mecanismo financiero y una buena coordinación entre ciudadanos y autoridades en todas las esferas. Al mismo tiempo, una buena gestión de desechos no puede hacerse sin un nivel mínimo de inversión. A fin de garantizar un sistema de gestión de desechos congruente, todas las acciones a los distintos niveles deberían seguir una misma estrategia convenida. Por consiguiente, es necesario, o por lo menos útil, debatir y decidir una estrategia nacional de gestión de desechos. El éxito en la aplicación de todo sistema de gestión de desechos, en especial en los países en desarrollo, puede requerir transferencia de las tecnologías necesarias y creación de capacidad, de conformidad con el artículo 12 del Convenio (ver también la sección III.A, subsección 3, sobre aspectos científicos y técnicos).

2.4 Algunos principios que se deben aplicar

La orientación general del Convenio de Basilea que deberá considerarse en el desarrollo de estrategias sobre desechos y desechos peligrosos (Secretaría del Convenio de Basilea, 1993) contiene estos principios:

El principio de reducción en la fuente, “en virtud del cual la generación de desechos debe reducirse al mínimo, por lo que respecta tanto a su cantidad como a su potencial contaminante. Esto puede lograrse utilizando centrales y procesos adecuadamente diseñados”;

El principio del ciclo de vida integrado, por el cual “las sustancias y productos deben concebirse y manejarse de modo que provoquen unos efectos ambientales mínimos durante su generación, utilización, recuperación y eliminación”.

Los productos desechados que puedan ser reutilizados o reciclados deberían recuperarse, en la medida de lo posible, para esta finalidad.

2.5 Enfoque propuesto en el Plan de aplicación de la CMDS

El párrafo 22 del Plan de aplicación de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (CMDS), celebrada en 2002 en Johannesburgo, estipula lo siguiente:

“Evitar la producción de desechos o reducirla al mínimo y aumentar al máximo la reutilización, el reciclado y el empleo de materiales alternativos inocuos para el medio ambiente, con la participación de las autoridades gubernamentales y de todos los interesados, con objeto de reducir al mínimo los efectos adversos para el medio ambiente y aumentar el rendimiento de los recursos, y prestar asistencia financiera, técnica y de otra índole con ese fin a los países en desarrollo.

Este objetivo implica la adopción, en todos los planos, de medidas encaminadas a:

(a) Establecer sistemas de gestión de desechos que asignen la más alta prioridad a prevenir o reducir al mínimo la generación de desechos y a reutilizarlos y reciclarlos, así como instalaciones para la eliminación ecológicamente racional de los desechos, idear tecnologías para aprovechar la energía de los desechos, promover iniciativas para el reciclado de desechos en pequeña escala que faciliten la gestión de los desechos urbanos y rurales y ofrezcan oportunidades de generar ingresos, y obtener apoyo internacional para los países en desarrollo a este respecto;

(b) Fomentar la prevención y reducción al mínimo de la generación de desechos alentando la producción de bienes de consumo reutilizables y de productos biodegradables y estableciendo la infraestructura necesaria”.

2.6 Importancia de la educación ciudadana

Para la aplicación acertada de un plan general de gestión de desechos se precisa la participación de diversos agentes: consumidores, autoridades, y operadores de la gestión de los desechos. Todos estos interesados deben estar informados sobre la

gestión adecuada de desechos y tienen que estar convencidos de contribuir al éxito de su aplicación. Es evidente la necesidad de sensibilización a todos los niveles; por ejemplo, los consumidores deberían estar informados sobre estrategias para evitar los desechos y ventajas del reciclaje. Es preciso informar sobre los peligros para la salud que implica la quema a cielo abierto de los desechos y promover mejores alternativas para reducir y, en última instancia, detener estas prácticas de eliminación.

2.7 Importancia de la capacitación de personal

Para gestionar eficazmente los desechos es importante que los responsables de la toma de decisiones y el personal técnico reciban una capacitación adecuada (véase la sección III.C (v)).

3. Incidencia en la producción y los productos

Todos los productos industriales y artesanales terminarán en algún momento desechados. Por eso, la calidad, y en particular el tiempo de vida técnico, de los productos tiene un impacto crucial en las cantidades de desechos que se deben eliminar.

Es limitada la capacidad de las autoridades nacionales para determinar en forma absoluta la calidad general del ciclo de vida de los productos y fomentar la fabricación de productos de larga vida. Sin embargo, hay formas indirectas de influir en estos aspectos de la producción que son bastante eficientes.

En muchos países, el sistema de adquisiciones del sector público es parte importante del mercado global. Al definir normas de calidad y requisitos mínimos, el sistema de compras del sector público logra incidir en la calidad de los productos ofrecidos. A resultas de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, varias naciones están elaborando mecanismos de adquisiciones sostenibles siguiendo las definiciones propuestas por el Equipo especial de contratación pública sostenible (*Sustainable Procurement Task Force*) establecido por el Gobierno del Reino Unido: "La contratación pública es un proceso por el que las organizaciones satisfacen sus necesidades de bienes, servicios, obra y servicios públicos de forma que se mantiene una relación calidad-precio buena y duradera en la medida en que genera beneficios para la sociedad y la economía, y al mismo tiempo reduce al mínimo los daños al medio ambiente" (*Sustainable Procurement Task Force* 2006).

En general, conviene evitar los embalajes innecesarios, promover los productos duraderos y reutilizables, y emplear materiales y diseños de productos que impidan la toxicidad y otras características peligrosas y que permitan la refabricación, recuperación del material y reciclado al final de su vida útil.

El etiquetado es otro eficaz instrumento: permite a los consumidores escoger productos en función de su desempeño ambiental, precio y calidad y, por ende, impulsa una demanda de bienes producidos en apego a estos principios de desarrollo sostenible.

3.1 Garantías de los productos

Los productos se vuelven desechos al final de su vida útil. Si, por culpa de su diseño o fabricación, el uso de un producto es limitado, su vida técnica será innecesariamente corta. Los aparatos eléctricos o los neumáticos de baja calidad pueden convertirse en desechos después de un período de uso relativamente corto, lo que incrementa la cantidad de desechos. Una posible forma de influir en la calidad consiste en definir legalmente un período mínimo de garantía para los productos.

3.2 Alentar a las empresas a utilizar sistemas de gestión ambiental

El uso de sistemas de gestión ambiental (por ejemplo los propuestos por la Organización Internacional de Normalización y el Esquema de Ecogestión y Ecoauditoría de la Unión Europea, o EMAS) ayuda a conocer mejor los procesos industriales y su incidencia en el medio ambiente. También puede ayudar a reducir la cantidad de desechos y sus propiedades peligrosas. La gestión responsable desde una perspectiva ambiental de productos y procesos puede propiciar una mayor conciencia en una empresa, mejorar su credibilidad y reputación, multiplicar sus oportunidades de desarrollo y facilitar el diálogo y las iniciativas de colaboración con los principales interesados.

3.3 Responsabilidad del fabricante

Los fabricantes y otros interesados tienen responsabilidades que pueden determinarse mediante instrumentos como el proyecto de Política de Productos Integrada de la Unión Europea y la estrategia temática para la prevención y reciclado de residuos, que se encuentra en puertas, el programa sobre Responsabilidad Extendida del Productor, de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD 2000), el concepto de gestión responsable del producto, o por otros medios. En algunos casos puede resultar conveniente obligar a los fabricantes a que retiren ciertos productos al final de su vida útil y se encarguen de que sean eliminados en condiciones ambientalmente adecuadas.

4. La reducción desde la fuente como prioridad

En general, una sociedad debería prestar particular atención a toda la gama de opciones y consideraciones en materia de gestión de desechos antes de decidir inversiones de gran escala para la construcción de un nuevo incinerador, relleno sanitario, tratamiento mecánico o biológico, u otras inversiones similares, o para modernizar una instalación existente de este tipo.

La prioridad absoluta entre las opciones de gestión de desechos es la reducción desde la fuente: reducción al mínimo de la cantidad de desechos junto con una disminución de su toxicidad y otros peligros potenciales. Se trata de una responsabilidad que compete a todos los sectores de la sociedad. El porcentaje de material de descarte que no llega a vertederos e incineradoras refleja el grado de éxito, pero siempre debe considerarse dentro del contexto del total de desechos generados.

En algunas situaciones, la decisión de construir nuevas instalaciones de tratamiento a gran escala puede minar los esfuerzos de reducción de desechos y recuperación de recursos provenientes de los mismos. Quienes invierten en nuevas instalaciones a menudo se verán presionados para asegurar un ingreso suficiente de desechos que les permita recuperar la inversión. En estos casos, las instalaciones nuevas pueden llegar a ser un impedimento y un factor disuasivo para los esfuerzos de reducción efectiva de desechos. Por consiguiente, toda consideración de nuevas instalaciones debería efectuarse en el marco de las políticas para la gestión integral de desechos.

5. Recolección

Los desechos domésticos suelen descartarse en recipientes especiales, que pueden ser botes de metal o plástico, o bolsas de plástico o papel. Los grandes edificios y bloques de departamentos tienen sistemas centralizados, con contenedores en los que se depositan los desechos. En los países más desarrollados es común que los desechos domésticos sean recolectados regularmente, pues los residuos de alimentos, en particular, se descomponen con rapidez. En las ciudades y zonas urbanas, los desechos son recolectados para su eliminación en vehículos especiales, que cuentan con equipo de compactación que permite aumentar la cantidad de desechos que puede transportarse, a menudo a grandes distancias, hacia rellenos sanitarios. Algunos estudios demuestran que en las grandes zonas conurbadas resulta económicamente viable transferir los desechos recolectados a vagones-contenedores para su transporte en tren hasta los rellenos; también se utilizan grandes barcazas para el transporte. En algunos casos, los desechos son empacados para facilitar su manipulación mecánica.

Aunque existen sistemas muy eficaces de separación mecánica de desechos mixtos, la separación y recolección de productos reciclables desde la fuente resulta, en muchos casos, más barata y hace que los productos para reciclado estén más limpios. El riesgo que se corre cuando no hay una separación desde la fuente es, por ejemplo que el papel y el cartón se mezclen con residuos húmedos de la cocina, o que los desechos vegetales, destinados a composta o fermentados, se mezclen con los desechos peligrosos de pequeñas industrias.

6. Reciclado

En general, una gran proporción de los desechos sólidos urbanos puede reutilizarse, reciclarse o compostarse. En varios países industrializados se recicla más del 50% de los desechos sólidos urbanos. Algunas regiones alcanzan índices aún más altos de reciclado. Algunas ONG como la *Zero Waste International Alliance* (Alianza Internacional Cero Desperdicios) persiguen estas ambiciosas metas en algunos países para reducir la cantidad de desechos que se envían a rellenos sanitarios o incineradores. Cero desperdicios significa concebir y gestionar productos y procesos para reducir el volumen y la toxicidad de los desechos y materiales, conservar y recuperar todos los recursos y no quemarlos ni enterrarlos. En muchos países, como Eslovaquia (Palarikovo) y Australia

(Canberra), se han puesto en marcha programas de cero desperdicios (véase los respectivos sitios en Internet).

La eliminación racional de desechos mixtos es, en la mayoría de los casos, más costosa que la reducción desde la fuente, que implica usar productos de larga vida útil, recuperar y reciclar con eficacia. Las posibilidades de composta, reutilización y reciclado se deben examinar y desarrollar en función de la composición de los desechos, los sistemas existentes de recolección y reciclado, así como las posibilidades económicas.

A título de ejemplo, el reciclado de papel y cartón, metales y vidrio genera en muchos casos un ingreso o, por lo menos, resulta más barato que su transporte y eliminación junto con otros desechos. Asimismo, la recolección y reciclado de botellas de tereftalato de polietileno (PET) u otros envases de plástico pueden generar materia prima para la industria del reciclado de plásticos.

En muchos países en desarrollo, los recursos provenientes de desechos pueden constituir materia prima importante para actividades de recuperación o de refabricación a pequeña escala, actividades que se pueden fomentar. Al hacerlo, también hay que promover mejoras en las condiciones sanitarias y de seguridad en este sector, ya que en muchos países se trata de un sector informal.

La recolección de productos reciclables comienza con la separación desde la fuente, seguida de la recolección propiamente dicha ya sea por parte de autoridades públicas o empresas privadas. En muchos casos, el sector informal también ha creado estructuras muy eficaces para la recolección de este tipo de desechos. El uso, e incluso el fortalecimiento de las estructuras existentes, puede implicar ventajas económicas y sociales y, por tal motivo, debería tomarse en cuenta al establecer o adaptar sistemas de gestión de desechos. Son ejemplos interesantes de ello las iniciativas de reciclado y compostaje emprendidas con éxito por asociaciones de vecinos de Bombay, en la India, y El Cairo, en Egipto (Kumar 2000; Faccini 1999).

7. Eliminación final

Aun con buenos resultados en la prevención de desechos y con metas ambiciosas de reciclado, quedan desechos para eliminar. La cantidad de desechos, su composición y características peligrosas, así como la viabilidad técnica y económica para su eliminación, son factores que deben tomarse en cuenta al elegir el método de eliminación final.

Si los desechos mixtos contienen un porcentaje elevado de desechos vegetales, se deberían analizar las posibilidades de compostaje o digestión anaeróbica. En algunos casos, los desechos se componen principalmente de materia vegetal, polvo y tierra, y el compostaje de estos desechos, habiendo separado ciertas fracciones (ej., plásticos), puede resultar una opción viable. Se deberá evaluar la calidad y uso de la composta producida.

El tratamiento biológico o bio-mecánico de los desechos son buenas alternativas si los desechos mixtos contienen, además de material biodegradable, una gran proporción de plásticos, metales y otros tipos de desechos. Los procesos de tratamiento bio-mecánico consisten en la clasificación mecánica de desechos y la separación del flujo de desechos

para segregar los materiales biodegradables, destinados a procesos biológicos, de los materiales no biodegradables. El proceso mecánico puede ser programado para separar además los materiales no biodegradables en fracciones que puedan ser recicladas. También es posible recuperar partes combustibles de los desechos. Esta fracción combustible, también llamada combustible derivado de desecho, casi siempre está contaminada con metales pesados y contiene más cloro que los combustibles normales. Por ello, estos productos derivados de la gestión de desechos sólo pueden utilizarse como combustibles en instalaciones equipadas con sistemas de control de contaminación atmosférica y eliminación cuidadosa de cenizas. Los productos derivados del tratamiento biológico pueden ser utilizados como composta, si son de buena calidad, o pueden ser depositados en rellenos.

7.1 Rellenos sanitarios

En muchos países, los desechos domésticos siempre se han eliminado en rellenos sanitarios. Por los cambios significativos en la composición de los desechos (ej., más plásticos) y las cantidades cada vez mayores de desechos que requieren eliminación, se han designado terrenos como sitios de eliminación para los desechos locales.

En el relleno sanitario los desechos se depositan por capas en celdas preparadas y se compactan para reducir su volumen. Luego se les cubre, por lo menos una vez al día, con un cierto tipo de tierra para ahuyentar alimañas, moscas, aves y otros carroñeros y evitar heridas por cortes. Muchos desechos, en particular los peligrosos, deberían ser depositados sólo en rellenos exclusivos (Hay información más detallada sobre este tipo de rellenos especiales en las directrices técnicas del Convenio de Basilea (D 5)).

La fracción putrescible de desechos es sometida a procesos aeróbicos y anaeróbicos. En el relleno se producen gases, una mezcla de metano y bióxido de carbono, y se forman otros compuestos orgánicos. Muchos son solubles en agua y se disuelven en cualquier humedad que haya en el relleno, con lo que se genera una mezcla líquida conocida como lixiviado. Los lixiviados pueden ser muy contaminantes, y es necesario evitar que se mezclen con aguas subterráneas o aguas superficiales. El tratamiento de los lixiviados y la eliminación segura de los gases de relleno, o incluso su utilización, forman parte de las políticas de gestión ambientalmente racional de los desechos. De cualquier manera, es necesario evitar la migración de lixiviados pues pueden seguir produciendo gases de relleno incluso lejos del sitio.

En la mayoría de los países los rellenos sanitarios son, por mucho, el método más comúnmente empleado de eliminación de desechos. Como consecuencia de los graves problemas ambientales y de salud asociados a antiguos vertederos abandonados, y de los muy altos costos de las medidas de saneamiento de esos sitios contaminados, muchos países han introducido el concepto de relleno para fines específicos, para referirse a la eliminación de desechos en lugares escogidos por sus propiedades de confinamiento. Pueden ser sitios naturales, o ampliados o acondicionados directamente con revestimientos; lo importante es que el diseño garantice en la medida de lo posible el aislamiento de los desechos del medio ambiente. Este tipo de rellenos se consideran la última opción a la que sólo se debe recurrir una vez agotados todos los esfuerzos para controlar, reducir o eliminar los peligros que presentan estos desechos.

8. Incineración

En algunos países con elevada densidad de población y carentes de zonas adecuadas para construir rellenos, la incineración de desechos ha sido, durante los últimos 50 años, el método principal de tratamiento y eliminación de desechos no reciclables. Los desechos sólidos urbanos contienen muchos elementos combustibles, con lo se puede generar exceso de calor. Los gérmenes patógenos y elementos organoquímicos en desechos pueden ser destruidos casi por completo. Puesto que los desechos domésticos contienen una gran variedad de materiales, incluso elementos no combustibles, es necesario que los incineradores tengan una construcción sólida y sean versátiles para tratar material de alimentación muy variable en cuanto a composición y valor calorífico de los desechos. Por lo general, se trata de hornos con parrillas de cadena o parrillas de agitación y, aunque son menos frecuentes, hornos giratorios. Para los lodos de alcantarillado y desechos industriales se utiliza la combustión en lecho fluidizado. Para garantizar una alta eficacia de combustión, debe haber un estricto control del rango de temperatura al que el horno opera y quema los desechos, del tiempo en que los desechos llegan a la temperatura del horno y se mantienen en ella, así como de la turbulencia en la cámara del horno. El principio de “las tres tes” –temperatura, tiempo y turbulencia en presencia de suficiente oxígeno– es fundamental para una buena combustión (véase también la sección V.A sobre Incineradoras de desechos en estas directrices).

Para evitar emisiones de gases o partículas, los incineradores deben estar equipados con sistemas eficaces de limpieza de gases de combustión que, en muchos casos, funcionan con convertidores catalíticos o añadiendo carbón activado a los gases de combustión o depuradores. Si se descarga agua de los depuradores, debe ser tratada. Las cenizas volantes de los precipitadores electrostáticos y los residuos de los equipos de contaminación atmosférica casi siempre contienen cantidades considerables de sustancias del Anexo C del Convenio, por lo que estos desechos deben ser eliminados en condiciones controladas.

La necesidad de un control fidedigno de los parámetros de combustión, los requisitos de los sistemas muy tecnificados de limpieza de gases de combustión, y la inversión necesaria para la recuperación de energía (calderas, turbinas, generadores eléctricos) quizás expliquen por qué los que los incineradores tienen una tecnología muy desarrollada, eficiente y al mismo tiempo muy costosa. Existen instalaciones más pequeñas pero, para que alcancen economías de escala es preciso, en la mayoría de los casos, que lleguen cuando menos a las 100,000 toneladas de desechos por año.

Durante los últimos años se han creado nuevos métodos para la combustión de componentes no reciclables de desechos sólidos urbanos. En algunos casos, primero se trituran o muelen los desechos y luego se queman en una planta concebida para ello. Así, en una primera fase, se pueden desgasificar a temperaturas más bajas o tratar sin oxígeno, o con muy poco oxígeno (proceso conocido como pirólisis). Luego, en una segunda fase, el gas resultante es quemado –después de lavado– a temperaturas elevadas. Esta combustión a altas temperaturas permite la vitrificación de los residuos de combustión y brinda algunas posibilidades para destruir de forma controlada los desechos contaminados con las sustancias del Anexo C. En este proceso hay que vigilar que los productos que no se quemaron por completo no se liberen al medio ambiente.

■ Anexo 1: Tratamiento de desechos en cuarentena

Los controles de cuarentena en las zonas fronterizas proporcionan a los países una protección importante contra la introducción de enfermedades, plagas, y organismos patológicos. Los productos y sustancias interceptadas en una barrera de cuarentena pueden ser muy variados, por ejemplo, desechos de barcos o aviones (incluso desechos de alimentos y papel), materias primas o procesadas, como canastas y *souvenirs*, materiales infestados de organismos (ej., gusano barrenador de la madera) o granos con semillas de maleza, material de construcción o maquinaria contaminada con tierra.

En cualquier caso, lo primero que se debe hacer es buscar el tratamiento adecuado para destruir el organismo y el material en cuestión. Tradicionalmente, el método preferido es la incineración, pero también deben considerarse las tecnologías que no se basan en la combustión, como la esterilización con vapor. Un ejemplo de reemplazo del método de incineración a altas temperaturas por el de esterilización con vapor es el del Aeropuerto Internacional de Auckland, en Nueva Zelanda, en 2005. Fue una decisión de carácter comercial, en la que participó la comunidad local. A principios de 2006, se encargó un equipo de esterilización con capacidad para tratar 22 toneladas diarias; en fecha de esta publicación, diciembre de 2006, esta unidad sigue en operación sin haber registrado dificultades.

■ Anexo 2: Un ejemplo de gestión de desechos médicos²⁵

Desde 1996, las organizaciones no gubernamentales *Cristi* y *ToxicsLink*, de Nueva Delhi, han prestado asistencia a instalaciones sanitarias en la solución de problemas relativos a la gestión de desechos sanitarios. Según su experiencia, la cualidad fundamental necesaria en una institución de salud es la buena disposición del personal administrativo. En 1998, varios hospitales privados de Nueva Delhi comenzaron a trabajar en ello, poco después de la adopción de normativas nacionales sobre desechos hospitalarios. En estos casos, el administrador principal encabezó los cambios en los sistemas y las políticas. Hoy en día, estos hospitales tienen sistemas establecidos gracias al compromiso adoptado en 1998 y mantenido en los años posteriores. Fracasaron los hospitales cuyo personal de más rango consideraba que la gestión de desechos era una carga innecesaria para ellos y sus subalternos.

En los casos en que el programa de gestión de desechos tuvo éxito, los encargados hacían rondas periódicas para identificar y resolver problemas directamente con el personal correspondiente. El jefe del personal médico y el superintendente de enfermería también participaban activamente en los programas de gestión de desechos. En otros casos, el programa se sostenía gracias al esfuerzo de un equipo. El administrador principal daba todo su apoyo, y se constituyó un comité de gestión integral de desechos encabezado por el director adjunto. El éxito del programa se basaba en una capacitación especializada y constante para todo el personal. Se subrayó la importancia de la capacitación y se asignó el tiempo necesario para realizarla.

En vista de que aproximadamente 80% de los desechos generados en las instalaciones sanitarias eran desechos generales, no infecciosos o no peligrosos, la separación y el reciclado de desechos eran actividades importantes. Muchos hospitales instalaron autoclaves, un sistema avanzado de tratamiento con vapor conocido como hidroclave, o una unidad de microondas para tratar la mayor parte de sus desechos infecciosos. Los desechos patológicos eran enviados a crematorios. Los desechos no infecciosos eran eliminados como desechos domésticos ordinarios. El tratamiento y eliminación de elementos cortopunzantes representaban una preocupación especial, en particular por el peligro de las jeringas contaminadas. Algunos desechos cortopunzantes se enterraban en fosas especiales. En otros se trataban en autoclaves, se trituraban, y reprocesaban las partes de plástico y metal previamente separadas. La Organización Mundial de la Salud publicó un total de 13 monografías con el título *Safe Management of Bio-Medical Sharps Waste in India*. Las organizaciones no gubernamentales también promovieron sistemas de tratamiento de pequeña escala y bajo costo para pequeñas instalaciones rurales, como pequeños autoclaves a base de energía solar, y otros métodos presentados al concurso internacional de tecnologías alternativas de tratamiento para zonas rurales de la organización *Health-Care Without Harm*.(www.medwastecontest.org).

(iii) Co-beneficios de la aplicación de mejores técnicas disponibles a las sustancias del Anexo C

1. Consideraciones generales

La aplicación de mejores técnicas disponibles para las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo a menudo trae consigo co-beneficios. Por otro lado, las medidas para proteger la salud humana y el medio ambiente de otros contaminantes también ayudarán a reducir y eliminar las sustancias del Anexo C.

Entre estos otros contaminantes están el material particulado, ciertos metales (como el mercurio), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles. Algunas medidas para combatirlos son los procesos de limpieza de gases de combustión, tratamiento de aguas residuales y desechos sólidos, así como las actividades de vigilancia continua y notificación.

A continuación se presentan algunos ejemplos de estos vínculos y co-beneficios. En las secciones de las presentes directrices donde se abordan categorías específicas de fuentes se proporciona más información sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.

2. Información, sensibilización y capacitación

Las actividades de información, sensibilización y capacitación relativas a los problemas ambientales y la protección de la salud pueden significar co-beneficios para la reducción de las sustancias del Anexo C y otros contaminantes.

3. Procesos de limpieza de gases de combustión

Diversos procesos de tratamiento de gases de combustión implicarán co-beneficios en la reducción de las sustancias que figuran en el Anexo C y otros contaminantes. He aquí algunos ejemplos:

3.1 Contención, recolección y ventilación

Estas medidas reducirán la exposición humana en hogares y en lugares de trabajo a material particulado total, material particulado de menos de 10 micrones (PM10) y material particulado de menos de 2.5 micrones (PM2.5). También se pueden reducir los contaminantes asociados al material particulado, como metales y compuestos de metales (ej., plomo) y los contaminantes gaseosos, como compuestos orgánicos volátiles.

3.2 Procesos de separación de polvos

Las medidas como el uso de ciclones, precipitadores electrostáticos y filtros de tela reducirán las emisiones en el medio ambiente de material particulado y contaminantes asociados con ésta.

3.3 Procesos de depuración

Estas medidas reducirán las emisiones de material particulado mediante el uso de eliminadores de neblina eficaces y pueden reducir contaminantes gaseosos como gases ácidos y mercurio. La desulfurización de gases de combustión reducirá las emisiones de SO₂.

3.4 Procesos de sorción

Las medidas como la adsorción con carbón activado reducirán las emisiones de mercurio, compuestos orgánicos volátiles, dióxido de azufre (SO₂), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) y dibenzoparadióxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF), según el caso.

3.5 Procesos catalíticos

Las medidas como la reacción catalítica selectiva para la reducción de NO_x también pueden reducir las emisiones gaseosas de las sustancias el Anexo C si también se produce oxidación catalítica en el sistema. La reacción catalítica selectiva también puede oxidar el mercurio elemental, que es soluble en agua y puede ser eliminado por los sistemas de desulfuración de gases de combustión. Los filtros de tela catalíticos también pueden reducir compuestos orgánicos volátiles.

4. Procesos de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento primario de aguas residuales eliminará sólidos suspendidos. El tratamiento terciario como el carbón activado puede eliminar diversos compuestos orgánicos.

Las tortas de filtración del tratamiento de aguas residuales se consideran desechos peligrosos y deben ser eliminadas de modo ambientalmente racional (ej., en rellenos sanitarios especiales).

5. Procesos de tratamiento de residuos sólidos

Las medidas como solidificación y tratamiento térmico de residuos reducirán el contenido total de contaminantes y lixiviados de diversos contaminantes en el medio ambiente.

6. Monitoreo y registro

Es posible que las plantas tengan la obligación de monitorear, medir, estimar y registrar las liberaciones al medio ambiente. Estas medidas podrían proporcionar información a la ciudadanía sobre diversos contaminantes y generar incentivos para mejoras constantes en el desempeño ambiental de las plantas.

Las mediciones de barrido exhaustivas y periódicas de una gran variedad de contaminantes, incluidos los PCDD/PCDF, hexaclorobenceno (HCB) y bifenilos policlorados (PCB), además del monitoreo de contaminantes comunes, podrían proporcionar información útil sobre muchas fuentes potenciales de las sustancias del Anexo C y otros contaminantes.

(iv) Gestión de gases de combustión y otros residuos

1. Técnicas de tratamiento de gases de combustión (dispositivos de control de la contaminación atmosférica)

En principio, se puede lograr la reducción de emisiones de dibenzoparadióxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) mediante los siguientes procesos de limpieza de gases de escape:

- Cámaras de post-combustión
- Sistemas de enfriamiento brusco
- Separación de polvos
- Procesos de depuración
- Procesos de sorción
- Oxidación catalítica

Los procesos de control de la contaminación atmosférica pueden ser húmedos, secos o semihúmedos, dependiendo del papel del agua en el proceso. Los dispositivos de control de la contaminación atmosférica en húmedo y, algunas veces, en semihúmedo, implican procesos adicionales para limpiar las aguas residuales generadas antes de que salgan de las instalaciones.²⁶ Los desechos sólidos derivados de procesos semihúmedos y secos (y también de procesos húmedos después del tratamiento de aguas residuales) tienen que eliminarse de modo ambientalmente racional, o recibir un tratamiento complementario antes de su eliminación o reutilización potencial.

La sección V.A, subsección 6.4, contiene más información sobre las aplicaciones para incineración de desechos.

1.1 Comparación de las técnicas de control de PCDD/PCDF

Las técnicas que han resultado más efectivas para reducir contaminantes orgánicos persistentes en los gases de combustión son las que utilizan adsorbentes y control de partículas y las que utilizan catalizadores. En la Tabla 1 se resumen las eficiencias de recolección de determinadas técnicas de control de PCDD/PCDF.

Los costos del control de PCDD/PCDF en instalaciones existentes pueden reducirse aprovechando los dispositivos de control de contaminación atmosférica:

- Mediante la inyección de coque activado se puede extender un filtro de tela o un precipitador electrostático existente a un reactor de inyección de lechada para reducir PCDD/PCDF. Los costos adicionales de la reducción de PCDD/PCDF provienen del almacenamiento, transporte, inyección y eliminación de coque activado que se utiliza como adsorbente adicional, y de la manipulación libre de riesgos del carbono y los residuos para eliminación, que pueden ser de distintos tipos.
- Los PCDD/PCDF pueden ser destruidos con un catalizador de oxidación. Para tal fin, se puede utilizar un catalizador existente empleado para la eliminación selectiva de óxidos de nitrógeno (NO_x). Puede generar costos adicionales la ampliación de la superficie del catalizador agregando una o dos capas para obtener concentraciones de PCDD/PCDF por debajo de $0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$.²⁷

Además de la eliminación o destrucción de PCDD/PCDF, también se reducirán otros contaminantes como metales pesados, aerosoles u otros contaminantes orgánicos.

■ **Tabla 1. Comparación de los sistemas de control de PCDD/PCDF**

Opción de control	Eficiencia de eliminación de PCDD/PCDF	Co-beneficios
Ciclón	Eficiencia baja	Eliminación de polvo grueso
Precipitador electrostático	Eficiencia baja	Diseñado para eliminar polvo
Filtro de manga	Eficiencia media	Diseñado para eliminar polvo
Depurador en húmedo	Eficiencia media	Diseñado para eliminar polvo o gases ácidos
Enfriamiento brusco seguido de un depurador en húmedo de gran eficiencia	Eficiencia media a alta	Reducción simultánea de polvo, aerosoles, HCl, HF, metales pesados y SO ₂
Cámara de post-combustión	Eficiencia alta	Cero residuos, pero se requiere el enfriamiento brusco de gases de combustión
Oxidación catalítica (reacción catalítica selectiva)	Eficiencia alta; destrucción de PCDD/PCDF y otros compuestos orgánicos	Cero residuos, reducción simultánea de NO _x
Filtros de manga catalíticos	Eficiencia alta	Eliminación simultánea de polvo
Adsorción seca en resinas (partículas de carbón dispersas en una matriz polimérica)	Depende de la cantidad de material instalado	Selectivo para PCDD/PCDF; el material puede incinerarse una vez utilizado
Reactor de arrastre de flujo con agregado de carbón activado o coque/cal o soluciones de piedra caliza y posteriormente filtro de tela	Eficiencia media a alta	Reducción simultánea de diversos contaminantes como PCDD/PCDF y mercurio; el material puede incinerarse una vez utilizado ^a
Reactor de lecho fluidizado fijo o circulante, adsorción con carbón activado o coque de horno de solera abierta	Eficiencia alta	Reducción simultánea de diversos contaminantes como PCDD/PCDF y mercurio; el material puede incinerarse una vez utilizado ^a

a. Como un adsorbedor de carbón también adsorberá mercurio, hay que vigilar la circulación del mercurio cuando el carbono empleado se vuelve a quemar. Será necesario volver a eliminar el mercurio.

1.2 Sistemas de enfriamiento brusco

Los sistemas de enfriamiento brusco con agua también se utilizan para reducir rápidamente la temperatura de los gases de combustión a fin de reducir los umbrales de formación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Estos sistemas y los sistemas de tratamiento de aguas residuales asociados se deben diseñar de forma

que puedan ingresar una mayor carga de partículas que, como consecuencia, irán a parar a las aguas del depurador.

1.3 Cámaras de post-combustión

Las cámaras de post-combustión son dispositivos independientes o integrados a la cámara principal de combustión que destruyen compuestos de carbono en los gases de combustión no quemados o parcialmente quemados. Según las condiciones, se puede precisar un catalizador, aire de combustión adicional o un quemador (de gas natural). Cuando proceda, la legislación debería especificar las temperaturas mínimas de destrucción para un proceso determinado. Se necesitan medidas que garanticen que las cámaras de post-combustión se utilizan adecuadamente.

1.4 Separación de polvos

Se liberan PCDD/PCDF junto con los gases de combustión en la fase gaseosa o ligados a partículas. La fracción de polvo fino puede enriquecerse en particular por su superficie específica alta. Como los precipitadores electrostáticos no siempre logran separar la fracción de polvo fino, los filtros de tela bien diseñados suelen ser más efectivos para reducir las emisiones de PCDD/PCDF. La adición de sorbentes puede mejorar la eficacia de eliminación (Hübner *et al.* 2000).

1.4.1 Ciclones y multiciclones

Los ciclones y multiciclones (compuestos por varios ciclones pequeños) extraen material particulado de la corriente de gas por medio de la fuerza centrífuga. Los ciclones son mucho menos eficaces que otros dispositivos, como los precipitadores electrostáticos o filtros de tela, para el control de liberaciones de material particulado, y no se utilizan solos en las aplicaciones avanzadas de limpieza de gases de combustión.

1.4.2 Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (en Europa, a estos sistemas se les llama filtros electrostáticos) suelen utilizarse para recolectar y controlar material particulado en gases de combustión mediante la aplicación de un campo eléctrico potente en la corriente de los gases (Figura 2), con lo que se cargan las partículas atrapadas en los gases de combustión.

Una serie de placas de recolección reciben carga opuesta para atraer y recolectar las partículas. La eficiencia de la recolección depende de la resistividad eléctrica de las partículas atrapadas. Los precipitadores electrostáticos eliminan con eficacia la mayor parte del material particulado, incluso las sustancias del Anexo C adsorbidas a partículas.

■ Figura 2. Principio del precipitador electrostático



Fuente: European Commission 2005

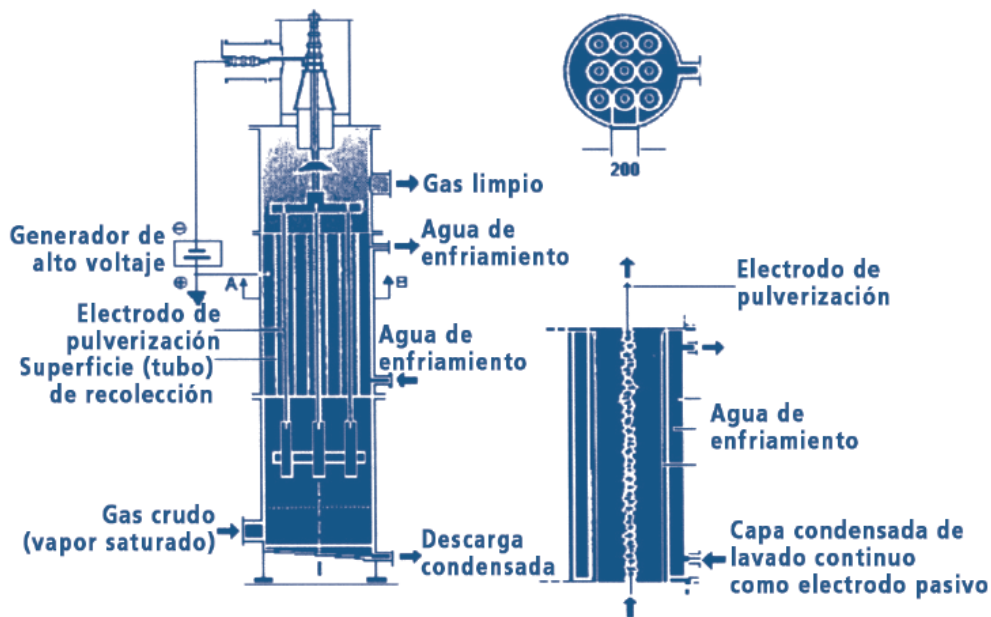
Dentro del precipitador electrostático se pueden formar sustancias del Anexo C a temperaturas entre 200°C y 450°C. A la entrada del precipitador las temperaturas aumentan de 200°C a 300°C y se ha observado que las concentraciones de PCDD/PCDF aumentan con la temperatura. A medida que la temperatura supera los 300°C, los índices de formación disminuyen.

Las temperaturas a las que suele operar un precipitador electrostático son de 160–260°C. Por lo regular, se evita operar a temperaturas más elevadas (es decir, por encima de los 250°C) ya que pueden aumentar los riesgos de formación de PCDD/PCDF.

Los precipitadores electrostáticos húmedos utilizan líquidos, por lo regular agua, para eliminar los contaminantes de las placas de recolección. Estos sistemas funcionan mejor cuando los gases entrantes son más fríos o húmedos.

Los precipitadores electrostáticos de condensación utilizan tubos de plástico dispuestos en haces, refrigerados exteriormente con agua, que recolectan líquidos o sólidos finos facilitando la condensación con un dispositivo de enfriamiento brusco (Figura 3).

■ Figura 3. Precipitador electrostático por condensación

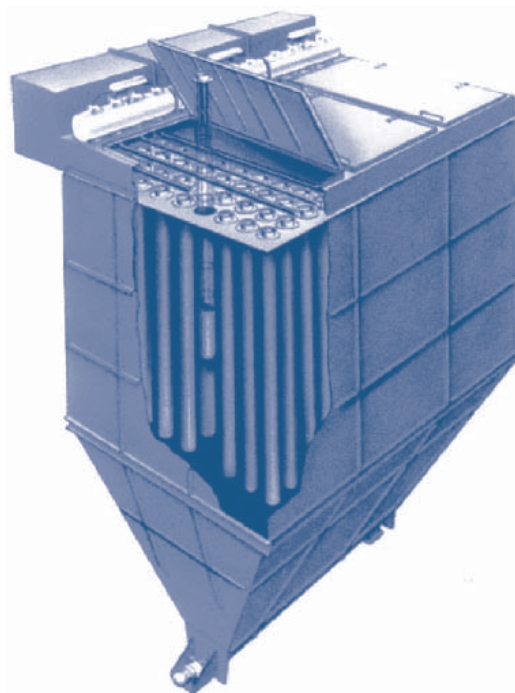


Fuente: European Commission 2005

1.4.3 Filtros de tela

Los filtros de tela también se conocen como filtros de manga o cámara de filtros (Figura 4). Estos sistemas de control de material particulado son muy efectivos para eliminar las sustancias del Anexo C que pueden encontrarse asociadas a partículas y vapores que se adsorben a las partículas de la corriente de gases de escape.

■ Figura 4. Esquema de un filtro de tela



Fuente: European Commission 2005

Los filtros suelen ser bolsas de 16 a 20 cm de diámetro y 10 m de longitud, hechas de material de fibra de vidrio tejida o politetrafluoroetileno (PTFE), y dispuestas en serie (ver Tabla 2). Un ventilador de inducción empuja los gases de combustión a través de la tupida tela, que proporciona un lecho donde se forma una torta de filtración. La porosidad del tejido y la torta de filtración resultante permiten que las bolsas actúen como medio de filtración y retengan una gran variedad de partículas de incluso menos de 1 µm de diámetro (aunque a 1 µm la eficiencia de la captura empieza a disminuir).²⁸ Los filtros de tela pueden estropearse o corroerse con el agua y, para evitar estos efectos, las corrientes de gas deben mantenerse por arriba del punto de condensación (130°C – 140°C). Algunos materiales para filtro son más resistentes. Los filtros de tela son sensibles a ácidos; por eso, suelen utilizarse en combinación con sistemas de adsorción de secado por atomización para la eliminación gases ácidos en etapas previas. El secado por atomización también sirve para enfriar los gases de entrada. Si no son enfriados, se pueden formar las sustancias del Anexo C en los filtros de tela, como ocurre con los precipitadores electrostáticos. La Tabla 3 presenta una comparación de los sistemas de eliminación de polvo.

■ **Tabla 2. Características de los materiales de los filtros de tela**

Material	Temperatura máxima (°C)	Resistencia		
		Ácido	Álcali	Flexibilidad física
Algodón	80	Deficiente	Buena	Muy buena
Polipropileno	95	Excelente	Excelente	Muy buena
Lana	100	Regular	Deficiente	Muy buena
Poliéster	135	Buena	Buena	Muy buena
Nylon	205	Deficiente a regular	Excelente	Excelente
PTFE	235	Excelente	Excelente	Regular
Poliamida	260	Buena	Buena	Muy buena
Fibra de vidrio	260	Regular a buena	Regular a buena	Regular

Fuente: European Commission 2005

■ **Tabla 3. Comparación de sistemas de eliminación de polvo**

Sistema de eliminación de polvo	Concentraciones típicas de emisiones de polvo	Ventajas	Desventajas
Ciclón y mult ciclón	Ciclones: 200–300 mg/m ³ Multiciclones: 100–150 mg/m ³	Potente, relativamente sencillo y fiable Utilizado en incineración de desechos	Sólo para pre-desempolvado Consumo de energía relativamente alto (en comparación con el precipitador electrostático)
Precipitador electrostático, en seco	<5–25 mg/m ³	Necesita relativamente poca energía Puede utilizar temperaturas de gases de 150°C – 350°C pero, de hecho, limitadas a 200°C por los PCDD/PCDF (ver columna derecha)	Formación de PCDD/ PCDF a temperaturas de 200°C – 450°C
Precipitador electrostático, húmedo	<5–20 mg/m ³	Pueden alcanzar concentraciones bajas de contaminantes	Utilizado sobre todo para post-desempolvado Generación de aguas residuales en el proceso Aumento de la visibilidad del penacho emitido
Filtro de manga	<5 mg/m ³	La capa de residuos actúa como filtro adicional y como reactor de adsorción	Consumo de energía relativamente elevado (en comparación con el precipitador electrostático) Sensible a la condensación de agua y a la corrosión

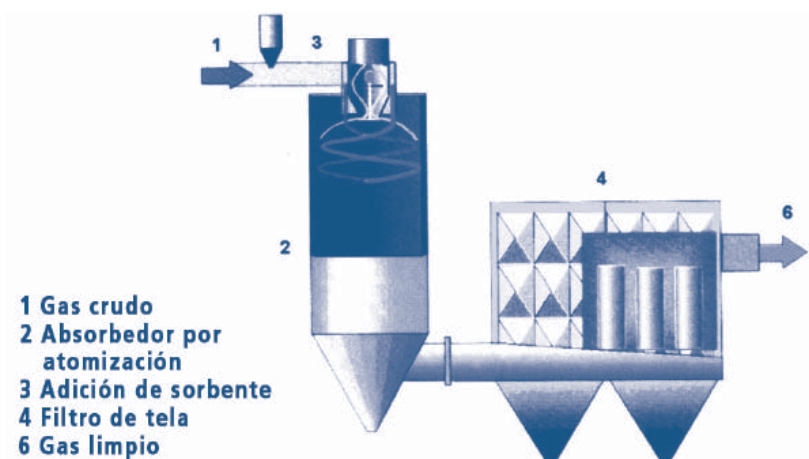
Fuente: European Commission 2005

1.5 Procesos de depuración

1.5.1 Depuración con secado por atomización

La depuración con secado por atomización, también llamada adsorción-secado-atomización o depuración semihúmeda, elimina tanto gases ácidos como material particulado de los gases de post-combustión. En un secador por atomización convencional típico, los gases calientes de combustión entran a una cuba del reactor depurador (Figura 5).

■ Figura 5. Adsorción/depuración con secado por atomización



Fuente: European Commission 2005

Se inyecta una lechada de cal hidratada y atomizada (agua y cal) al reactor a una velocidad controlada. La lechada se mezcla rápidamente con los gases de combustión dentro del reactor. El agua de la lechada se evapora rápidamente y el calor de evaporación provoca un rápido descenso de la temperatura de los gases de combustión. La capacidad neutralizadora de la cal hidratada puede reducir hasta un 90% los componentes ácidos en los gases de combustión (ej., HCl y SO₂). Sin embargo, en plantas de incineración de desechos, los sistemas de depuración con secado por atomización logran incluso un control de 93% de SO₂ y 98% de HCl. El producto resultante, un compuesto de material particulado y cal hidratada, se asienta en el fondo de la cuba del reactor o es capturado por un dispositivo de captura de partículas posterior (precipitador electrostático o filtro de tela).

La tecnología de secado por atomización se combina con filtros de tela o precipitadores electrostáticos. Además de reducir gases ácidos y material particulado, y de controlar los metales volátiles, el secado por atomización reduce las temperaturas de entrada que a su vez ayudan a reducir la formación de las sustancias del Anexo C. Las posibilidades de formación y liberación de PCDD/PCDF se reducen considerablemente enfriando bruscamente los gases de combustión a un rango de temperatura desfavorable para su formación y gracias a una mayor eficacia de recolección del material particulado resultante.

Los residuos sólidos del secado por atomización suelen contener una mezcla de sulfatos, sulfitos, cenizas volantes y adsorbentes no reaccionados y deben ser depositados en rellenos sanitarios.

1.5.2 Depuradores en húmedo

Los depuradores húmedos implican una serie de procesos destinados a eliminar gases ácidos y polvo. Entre las opciones de tecnologías se encuentran los depuradores de chorro, de rotación, de tipo Venturi, por atomización, de torre seca y de torre empacada (European Commission 2005). Los depuradores en húmedo ayudan a reducir la formación y liberación de las sustancias del Anexo C tanto en forma de vapor como de partícula. En un depurador de dos fases, la primera consiste en eliminar el cloruro de hidrógeno (HCl) con la introducción de agua; la segunda consiste en eliminar dióxido de azufre (SO₂) agregando cal caústica o cal hidratada. En el proceso de depuración húmeda se puede producir yeso, que reduce la cantidad de desechos destinados a relleno sanitario.

En el caso del depurador de torre empacada, el empaque con polipropileno con incrustaciones de carbono se puede utilizar específicamente para eliminar PCDD/PCDF.

De las técnicas antes expuestas en las que la eficacia de eliminación depende del pH del agua del depurador, los depuradores en húmedo son los más eficaces para la eliminación de gases ácidos solubles. Las partículas sólidas en el agua del depurador también pueden entrar en contacto con los PCDD/PCDF en la corriente de gas móvil, y ello incide en el nivel de fiabilidad de la relación entre resultados obtenidos en vigilancias periódicas de gases de escape y la eficiencia de destrucción de contaminantes de la planta.

Los efectos memoria se deben principalmente a la acumulación de diversos congéneres de PCDD/PCDF en materiales plásticos utilizados en los depuradores en húmedo. El efecto puede durar varias horas o ser de largo plazo. En sí, se prefiere eliminar los PCDD/PCDF antes de la depuración en húmedo, a fin de reducir los efectos memoria. Se debería realizar una evaluación de la acumulación de PCDD/PCDF en el depurador para luego adoptar las medidas adecuadas para resolver dicha acumulación y evitar la irrupción de los contaminantes fuera del depurador. Se debe prestar especial atención a la posibilidad de que se produzcan efectos memoria durante los períodos de apagado y encendido.

1.5.3 Absorbedor de polvo fino

Los absorbedores de polvo fino están equipados con muchos chorros neumáticos de doble componente (agua y aire comprimido). Estos adsorbedores de gran eficiencia pueden separar el polvo fino cubierto con PCDD/PCDF por dispersión muy fina, similar a una atomización, de la solución de adsorción y gracias a la gran velocidad de las gotículas de agua. Además, el enfriamiento de los gases de escape y el subenfriamiento en el absorbedor de polvo provocan la condensación y mejoran la adsorción de compuestos volátiles a las partículas de polvo. La solución de adsorción es tratada por procesamiento de aguas residuales. Al agregar adsorbentes se puede lograr una mayor reducción de PCDD/PCDF. Con depuradores sencillos para la separación de gases de escape ácidos no se puede lograr una eliminación apreciable de PCDD/PCDF. Los valores de emisión alcanzables de los absorbedores de gran eficiencia son del rango de 0.2-0.4 ng EQT-I/Nm³, lo que equivale a una eficiencia de separación de aproximadamente 95%

(Hübner *et al.* 2000). Los desechos derivados de este proceso se depositan por lo regular en rellenos sanitarios especiales.

1.6 Procesos de sorción

1.6.1 Filtros de lecho fijo

En el proceso con lecho fijo, los gases de escape prelavados pasan a temperaturas de 110°C – 150°C a través de un material adsorbente a base de carbón activado. Es preciso prever la alimentación del adsorbente nuevo, el reactor de lecho fijo y un sistema para tratar el adsorbente gastado. El lecho de coque activado separa los polvos, aerosoles y contaminantes gaseosos residuales. Se desplaza a través de la corriente y a contracorriente para evitar bloquear el lecho con el polvo residual, por ejemplo.

En general, el coque cubierto con PCDD/PCDF se elimina mediante combustión (interna), en la que se destruye la mayor parte de los contaminantes orgánicos. Los contaminantes inorgánicos son liberados en las escorias o se separan en el nuevo lavado intensivo de los gases de combustión. Con el proceso de lecho fijo se obtienen reducciones de PCDD/PCDF de 99.9%. Se considera que las tecnologías que cumplen con una norma de desempeño de 0.1 ng EQT-I/Nm³ son las más avanzadas (Hübner *et al.* 2000; Hartenstein 2003).

1.6.2 Procesos de inyección de flujo

Para mejorar la eficiencia de separación de los filtros de tela, se inyectan en la corriente de gases de escape adsorbentes con gran capacidad de captación de PCDD/PCDF. En general, se utilizan como adsorbentes el carbón activado o coque de horno de tipo solera junto con hidrato de cal. La separación se realiza en el filtro de tela que se encuentra al final del proceso, donde se separan los adsorbentes y polvo y se forma una capa de filtro. Debe asegurarse la eliminación apropiada del polvo del filtro, que contiene PCDD/PCDF. Las temperaturas habituales de operación son de 135°C a 200°C.

Por lo general, el coque cubierto con PCDD/PCDF se elimina por combustión (interna). La combustión (interna) destruye gran parte de los contaminantes orgánicos. Los contaminantes inorgánicos son liberados en las escorias o se separan en el nuevo lavado intensivo de los gases de combustión.

El proceso de inyección de flujo tiene una eficacia de filtración de 99%. La eficacia de eliminación de PCDD/PCDF depende de la calidad de la inyección de adsorbente, la efectividad del sistema de mezclado de gases de combustión y adsorbente, el tipo de filtro de partículas y el funcionamiento del sistema. Otro parámetro esencial es la velocidad del flujo de masa del adsorbente inyectado. Para lograr la máxima efectividad con esta tecnología debe emplearse un filtro de manga. Se considera que las tecnologías que cumplen con la norma de desempeño de 0.1 ng EQT-I/Nm³ son las más avanzadas (Hübner *et al.* 2000; Hartenstein 2003).

1.6.3 Reactor de arrastre de flujo

En este proceso se emplean los mismos adsorbentes que en el de inyección de adsorbentes pero en este caso el adsorbente suele aplicarse mezclado con cal hidratada

u otros materiales inertes como piedra caliza, cal viva o bicarbonato de sodio. Antes del reactor de arrastre de flujo para la depuración los gases de combustión, se necesita un sistema convencional de limpieza de gases de combustión para eliminar el grueso de cenizas volantes y los gases ácidos. Debe preverse la alimentación de adsorbente nuevo, filtro de tela, sistema de recirculación y sistema para tratar el adsorbente usado. Las temperaturas habituales de operación son 110°C a 150°C. Se considera que las tecnologías que cumplen con la norma de desempeño de 0.1 ng EQT-l/Nm³ son las más avanzadas (Hübner *et al.* 2000; Hartenstein 2003).

1.6.4 Adsorción en seco (en resinas)

Existe una nueva tecnología para la limpieza de gases de combustión que combina la adsorción y la absorción de PCDD/PCDF en estructuras de plástico que contienen partículas dispersas de carbón. En este nuevo material, los PCDD/PCDF primero se adsorben en la matriz polimérica y luego se difunden a la superficie de las partículas de carbono, donde son absorbidos de forma irreversible. El Adiox™ se encuentra más comúnmente aplicado en los empaques de torres de los sistemas de limpieza de gases. Hasta ahora, se han instalado más de 30 líneas de incineración completas con flujos de gas entre los 5,000 y 100,000 Nm³/h en sistemas de limpieza de gases de combustión en húmedo. La eficiencia de eliminación depende de la cantidad de material instalado. Esta tecnología puede emplearse como sistema principal de limpieza de PCDD/PCDF o bien para aumentar los márgenes de seguridad o reducir el efecto de memoria en los depuradores en húmedo. Si el Adiox se utiliza en los adsorbedores secos, la eficiencia de eliminación por cantidad instalada es mayor (Andersson 2005).

1.7 Oxidación catalítica de PCDD/PCDF

1.7.1 Reacciones catalíticas selectivas

Los procesos de oxidación catalíticos, que suelen aplicarse a la reducción de emisiones de óxido de nitrógeno, también se emplean en la destrucción de PCDD/PCDF. Por eso debe realizarse un despolvamiento efectivo (ej., valores de emisión de material particulado de menos de 5 mg/m³) a fin de lograr emisiones generales bajas de las sustancias del Anexo C. Si el objetivo es eliminar únicamente PCDD/PCDF (ej., con el proceso DeDiox), no se requiere la inyección de amoníaco. En este caso, las temperaturas de operación se sitúan en un rango de 130°C a 350°C.

Este proceso tiene como principales ventajas la facilidad de operación y la nula generación de residuos, aparte de una porción muy pequeña de catalizador gastado. Por lo tanto, la oxidación catalítica no causa problemas de eliminación.

La reacción de descomposición de Cl₄DD es:



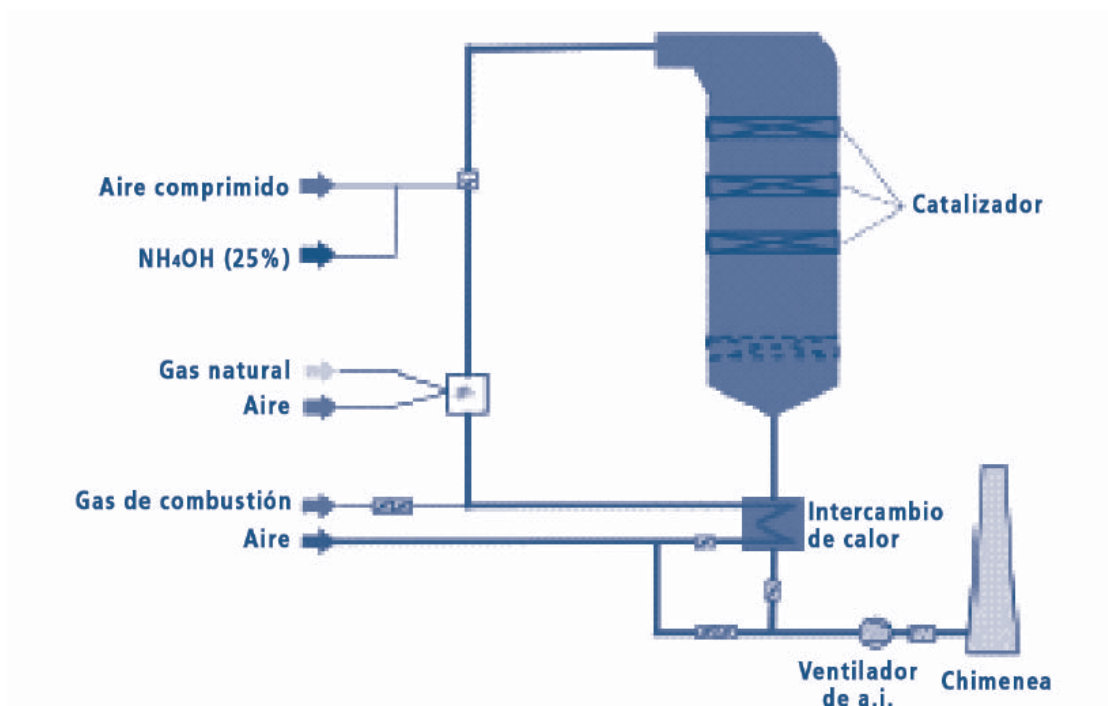
En general, las instalaciones operan en circuitos de gas limpio, es decir, que los polvos y metales pesados se separan antes del catalizador para evitar el desgaste acelerado y la desactivación de catalizadores por envenenamiento.

Con la oxidación catalítica sólo se captura la fracción de PCDD/PCDF en fase gaseosa. Sin embargo, se pueden lograr reducciones de emisiones de 95% a 99%. El índice de

reducción de PCDD/PCDF depende del volumen del catalizador instalado, la temperatura de reacción y la velocidad espacial de los gases de combustión a través del catalizador. Algunas pruebas de PCDD/PCDF arrojaron valores de emisión inferiores a 0.01 ng EQT- I/Nm^3 (en seco, 11% O_2).

Para la eliminación combinada de PCDD/PCDF y NO_x con el proceso de reacción catalítica selectiva, se inyecta una mezcla de aire y amoníaco en la corriente de gases de combustión y se hace pasar a través de un catalizador-tamiz (Figura 6). El amoníaco y NO_x reaccionan para formar agua y N_2 (European Commission 2005; Hübner *et al.* 2000; Hartenstein 2003).

■ **Figura 6. Reactor de reducción catalítica selectiva de alta temperatura para eliminar simultáneamente NO_x y PCDD/PCDF**



Fuente: Hartenstein 2003

1.7.2 Filtros de manga catalíticos

Los filtros de manga catalíticos con membrana de PTFE permiten que las concentraciones de polvo en gases de combustión limpios sean de aproximadamente 1–2 mg/Nm^3 . Se utilizan actualmente en la incineración de desechos, crematorios, plantas metalúrgicas y plantas de cemento. En la reducción de emisiones de PCDD/PCDF se emplean bolsas de filtro impregnadas con catalizador, o que contienen un catalizador pulverizado mezclado directamente con las fibras del material. Este tipo de bolsas de filtro se suele utilizar sin agregar carbón activado, de tal manera que los PCDD/PCDF se puedan destruir en el catalizador en lugar de ser absorbidos por el carbón y descargados como residuos sólidos. Los filtros de manga operan a temperaturas entre 180°C y 250°C.

Un sistema de filtro catalizador agrega incorpora fibra microporosa de PTFE a las partículas de catalizador insertadas en la estructura de la fibra. En este proceso, las

partículas de PTFE se mezclan con el catalizador y se procesan para producir fibras. Una membrana microporosa de ePTFE se lamina sobre las fibras microporosas del catalizador/ePTFE para producir el medio de filtración. Este material se cose luego en forma de bolsa de filtro, y se puede instalar en una cámara de filtros. Su empleo en crematorios en Alemania y Japón arrojó emisiones inferiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³ (Xu et al. 2003).

2. Tratamiento de los residuos del tratamiento de gases de combustión

El tratamiento de gases de combustión para eliminar contaminantes (descrito anteriormente) genera algunos residuos que deben ser eliminados o tratados una vez más antes de ser eliminados definitivamente, o incluso reutilizados. Las opciones de eliminación final o reutilización de residuos dependerán del tipo y grado de contaminación, así como de la matriz de desechos (fracción inerte). Los residuos del tratamiento de gases de combustión pueden ser sólidos (ej., polvo de cámaras de filtros o de precipitadores electrostáticos), aguas residuales o lodos con cantidades variables de sólidos disueltos y suspendidos (ej., de precipitadores electrostáticos y otros depuradores en húmedo) o materiales adsorbentes usados (ej., resinas saturadas). Estos residuos pueden contener, además de los materiales inertes, metales tóxicos, como arsénico, plomo, cadmio, mercurio y otros, así como PCDD/PCDF.²⁹ Estos residuos pueden ser tratados de varias maneras, como las que se presentan a continuación. Entre las prácticas existentes de tratamiento y eliminación de residuos derivados del tratamiento y eliminación de gases de combustión se encuentran la reutilización en el proceso en el que se generaron, eliminación en rellenos sanitarios, estabilización y eliminación ulterior, vitrificación, incorporación a materiales de construcción de carreteras, eliminación o valorización en minas de sal o de carbón, y tratamiento catalítico o térmico.

De conformidad con el Anexo I del Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación, los desechos que contienen PCDD o PCDF, entre ellos las cenizas volantes, se consideran desechos peligrosos.

2.1 Gestión de los residuos del tratamiento de gases de combustión³⁰

Uno de los principales residuos derivado del tratamiento de gases de combustión (o del control de la contaminación atmosférica) son las cenizas volantes. La eliminación de cenizas volantes de gases de combustión por medio de depuradores en seco, ciclones o filtros de tela generará material particulado sólido, fino y seco con diversas propiedades y contaminantes, según la fuente de combustión que las produjo. El control de la contaminación ambiental de muchos tipos de fuentes de combustión, incluidos los incineradores de desechos urbanos y desechos peligrosos, hornos eléctricos de arco para la producción de acero y hornos de cemento, puede generar este tipo de material particulado seco y fino cuando se recurre a controles en seco. Estos residuos de partículas secas contienen distintos niveles de metales (según el material de alimentación) y también pueden contener algunos PCDD/PCDF y otros hidrocarburos aromáticos policíclicos adsorbidos en ellos, según las condiciones de combustión.

Las liberaciones de contaminantes en el medio ambiente de estos materiales secos pueden seguir diversas rutas, como lixiviación hacia aguas subterráneas, polvo transportado por el viento, absorción en los cultivos o ingesta directa de seres humanos o animales silvestres (potencialmente, incluso, animales de granja). Todas las actividades de gestión de estos materiales deben tomar en cuenta estas liberaciones potenciales, en función de cada residuo particular. Para estos residuos secos existen diversas opciones de gestión, que pueden ser tanto de reutilización con fines de ganancia como de tratamiento o eliminación, según sean las propiedades de la fracción inerte y el tipo y nivel de contaminación con metales y compuestos orgánicos.

2.1.1 Reutilización de residuos

Hay pocas posibilidades de reutilización de residuos sólidos o secos.

Por sus propiedades puzolánicas las cenizas volantes de carbón se reutilizan principalmente en la construcción de carreteras o edificios. Se pueden utilizar en la producción de cemento y hormigón.

Las cenizas volantes nunca deben utilizarse para el mejoramiento del suelo en prácticas agrícolas o prácticas similares. Su adición al suelo puede provocar la dispersión tanto de las mismas cenizas como de cualquier otro contaminante. En usos agrícolas, las plantas pueden absorber los contaminantes y, con esto, los seres humanos o los animales que las consumen podrían quedar expuestos. Al picotear o pastar, los animales pueden ingerir directamente estos contaminantes y exponer así a los seres humanos cuando consumen estos animales o sus productos (ej., leche y huevo).

2.1.2 Estabilización y solidificación

Una de las opciones para tratar y eliminar los residuos sólidos derivados del control de gases de combustión es la solidificación o estabilización con cemento Portland (u otros materiales puzolánicos), por sí solo o con aditivos o diversos tratamientos térmicos, seguidas de una eliminación adecuada (según las liberaciones previstas de los residuos tratados). Es posible que algunos residuos con bajos niveles de contaminación no requieran tratamiento antes de su eliminación en rellenos sanitarios; la decisión se basará en una evaluación de su potencial de liberación de contaminantes.

El propósito principal de la solidificación es producir un material con propiedades físicas y mecánicas que propicien una reducción de la liberación de contaminantes de la matriz de residuos. Si se agrega cemento, por ejemplo, se puede reducir la conductividad hidráulica y porosidad del residuo, y al mismo tiempo incrementar su durabilidad, fuerza y volumen.

Los métodos de solidificación suelen emplear varios agregantes, principalmente inorgánicos: cemento, cal y otros materiales puzolánicos como las cenizas volantes de carbón, cenizas residuales de altos hornos o polvo de hornos de cemento, aunque también pueden emplearse algunos aglomerantes orgánicos como bitumen/asfalto o parafina y polietileno. También se usan combinaciones de aglomerantes y diversos tipos de aditivos patentados y no patentados. La estabilización con cemento es, por mucho, la técnica de solidificación más utilizada.

El propósito principal de la estabilización química es aglomerar los metales pesados en formas más insolubles que las que presentan en los residuos originales no tratados. Estos métodos de estabilización usan tanto la precipitación de los metales en nuevos minerales, la aglomeración de los metales con minerales por sorción. Este proceso consiste en la solubilización de los metales pesados en los residuos y la posterior precipitación, o sorción, en minerales nuevos.

Varios de los métodos de estabilización incluyen una etapa inicial de lavado en la que una parte importante de sales solubles y, hasta cierto punto, metales, son extraídos antes de la aglomeración química de los metales restantes. Estos métodos concluyen con la desecación del producto estabilizado.

Las opciones de tratamiento que emplean procesos de extracción y separación pueden, en principio, abarcar todos los tipos de procesos para extraer componentes específicos de los residuos. Sin embargo, toda la atención se ha concentrado en los procesos que implican la extracción de metales pesados y sales con ácido.

Si bien suelen emplearse para controlar la liberación de metales contaminantes, los métodos de estabilización y solidificación para el tratamiento de residuos pueden controlar sólo de manera parcial los PCDD/PCDF y otros hidrocarburos aromáticos policíclicos (aunque estos compuestos son muy hidrofóbicos y por lo regular no se lixivian rápidamente o lo hacen en concentraciones muy elevadas). La adición de adsorbentes (como arcillas o carbón activado), que luego se incorporan a la matriz de desechos tratada, puede mejorar el control de estos compuestos orgánicos. Se deberían realizar pruebas de lixiviación en laboratorios u otras evaluaciones para determinar la efectividad de cada una de estas técnicas de tratamiento.

2.2 Tratamiento térmico de residuos del tratamiento de gases de combustión

Los procesos de tratamiento térmico pueden dividirse en tres categorías: vitrificación, fusión y sinterización. Las diferencias entre estos procesos tienen que ver sobre todo con las características y propiedades del producto final.

- La **vitrificación** es un proceso por el que los residuos se tratan a altas temperaturas (actualmente de 1,300°C y 1,500°C) y luego se enfrían bruscamente (con aire o agua) a fin de obtener una matriz vítrea amorfa. Un vez enfriada, la sustancia derretida forma un producto de una sola fase que se conoce como vitrificado. El vitrificado puede ser un producto de apariencia vítrea o pétreo, según la composición del fundido. A veces (no habitualmente) se agregan aditivos a los residuos para favorecer la formación de la matriz vítrea.
- La **fusión** es similar a la vitrificación pero el procedimiento de enfriamiento brusco se controla para que el material fundido pueda cristalizarse lo más posible. El resultado es un producto multifásico. Las temperaturas y las posibles separaciones de fases metálicas específicas son similares a las del vitrificado. También se pueden agregar aditivos específicos para favorecer la cristalización de la matriz.

- La **sinterización** consiste en calentar los residuos hasta un punto en que se pegan las partículas unas con otras y se reconfiguran las fases químicas en los residuos. Esto genera un producto más denso, menos poroso y más resistente. Las temperaturas habituales se sitúan en torno a los 900°C. Cuando se incineran los desechos sólidos urbanos se produce normalmente cierto nivel de sinterización en el horno, sobre todo si se utiliza un horno rotatorio en el proceso de incineración.

Independientemente del proceso que se emplee, el tratamiento térmico de residuos produce en la mayoría de los casos un producto más homogéneo y denso, con mejores propiedades de lixiviación. Las exigencias energéticas de este tipo de tratamientos que se aplican por sí solos suelen ser muy altas.

Estos procesos suelen emplearse para inmovilizar metales o contaminantes radiológicos, y disminuyen considerablemente el potencial de lixiviación de muchos contaminantes que pueden encontrarse en los residuos sólidos derivados del tratamiento de gases de combustión. Nuevamente, las pruebas de lixiviación pueden ayudar a evaluar la efectividad de estos tratamientos. Tratándose de procesos a alta temperatura, puede que se destruya cualquier PCDD/PCDF o hidrocarburo aromático policíclico adsorbido en los sólidos secos originales como parte del proceso de tratamiento. Sin embargo, al ser procesos a altas temperaturas, se deben monitorear las emisiones al aire del propio tratamiento, pues pueden convertirse a su vez en residuos del control de la contaminación atmosférica, que entonces tendrán que ser tratados en condiciones ambientalmente racionales.

2.3 Tratamiento de resinas utilizadas en la adsorción en seco

El uso de resinas secas especiales para eliminar contaminantes de los gases de combustión como PCDD/PCDF antes de liberarlos en el aire también genera un residuo de resina, sea en forma de cartuchos usados, sea como material suelto. Si las resinas van a ser regeneradas, por desorción térmica o por otros medios, el proceso de regeneración producirá a su vez residuos o liberaciones en el aire que deben ser controlados y gestionados. Si las resinas usadas se eliminan después de un único uso (o si se trata de resinas regeneradas que ya no son útiles), una evaluación del nivel y tipo de contaminantes que contienen ayudará a determinar si pueden ser depositadas en rellenos sin tratamiento, o bien si requieren algún tratamiento antes de su eliminación. Para ciertas resinas, también se puede recurrir a la incineración o algún otro tratamiento que destruya tanto la resina como los contaminantes adsorbidos.

2.4 Tratamiento de aguas residuales

Muchos procesos producen efluentes de aguas residuales que, sin tratamiento, no deberían ser liberados en el medio ambiente. Los sistemas de tratamiento de gases de combustión se asemejan a los procesos químicos en la medida en que todos pueden requerir tratamiento de aguas residuales.

También se pueden aplicar diversos procesos en húmedo para eliminar contaminantes de corrientes de gases de combustión y así prevenir su liberación en el aire. Las aguas residuales resultantes contendrán cierta cantidad de materiales disueltos y suspendidos.

Como sucede con muchos procesos químicos, el primer paso en el manejo de estos residuos del tratamiento de gases de combustión, sobre todo en aquéllos en los que los metales son la principal preocupación, suele consistir en separar las porciones líquida y sólida. Se suelen separar en estanques o tanques de decantación, aunque, en el caso de los estanques, por estar en contacto con el suelo, habrá que revestirlos para evitar la lixiviación de contaminantes a las aguas superficiales. Se puede extraer más humedad de la fracción sólida, secarla y luego tratarla como un material sólido, como ya se ha explicado. La porción de agua puede requerir una eliminación más a fondo de contaminantes para cumplir con los requisitos de descarga a las zonas de recarga de aguas superficiales o subterráneas. Como tratamiento se podría añadir productos químicos para precipitar sales metálicas o emplear materiales adsorbentes para eliminar residuos orgánicos. Entonces, estos residuos del tratamiento de aguas residuales también requerirían un tratamiento y eliminación adecuados.

Los residuos del tratamiento de gases de combustión generados por procesos en húmedo también pueden contener material orgánico, entre ellos PCDD/PCDF u otros hidrocarburos aromáticos policíclicos. El tratamiento biológico en estanques o depósitos pueden reducir la concentración de éstos y otros componentes orgánicos que puedan presentarse en los residuos del tratamiento de gases de combustión.

La mayoría de las aguas residuales no ofrecen la posibilidad de ser reutilizadas. Sin embargo, el tratamiento de gases de combustión para eliminar azufre, utilizando cal apagada o hidratada, constituye una de estas escasas posibilidades. Cuando se emplea la oxidización total en este tratamiento, el residuo sólido en las aguas residuales es un sulfato de calcio de gran calidad, o yeso. Este yeso puede ser desecado y utilizado para fabricar paneles de tablaroca para la construcción, a veces a un precio mucho más bajo que el de los paneles hechos con yeso natural.

(v) Capacitación de los responsables de la toma de decisiones y el personal técnico

En el preámbulo del Convenio de Estocolmo se reconoce la importancia de la asistencia técnica, en particular la capacitación, necesaria para reforzar las capacidades nacionales de los países en desarrollo (en especial los menos desarrollados) y países con economías en transición. De igual modo, el artículo 12 estipula que “las Partes reconocen que la prestación de asistencia técnica oportuna y adecuada en respuesta a las solicitudes de las Partes que son países en desarrollo y las Partes que son países con economías en transición es esencial para la aplicación de efectiva del presente Convenio”.

A este respecto, la asistencia técnica para creación de capacidad, en particular la capacitación en metodologías, prácticas y herramientas ambientales disponibles, en función de las necesidades particulares de cada Parte, debe proporcionar una mejor comprensión de los procedimientos para realizar, de manera sostenida, prácticas operativas diarias y mantenimiento preventivo de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales que se introduzcan como elementos del plan de acción nacional de sus respectivos planes. Es de vital importancia que la asistencia técnica para la creación de capacidad, en particular la capacitación, se brinde tanto en los niveles

directivos como en los técnicos u operativos, en las organizaciones públicas y del sector privado que participen en la aplicación de las directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales. Teniendo en cuenta la complejidad de muchas mejores técnicas disponibles y la perspectiva integral y preventiva requerida para la introducción de mejores prácticas ambientales, en la creación de capacidad se debe considerar de manera prioritaria la gestión del ciclo de vida, además de las cuestiones pertinentes sobre salud y seguridad, con un enfoque basado en la prevención y reducción de los riesgos.

(vi) Pruebas de laboratorio, monitoreo y registro

1. Pruebas de laboratorio y monitoreo

La vigilancia de las liberaciones de las sustancias incluidas en el Anexo C del Convenio de Estocolmo es crucial para el logro de los objetivos del Convenio. Sin embargo, muchos países en desarrollo y países con economías en transición no tienen la capacidad necesaria en cuanto a costos, experiencia técnica y laboratorios y, en algunos casos, los beneficios de las plantas pueden ser insuficientes para cubrir todos los costos que implica el monitoreo. Por consiguiente, es necesario establecer y fortalecer la capacidad y experiencia técnica regional, subregional y nacional, en particular en los laboratorios. Mejorar esta capacidad también puede propiciar el monitoreo de fuentes existentes a intervalos determinados.

Las propuestas de instalaciones nuevas o propuestas para realizar modificaciones importantes a las instalaciones existentes deberían, como parte de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales, incluir planes para la evaluación del cumplimiento de los valores establecidos para las liberaciones de las sustancias del Anexo C provenientes de gases de chimeneas y otras fuentes que se mencionan en las presentes directrices. Por consiguiente, como parte de sus operaciones permanentes, estas instalaciones deberían demostrar, mediante monitoreo a intervalos específicos, y cuando proceda, que los niveles de desempeño se siguen respetando.^{31 32}

1.1 Muestreo y análisis de PCDD/PCDF y PCB similares a las dioxinas

Existen métodos validados y normalizados de muestreo y análisis de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) pero todavía no para todas las sustancias incluidas en el Anexo C (Tabla 4). Es preciso crear y validar métodos de muestreo y vigilancia de bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB). Hay métodos de muestreo de gases de chimenea que prevén períodos de muestreo de 4 a 8 horas, así como métodos de muestreo casi continuo. La mayoría de los regímenes reglamentarios para PCDD/PCD, si no todos, se basan en equivalentes tóxicos (EQT).³³

A la fecha, el muestreo de emisiones de PCDD/PCDF se realiza principalmente con alguno de los métodos que figuran en la Tabla 4.

■ Tabla 4: Métodos de muestreo y análisis de PCDD/PCDF y PCB en gases de chimenea

Método	Sustancias analizadas	Principio analítico	Referencia
EN 1948	PCDD/PCDF	HRGC/HRMS	Comité Europeo de Normalización
Método 23 de la US EPA	PCDD/PCDF	HRGC/HRMS	Organismo de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
Método VDI 3499	PCDD/PCDF	HRGC/HRMS	Asociación Alemana de Ingenieros (VDI)
Métodos EPS 1/RM/2 y EPS 1/RM/3 de Canadá	PCDD/PCDF, PCB	HRGC/HRMS	Ministerio de Medio Ambiente de Canadá (Environment Canada)
Norma Industrial de Japón K 0311	PCDD/PCDF, PCB similares a las dioxinas	HRGC/HRMS	Comité de Normas Industriales de Japón

El análisis de PCDD/PCDF se realiza mediante espectrometría de masas de alta resolución. En cada fase del análisis se requieren procedimientos de control de calidad y de recuperación de concentraciones adicionadas asociadas al muestreo y la extracción. El Método 23 de la EPA, de los Estados Unidos, especifica que todas las recuperaciones deberían ser de 70% a 130%. En su Método de Referencia EPS 1/RM/2, Canadá ofrece orientación detallada sobre garantía de la calidad para el análisis de muestras que contienen dioxinas y furanos en diversas matrices.

Se ha elaborado la Norma Europea EN 1948 para la separación, detección y cuantificación de PCDD/PCDF y PCB similares a dioxinas en muestras de emisiones de fuentes fijas, con concentraciones aproximadas de 0.1 ng EQT/Nm³. En las partes 1-3 se explica el muestreo, extracción y limpieza, e identificación y cuantificación de PCDD/PCDF (adoptada en 1996; versión revisada adoptada en 2006). En la parte 4 se presenta la norma para PCB similares a las dioxinas (adoptada en 2007).

Los límites de detección más bajos medidos durante la prueba de validación de la EN 1948 en un incinerador de desechos sólidos urbanos fueron de 0.0001 a 0.0088 ng/Nm³ para cada uno de los 17 congéneres tóxicos de PCDD/PCDF (CEN 1996c. Ver también CEN 1996a, 1996b).

En el Anexo B de la nueva versión de la EN 1948-3, de febrero de 2004 (actualización CEN 1996c), la incerteza para el procedimiento completo se calcula de 30% a 35%, y la variabilidad externa se estima en ± 0.05 ng EQT-l/m³, con una concentración media de 0.035 ng EQT-l/Nm³.

Tomando en cuenta los factores de equivalencia de toxicidad para congéneres específicos, los límites de detección general resultantes varían entre 0.001 y 0.004 ng

EQT-I/Nm³. Cabe asumir que las concentraciones inferiores a 0.001 ng EQT-I/m³ deberían ser consideradas como inferiores al límite de detección.

En un estudio realizado por el ministerio de medio ambiente canadiense se evaluó la variabilidad del muestreo y análisis de 53 conjuntos de datos de emisiones de PCDD/PCDF de 36 instalaciones de combustión. El límite de cuantificación para emisiones de PCDD/PCDF se estimó en 0.032 ng EQT-I/m³, aunque podría variar según el volumen de muestreo, las sustancias interferentes, y otros factores.

Cabe esperar que haya interferencias de compuestos que tienen propiedades químicas y físicas similares a las de los PCDD/PCDF (CEN 1996c).

1.2 Límite de detección y límite de cuantificación

El "límite de detección" (LD) es la cantidad más pequeña o concentración de analito en la muestra de prueba que puede distinguirse con fiabilidad, y con significancia declarada, del fondo o nivel de blanco.

El "límite de cuantificación" (LC) de un procedimiento analítico es la cantidad más baja o concentración de analito en una muestra que puede determinarse cuantitativamente con un nivel de precisión y fiabilidad aceptables. El límite de cuantificación debería determinarse si es necesario especificar un límite de medición más bajo por debajo del cual no se alcanzan una precisión y fiabilidad aceptables. Utilizando el método, háganse varias determinaciones independientes, de preferencia >20, empleando una muestra cuyo analito se sabe que equivale a 2 o 5 veces el límite de detección estimada. El límite de cuantificación es la concentración a la que se obtiene un nivel aceptable de desempeño, en términos de porcentaje de RSD (desviación relativa estándar). Suele suceder que el límite de cuantificación corresponda al nivel de concentración estándar más bajo en el rango de calibración.

En el contexto de los valores límites de reglamentación, o para registrar las concentraciones medidas, no existe una regla general sobre cómo tratar los resultados inferiores al LC. Muy a menudo, en las normativas o leyes se define la forma en que deben registrarse los resultados. Para efectuar el registro, deberán tomarse en cuenta las siguientes definiciones:

- Límite inferior: Los picos no cuantificables se fijan en cero
- Límite superior: El LC completo se incluye en la presentación de resultados

Se deberían establecer criterios para definir concentraciones inferiores y superiores límite, así como el valor de registro y, por lo tanto, el LC debería ser de por lo menos 1/5 del límite reglamentario o nivel de interés o concentración de referencia.

1.3 Condiciones de referencia de gases

La Tabla 5 presenta las conversiones de condiciones de referencia utilizadas en Canadá, los Estados Unidos de Norteamérica y la Unión Europea.

■ **Tabla 5: Conversiones de condiciones de referencia**

Unidad	País/Región	Temperatura (°C)	Presión (atm)	Condiciones de los gases
Nm³ (Metro cúbico normal)	Unión Europea (UE)	0	1	Secos; 11% de oxígeno para incineradores de desechos urbanos y co-combustión de desechos; 10% de oxígeno para plantas de cemento; sin requisitos de nivel de oxígeno para todas las demás plantas (es decir, las concentraciones se registran según el contenido real de oxígeno y no son homologadas a ningún contenido fijo de O ₂)
Rm³ (Metro cúbico de referencia)	Canadá	25	1	Secos; 11% de oxígeno para incineradores y calderas de fábricas de pulpa y papel costeras, niveles de oxígeno de operación para plantas de sinterización y hornos eléctricos de arco para producción de acero.
Sm³ (o mcss) (Metro cúbico seco estándar)	Estados Unidos (EE.UU.)	20	1	Secos; 7% de oxígeno o 12% de dióxido de carbono para incineradores y casi todas las fuentes de combustión.

0.1 ng EQT/Nm³ (UE) = **0.131** ng EQT/Sm³ (EE.UU.) = **0.092** ng EQT/Rm³ (Canadá)

1.4 Métodos de bioensayo

En Japón se han aprobado cuatro métodos de bioensayo –tres métodos de gen indicador y un método de inmunoensayo de enzima– para medir las dioxinas en la emisión de gases, polvo y cenizas provenientes de incineradores de desechos. Los métodos constituyen una alternativa más económica que la espectrometría de masa/cromatografía de gases de alta resolución y han sido aprobados para la medición de emisiones de incineradores con una capacidad inferior a 2 toneladas/hora (normas de emisión para nuevas instalaciones: 5 ng EQT-OMS/Nm³) y polvo y cenizas de todos los incineradores de desechos (norma de tratamiento de 3 ng EQT-OMS/g).

■ Tabla 6: Métodos de bioensayo para mediciones de residuos y gases de escape en pequeñas incineradoras de desechos

Método	Principio de análisis	Referencia
Ensayo CALUX	Ensayo de gen indicador	Xenobiotic Detection Systems International
Sistema de Gen Indicador Humano P450	Ensayo de gen indicador	Columbia Analytical Services
Ensayo AhR luciferasa	Ensayo de gen indicador	Sumitomo Chemical Co., Ltd

También se necesitan directrices para programas de monitoreo adecuados. A este respecto, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2004) ha preparado una orientación general para jerarquizar las mediciones y reducir el número de mediciones para las evaluaciones de impacto. La Comisión Europea ha elaborado un documento de referencia sobre los principios generales de monitoreo, y algunas empresas y asociaciones empresariales han acordado requisitos al respecto. Una legislación y normatividad modelo también facilitarán el establecimiento y aplicación de programas para monitorear las liberaciones de las sustancias del Anexo C, incluidos los métodos como el de monitoreo con ensayos biológicos.

2. Registro

El registro de liberaciones y otros datos pertinentes es un elemento esencial en el cumplimiento de las obligaciones de las Partes en virtud de los artículos 9 (Intercambio de información), 10 (Información, sensibilización y formación del público) y 11 (Investigación, desarrollo y vigilancia) del Convenio de Estocolmo. Las Partes que deseen emplear mejores prácticas ambientales para las fuentes del Anexo C deberían aplicar las medidas descritas en estos artículos, que comprenden:

- Mecanismos como registros de emisión y transferencia de contaminantes para recopilar registros y divulgar información química específica y exhaustiva sobre la producción y liberación de las sustancias incluidas en los Anexos A, B o C, así como sobre sus fuentes
- Participación pública en la reglamentación de fuentes de sustancias químicas del Anexo C
- Acceso público a datos de vigilancia recolectados de fuentes que figuran en el Anexo C (tomando en cuenta el párrafo 5 del artículo 9)
- Hacer accesible al público en forma oportuna y regular los resultados de sus investigaciones y actividades de desarrollo y vigilancia (artículo 11, párrafo 2 (e))

Dar a conocer información completa y pertinente puede fomentar y propiciar la participación pública.

Referencias

Andersson S. 2005. "PCDD/F Removal from Gases Using a Dry Adiox Absorber." *Organohalogen Compd.* 67:2226–2229.

Association of German Engineers (VDI). 2003–2004. Emission measurement - Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs) and dibenzofurans (PCDFs) - Dilution method; Example of application of DIN EN 1948 for the concentration range 0,1 ng I-TEQ/m³ and supplement to DIN EN 194.

Basel Convention Secretariat. 2007. Updated *General Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants (POPs)*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Ginebra.

CEN (European Committee for Standardization). 1996a. "EN 1948-1: Sampling." Part 1 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN (European Committee for Standardization). 1996b. "EN 1948-2: Extraction and Clean-up." Part 2 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN (European Committee for Standardization). 1996c. "EN 1948-3: Identification and Quantification." Part 3 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

Environment Canada, Standard Reference Methods for Source Testing: Measurement of Releases of Selected Semi-volatile Organic Compounds from Stationary Sources, Department of the Environment Report EPS 1/RM/2 1989

Environment Canada, A Method for the Analysis of Polychlorinated Dibenzo-Para-Dioxins (PCDD), Polychlorinated Dibenzofurans (PCDF) and Polychlorinated Biphenyls (PCB) in Samples from the Incineration of PCB Waste, Department of the Environment, Report EPS 1/RM/3, junio de 1989

European Commission. 2005. *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*. BAT Reference Document (BREF), Final Draft, July 2005. European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm.

Hartenstein H.U. 2003. "Dioxin and Furan Reduction Technologies for Combustion and Industrial Thermal Process Facilities." In: *The Handbook of Environmental Chemistry* Vol. 3, Part O: *Persistent Organic Pollutants* (ed. H. Fiedler). Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.

Hübner C., Boos R., Bohlmann J., Burtscher K. and Wiesenberger H. 2000. *State-of-the-Art Measures for Dioxin Reduction in Austria*. Viena.
www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M116.pdf

UNEP (2004): Guidance for a Global Monitoring Programme for Persistent Organic Pollutants, 1a edición, junio de 2004. <http://www.chem.unep.ch/gmn/GuidanceGPM.pdf>

Xu Z., Wedman E., Bucher R., Petzoldt O., Sasamoto T. and Wilkin M. 2003. "Removal and Destruction of PCDD/F from Crematories by REMEDIA TM Catalytic Filter System." *Organohalogen Compd.* 63:216–219.

- ¹¹ World Commission on Environment and Development. 1987. www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm.
- ¹² UNEP (United Nations Environment Programme). 1994. Oslo Symposium: Sustainable Consumption. Oslo, Noruega, Enero de 1994. www.iisd.org/susprod/principles.htm.
- ¹³ UNEP (United Nations Environment Programme). 2002. Environmental Impact Assessment Training Resource Manual. Página 558. www.iaia.org/Non_Members/EIA/ManualContents/Vol1_EIA_Manual.pdf.
- ¹⁴ UN DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs) 2002 Plan of Implementation of the World Summit on Sustainable Development, pag 50. http://www.un.org/esa/sustdev/documents/WSSD_POI_PD/English/WSSD_PlanImpl.pdf
- ¹⁵ UNEP (United Nations Environment Programme). 1992. Rio Declaration on Environment and Development. Principle 15. Río de Janeiro, Brasil, 1992. www.unep.org/Documents/Default.asp?DocumentID=78&ArticleID=1163.
- ¹⁶ Preámbulo del Convenio de Estocolmo y Principio 16 de la Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
- ¹⁷ Environment Canada. 1995. Pollution Prevention – A Federal Strategy for Action. www.ec.gc.ca/cppic/aboutp2/en/glossary.cfm.
- ¹⁸ European Commission. 1996. Integrated Pollution Prevention and Control Directive. 96/61/EC. europa.eu.int/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexapi!prod!CELEXnumdoc&lg=EN&numdoc=31996L0061&model=guichet.
- ¹⁹ UNEPTIE. www.uneptie.org/pc/cp/understanding_cp/home.htm.
- ²⁰ European Environment Agency. glossary.eea.eu.int/EEAGlossary.
- ²¹ UNEPTIE. www.uneptie.org/pc/sustain/reports/lcini/lc-initiative-barcelona-workshop.pdf.
- ²² Environment Canada. 1999. Canadian Environmental Protection Act, 1999. Section 65. www.ec.gc.ca/CEPARRegistry/the_act/.
- ²³ Aarhus Convention on Access to Information, Public Participation in Decision Making and Access to Justice in Environmental Matters, United Nations Economic Commission for Europe, www.unece.org/env/pp
- ²⁴ Los PCDD/PCDF también pueden ser considerados como contaminantes en materias primas o desechos y, por consiguiente, pueden figurar en procesos en los que no se da formación de PCDD/PCDF.
- ²⁵ Información recopilada de Srishti (Nueva Delhi, India): <http://www.toxiclink.org/ovrww-prog.php?prognum=1> y *Safe Management of Bio-Medical Sharps Waste in India*, SEA-EH-548, World Health Organization South-East Asia Regional Office, 2005.
- ²⁶ Los controles de combustión y otros factores que inciden en la formación y liberación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo antes de la formación de gases de combustión se describen en los respectivos apartados por sector de la orientación general (secciones V y VI).
- ²⁷ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para más información sobre registro de resultados de PCDD/PCDF, véase la sección I..C, subsección 3, de las presentes directrices.
- ²⁸ 1 μm (micrometro) = 1×10^{-6} metro.

- ²⁹ Para orientación complementaria sobre gestión de residuos según su concentración de contaminantes orgánicos persistentes (incluso cuando el contenido de contaminante orgánico persistente es bajo, según el artículo 6.1 d) ii) del Convenio de Estocolmo), véase Basel Convention Secretariat 2005.
- ³⁰ Los incisos del párrafo 2 han sido extraídos de European Commission 2005, capítulo 2.7.3.
- ³¹ La determinación de la concentración de masa de las sustancias del anexo C en liberaciones de una fuente dada debería basarse en métodos normalizados de muestreo, análisis y evaluación del cumplimiento reconocidos a nivel nacional o internacional.
- ³² Actualmente, en la mayoría de los casos sólo existen valores establecidos para los PCDD/PCDF.
- ³³ Para determinar las concentraciones del FET, se cuantifica cada uno de los 17 congéneres de PCDD/PCDF que son objeto de mayor preocupación a causa de su toxicidad por medio de cromatógrafo de gases capilar de alta resolución/ espectrómetro de masas.

Sección IV

Resúmenes de las categorías de fuentes que figuran
en las secciones V y VI

Preámbulo

Esta sección contiene una compilación de todos los resúmenes de las categorías de fuentes que se presentan en las secciones V y VI del proyecto de directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme a lo dispuesto en el artículo 5 y en el Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes.

Todos los resúmenes contienen, conforme proceda, la siguiente información:

- Una breve descripción de la fuente, su finalidad y procesos que implica
- El potencial de la fuente para generar las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, a saber: dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF, bifenilos policlorados (PCB), y hexaclorobenceno (HCB)
- Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para disminuir las emisiones de las sustancias del Anexo C
- Medidas primarias y secundarias que pueden ayudar a reducir las emisiones
- Alternativas, de haberlas, que sean preferibles a los procesos y prácticas actuales
- Niveles de desempeño asociados a las mejores técnicas disponibles

Resúmenes de la sección V: categorías de fuentes incluidas en la parte II del Anexo C

A. Incineradoras de desechos

(i) Desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado

Resumen

En el Convenio de Estocolmo se señala a las incineradoras de desechos como industrias con un potencial de formación y liberación con un potencial relativamente alto de sustancias que figuran en el Anexo C.

Los objetivos previstos de la incineración son la reducción del volumen de los desechos, recuperación de energía, destrucción o, al menos, disminución, de componentes peligrosos, desinfección y recuperación de algunos residuos.

Al considerar propuestas para construir nuevas incineradoras de desechos, debería darse prioridad a alternativas como las actividades para disminuir la generación de desechos, en particular la recuperación y reutilización de recursos, reciclaje, separación de desechos y promoción de productos que generen menos desechos. También debería

darse prioridad a los métodos que prevengan la formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes.

Para lograr un diseño y funcionamiento de incineradoras de desechos ambientalmente racional se requiere a la vez el uso de mejores técnicas disponibles y de mejores prácticas ambientales (que son, hasta cierto punto, coincidentes), que permitan evitar o disminuir la formación y liberación de las sustancias que figuran en el Anexo C.

Las mejores prácticas ambientales para incineración de desechos comprenden procedimientos *ex situ* (como la gestión integral de desechos y el estudio de las repercusiones ambientales del emplazamiento) y procedimientos *in situ* (como la inspección de desechos, manipulación de desechos, funcionamiento de incineradores y prácticas de gestión y manipulación de residuos adecuadas).

Las mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos son la selección apropiada del sitio, ingreso y control de desechos, técnicas de combustión, tratamiento de gases de combustión, residuos sólidos y efluentes.

Para obtener los mejores resultados para la protección integral del medio ambiente es esencial coordinar el proceso de incineración de desechos con las etapas anteriores (ej., técnicas de gestión de desechos) y las etapas posteriores (ej., eliminación de residuos sólidos derivados de la incineración de desechos).

Las liberaciones de las sustancias del Anexo C provenientes de las incineradoras de desechos sólidos urbanos concebidas y operadas según las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales se generan principalmente por cenizas volantes, cenizas de fondo y tortas de filtro del tratamiento de aguas residuales. Por ello es de suma importancia prever el depósito de estos tipos de desechos en condiciones de seguridad, con un pretratamiento y eliminación final en rellenos sanitarios exclusivos, preparados y operados según las mejores técnicas disponibles.

Con una combinación apropiada de medidas principales y secundarias, se asocian a las mejores técnicas disponibles niveles de desempeño no superiores a 0.1 ng EQT-I Nm³ (con 11% de O₂) para PCDD/PCDF, en emisiones atmosféricas. Se ha observado además que, en condiciones normales de funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien concebida.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian con niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/l.

(ii) Desechos médicos

Resumen

La incineración de desechos médicos (desechos sanitarios infecciosos, desechos biológicos y objetos cortantes) se efectúa en plantas incineradoras de desechos exclusivas a fin de evitar al máximo los riesgos químicos, biológicos y físicos, y reducir el volumen de desechos como etapa de tratamiento previo a la expedición a rellenos sanitarios ambientalmente racionales.

Si los desechos médicos se incineran en condiciones que no constituyen mejores técnicas disponibles o mejores prácticas ambientales, las concentraciones de PCDD y PCDF emitidas pueden ser relativamente altas. En el caso de pequeñas incineradoras de desechos médicos, suele ser difícil aplicar mejores técnicas disponibles por lo elevado de los costos asociados a la construcción, funcionamiento, mantenimiento y vigilancia de estas instalaciones.

Las alternativas posibles a la incineración son la esterilización (vapor, sistemas mejorados, calor seco), el tratamiento por microondas, la hidrólisis alcalina, el tratamiento biológico o, en ciertos casos, el vertido en rellenos sanitarios. El paso más importante en la gestión de desechos médicos consiste en separar los distintos tipos de desechos desde su origen. En vista de que de 75% a 90% de los desechos de hospitales son comparables a los desechos sólidos urbanos, la separación disminuye enormemente la cantidad de desechos médicos. Es esencial una gestión eficaz de los desechos, en particular la reducción y separación de los desechos desde su origen.

El tratamiento adecuado de cenizas de fondo y residuos generados por la depuración de gases de combustión es primordial para disminuir las liberaciones de PCDD/PCDF al medio ambiente. El uso de mejores técnicas disponibles en las incineradoras reducirá asimismo las emisiones de ácido clorhídrico y metales (en particular, mercurio) y, de hecho, también reducirá las posteriores emisiones de los residuos depositados en vertederos sanitarios.

En cuanto a la incineración, tan solo las medidas primarias reducirán ya significativamente la emisión de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Sin embargo, la aplicación de las mejores prácticas disponibles requiere medidas primarias y también secundarias.

Con una combinación apropiada de medidas primarias y secundarias, se asocian a mejores técnicas disponibles los niveles de desempeño de un máximo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (con 11% O₂) para PCDD/PCDF, en emisiones atmosféricas. Se observa además que en condiciones normales de funcionamiento se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian a niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/l.

B. Hornos de cemento que queman desechos peligrosos

Resumen

La finalidad principal de los hornos de cemento es la producción de clinker. Con la combustión de desechos en hornos de cemento se busca recuperar energía y sustituir combustibles fósiles o minerales. En algunos casos se eliminan desechos peligrosos en estas plantas.

El proceso de fabricación comprende la descomposición de carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C aproximadamente para obtener óxido de calcio (CaO , cal) (calcinación), seguida de un proceso de clinkerización a unos 1450°C , en horno rotatorio. A continuación, se muele el clinker junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. Según las condiciones físicas y químicas, los principales procesos de fabricación de cemento se conocen como proceso seco, húmedo, semisecho y semihúmedo.

El proceso de combustión en el horno tiene el potencial de producir y luego liberar sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. Además, se pueden producir liberaciones en los lugares de almacenamiento.

Un buen diseño de las condiciones del proceso, así como la aplicación de medidas primordiales adecuadas, debería permitir que los hornos de cemento que incineran desechos peligrosos funcionen de manera tal que la formación y liberación de sustancias del Anexo C ser lo bastante reducidas para lograr concentraciones de PCDD y PCDF en gases de combustión de $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (10% de contenido de oxígeno), dependiendo de factores como el uso de combustibles limpios, alimentación de desechos, temperatura y eliminación de polvo. Cuando sea necesario, deberían aplicarse medidas secundarias adicionales para reducir las emisiones.

Se cuenta con muchos datos sobre las emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF.

Se han registrado liberaciones de PCDD/PCDF provenientes del polvo de hornos de cemento y, posiblemente, del clinker, que se siguen investigando. Los datos sobre liberaciones de PCB y HCB todavía son escasos.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión son $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 10% de O_2 y gas seco.

C. Producción de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que producen cloro elemental

Resumen

Los procesos principales de la fabricación de productos de papel y pasta de papel son el manejo y la preparación de materias primas, almacenamiento (y la conservación de materiales no madereros), descortezado de madera, astillado y limpieza de residuos agrícolas, eliminación de nudos, elaboración de pasta, procesamiento y blanqueo de la pasta, si es necesario y, finalmente, la fabricación de papel o cartón.

Se ha determinado que, de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, sólo se generan PCDD y PCDF durante la producción de pasta de papel a base de cloro elemental. De los 17 congéneres de PCDD/PCDF con cloro en las posiciones 2,3,7 y 8, sólo dos congéneres, a saber 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF, se han identificado como posiblemente producidos durante el blanqueo químico de pasta de papel a base de cloro. La mayor parte de la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF

ocurre en la etapa C del blanqueo por la reacción del cloro con precursores de TCDD y TCDF. No se forman HCB ni PCB durante el blanqueo de la pasta de papel.

En resumen, pueden tomarse las siguientes medidas primarias para disminuir o eliminar la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF durante los procesos de blanqueo de materiales madereros y no madereros: eliminar el cloro elemental reemplazándolo por dióxido de cloro (blanqueo libre de cloro elemental) o, en algunos casos, por procesos totalmente libres de cloro, reducir la utilización de cloro elemental disminuyendo el múltiplo de cloro o aumentando la sustitución de dióxido de cloro por cloro molecular, disminuir los precursores como dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos que ingresan en la planta de blanqueo usando aditivos libres de precursores y un lavado intensivo, aumentar la eliminación de nudos, y eliminar la elaboración de pulpa con materiales contaminados con fenoles policlorados.

D. Procesos térmicos de la industria metalúrgica

(i) Producción secundaria de cobre

Resumen

La fundición secundaria de cobre consiste en la producción de cobre a partir de fuentes como chatarra de cobre, sedimentos, chatarra de computadores y aparatos electrónicos, y escorias de refineras. Los procesos que implica la producción de cobre son el pretratamiento del material, fundición, aleación y vaciado. La presencia de metales catalizadores (y el cobre es uno de los más efectivos), los materiales orgánicos que pueden encontrarse en los aceites, plásticos y revestimientos alimentados, la combustión incompleta del combustible y las temperaturas entre 250°C y 500°C son factores que pueden generar las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Son mejores técnicas disponibles la clasificación previa, limpieza de los materiales de alimentación, mantener las temperaturas por encima de 850°C, utilización de cámaras de postcombustión con enfriamiento brusco, adsorción por carbón activado y desempolvamiento mediante filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de PCDD/PCDF en materia de emisiones atmosféricas para plantas de fundición secundaria de cobre son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operacionales de oxígeno).

(ii) Plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero

Resumen

Las plantas de sinterización en la industria siderúrgica son un paso de pretratamiento en la producción de hierro en el que se aglomeran por combustión partículas finas de minerales de hierro y, en algunas plantas, desechos de óxido de hierro secundario (polvo capturado, cascarilla de laminación). La sinterización consiste en el calentamiento de mineral de hierro fino con fundente y finos de coque o carbón para producir una masa

semifundida que se solidifica en piezas porosas de sinterizado con las características de tamaño y fuerza necesarias para servir de alimento de alto horno.

Las sustancias que figuran en el Anexo C parecen formarse en el proceso de sinterización del hierro principalmente por síntesis *de novo*. Por lo general, son los PCDF los que predominan en los gases residuales de las plantas de sinterización. Al parecer, el mecanismo de formación de PCDD/PCDF comienza en las zonas superiores del lecho de sinterizado poco después del encendido, y luego las dioxinas, furanos y otros compuestos se condensan en la carga subyacente, que es más fría, a medida que la capa de sinter avanza por la banda hacia el punto de penetración por quemado.

Entre las medidas primarias determinadas para prevenir o disminuir la formación de PCDD/PCDF durante la sinterización de hierro se encuentran el funcionamiento estable y uniforme de la planta de sinterización, vigilancia continua de parámetros, recirculación de gases residuales, disminución de los materiales de alimentación que contienen contaminantes orgánicos persistentes o contaminantes que ayudan a su formación, y preparación del material de alimentación.

Las medidas secundarias determinadas para controlar o reducir las liberaciones de PCDD/PCDF de la sinterización de hierro son adsorción/absorción (por ejemplo, inyección de carbón activado), supresión de la formación por medio de adición de urea, desempolvamiento de alta eficiencia, limpieza minuciosa de los gases residuales mediante depuradores húmedos en combinación con tratamiento efectivo de las aguas residuales del depurador, y eliminación de fangos residuales en rellenos sanitarios seguros.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF, para una planta de sinterización de hierro son $<0.2 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

(iii) Producción secundaria de aluminio

Resumen

La fundición secundaria de aluminio consiste en la producción de aluminio a partir de productos de aluminio usados o de desechos de procesos, para recuperar los metales mediante pretratamiento, fundición y refinación.

Se utilizan combustibles, fundentes y aleaciones, mientras que el magnesio se elimina agregando cloro, cloruro de aluminio o sustancias orgánicas cloradas. Las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo se generan probablemente a partir de sustancias añadidas para eliminar el magnesio, por combustión incompleta, sustancias orgánicas en el alimento, compuestos clorados, y por formación en el sistema a temperaturas entre 250°C y 500°C.

Como mejores técnicas disponibles están los hornos avanzados de alta temperatura, alimentación libre de aceite y cloro (si hay opción), cámaras de postcombustión con enfriamiento rápido, adsorción con carbón activado y filtros de tela para

desempolvamiento, así como evitar el uso de hexacloroetano para eliminar el magnesio de la fundición y, en general, ejercer un control cuidadoso sobre este proceso.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF, para las fundidoras secundarias de aluminio son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

(iv) Producción secundaria de zinc

Resumen

La fundición secundaria de zinc consiste en la producción de zinc a partir de materiales como los polvos provenientes de la producción de aleaciones de cobre y de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, y los residuos derivados de los procesos de fragmentación y galvanizado de la chatarra de acero.

Los procesos de producción son: preclasificación, limpieza de pretratamiento, y trituración del alimento, exudación en hornos a 364°C, fundición, refinación, destilación y aleación. Los contaminantes presentes en el alimento (incluidos aceites y plásticos), una combustión deficiente y temperaturas entre 250°C y 500°C pueden dar origen a las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Las mejores técnicas disponibles son: limpieza del alimento, conservación de temperaturas por encima de 850°C, captura de vapores y gas, cámaras de postcombustión con enfriamiento rápido, adsorción con carbón activado, y desempolvamiento con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF, para fundidoras secundarias de zinc son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Resúmenes de la sección VI: categorías de fuentes incluidas en la parte III del Anexo C

A. Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos

Resumen

La quema a cielo abierto es un proceso inaceptable en términos ambientales, que genera sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo y varios otros contaminantes, producto de combustión incompleta. De conformidad con el Anexo C, Parte V, sección A, inciso (f) del Convenio de Estocolmo, lo más recomendable es reducir

la cantidad de material que se elimina por quema a cielo abierto, con el objetivo de erradicar definitivamente este método.

Otras técnicas que pueden significar avances con respecto a la quema de materiales son: evitar materiales no combustibles, como vidrio y metales en masa, desechos húmedos y materiales de baja combustibilidad, evitar cargas de desechos con alto contenido de cloro, sean cloruros inorgánicos como la sal, sean compuestos orgánicos clorados como el PVC, y evitar materiales que contengan metales catalíticos como cobre, hierro, cromo y aluminio, incluso en cantidades pequeñas. Los materiales por quemar deberían ser secos, homogéneos o bien mezclados, y de baja densidad, como los desechos sin compactar.

Con respecto al proceso de combustión, los objetivos deberían ser: suministrar el aire suficiente, mantener una combustión o tasa de pérdida de masa estable, evitar la combustión lenta, apagando incluso directamente el fuego, y sólo hacer fuegos pequeños, bien ventilados, revolviendo los materiales, en lugar de hacerlos en vertederos grandes, mal ventilados o en contenedores.

B. Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en la Parte II del Anexo C

(i) Producción secundaria de plomo

Resumen

La fundición secundaria de plomo consiste en producir plomo y aleaciones de plomo, mayormente a partir de baterías de vehículos de chatarra, y también de otras fuentes de plomo usado (cañerías, soldaduras, escoria, revestimientos de plomo). Los procesos de producción consisten en el pretratamiento, fundición y refinación de la chatarra. Factores como la combustión incompleta, altos niveles de aceites, plásticos y otros materiales orgánicos en el alimento, y temperaturas entre 250°C y 500°C, pueden dar origen a las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Las mejores técnicas disponibles implican usar un material de alimentación que no contenga plásticos ni aceites, temperaturas por encima de 850°C en el horno, captura efectiva de los gases, cámaras de postcombustión y enfriamiento rápido, adsorción por carbón activado, y desempolvamiento con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones al aire de PCDD/PCDF para fundidoras secundarias de plomo son <0.1 ng EQT-/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

(ii) Producción primaria de aluminio

Resumen

El aluminio primario se produce directamente del mineral extraído, la bauxita. La bauxita se refina en alúmina mediante el proceso Bayer. Luego, por el proceso Hall-Héroult, la

alúmina se reduce a aluminio metálico por electrólisis (con ánodos de autococción, o ánodos Söderberg, o con ánodos precocidos).

Por lo general, la producción primaria de aluminio no se considera una fuente significativa de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. No obstante, la contaminación por PCDD y PCDF puede ocurrir por los electrodos de grafito empleados en el proceso de fundición electrolítica.

Las técnicas posibles para reducir la producción y liberación de las sustancias del Anexo C provenientes del sector del aluminio primario implican mejoras en la producción y control de los ánodos, y el uso de procesos de fundición avanzados. Los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles para emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF del sector del aluminio primario son <0.1 ng EQT-l/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

(iii) Producción de magnesio

Resumen

El magnesio puede producirse a partir de cloruro de magnesio puro por electrólisis de sales fundidas, o por reducción de los óxidos de magnesio con ferrosilicio o aluminio a altas temperaturas, así como por recuperación secundaria del magnesio (por ejemplo, de residuos de amianto).

En la producción de magnesio, factores como la adición de cloro o cloruros, la presencia de ánodos de carbono, y las altas temperaturas del proceso pueden llevar a la formación de sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, y a su emisión al aire y descarga en aguas.

Entre las técnicas alternativas está la eliminación de la fuente de carbono mediante ánodos sin grafito, y la aplicación de carbón activado. No obstante, los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles dependen del tipo de proceso y de los controles utilizados para las liberaciones al aire y agua.

(iv) Producción secundaria de acero

Resumen

El acero secundario se produce por fundición directa de chatarra ferrosa en hornos de arco eléctrico. El horno funde y refina una carga metálica de chatarra de acero para producir aceros al carbón, aleados e inoxidables en acerías no integradas. Los materiales de alimentación ferrosos pueden ser chatarra, como vehículos triturados y virutas de metal, o hierro de reducción directa. Además, la chatarra puede destinarse a otros hornos de fundición dentro de la planta y a los sectores de hierro y acero primario.

Parece ser más probable que se formen sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, como PCDD y PCDF, en el proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico por síntesis *de novo* en la combustión de materia orgánica no clorada, como son los plásticos, carbón y partículas de carbono, en presencia de

donantes de cloro. Muchas de estas sustancias se encuentran en concentraciones traza en la chatarra de acero, o son materias primas del proceso, como el carbono inyectado.

Las medidas primarias consisten en un manejo y acondicionamiento apropiados de los gases residuales para evitar las condiciones que propician la formación de PCDD/PCDF por síntesis *de novo*. A este respecto cabe señalar el uso de postquemadores, seguidos de un enfriamiento rápido de los gases residuales. Entre las medidas secundarias está la inyección de adsorbente (por ejemplo, de carbón activado) y desempolvamiento de alta eficiencia con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para la producción secundaria de acero son <0.1 ng/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

(v) Fundición primaria de metales comunes

Resumen

La fundición primaria de metales comunes consiste en la extracción y refinación de níquel, plomo, cobre, zinc y cobalto. Por lo general, las instalaciones de fundición primaria de metales comunes procesan concentrados de mineral. La mayoría de las fundiciones primarias tienen la capacidad técnica de complementar el alimento de concentrado primario con materiales secundarios (ej., reciclables).

Las técnicas de producción pueden comprender procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Se considera que las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo se originan por procesos térmicos metalúrgicos a altas temperaturas; por lo tanto, los procesos hidrometalúrgicos no se analizarán en esta sección sobre mejores técnicas disponibles para la fundición primaria de metales comunes.

La información existente sobre emisiones de PCDD y PCDF provenientes de diversos sectores de fuentes (ej., incineradoras, hornos de arco eléctrico para acero, plantas de sinterización de hierro) sugiere que las tecnologías y técnicas de procesamiento, y el correspondiente acondicionamiento de gases residuales, pueden afectar la formación y la posterior liberación de PCDD/PCDF. Al momento de considerar propuestas para la construcción y puesta en servicio de nuevas instalaciones o procesos para fundir metales comunes, deben considerarse los procesos hidrometalúrgicos, si son técnica y económicamente viables, como alternativa a los procesos pirometalúrgicos.

Las medidas primarias consisten en el uso de procesos hidrometalúrgicos, control de calidad de los materiales y chatarra de alimentación a fin de disminuir al mínimo los contaminantes que ayudan a la formación de PCDD/PCDF, control efectivo del proceso para evitar las condiciones que ayudan a la formación de PCDD/PCDF, y uso de la tecnología de fusión *flash*. Las medidas secundarias establecidas son la depuración de gases de alta eficiencia, la conversión de dióxido de azufre en ácido sulfúrico, recolección efectiva de vapores y gases, y desempolvado de alta eficiencia.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundiciones primarias de metales comunes son $<0.1 \text{ ng EQT-I /Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

C. Fuentes de combustión domésticas

Resumen

La presente sección trata de la combustión de madera, carbón, gas y otros compuestos orgánicos utilizados principalmente para calefacción y cocina domésticas. La combustión se realiza en estufas o chimeneas de encendido manual y, en el caso de sistemas centrales de calefacción más grandes, en instalaciones de encendido automático. Algunos estudios han demostrado que las fuentes de combustión domésticas liberan cantidades importantes de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. La cantidad de compuestos liberados depende principalmente del combustible utilizado (desechos domésticos, maderos impregnados de sal marina y madera tratada son fuentes importantes de PCDD/PCDF) y de la eficiencia de la combustión. La eficiencia de la combustión depende de la temperatura de la misma, adecuada mezcla de los gases, tiempo de residencia, suficiente oxígeno y propiedades del combustible. Por su gran profusión, los aparatos de combustión doméstica contribuyen perceptiblemente a las liberaciones globales de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C.

La quema eficiente de combustibles limpios y no tratados para calefacción y cocina de importancia primordial para reducir la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C. Algunas estrategias para reducir las liberaciones de estas sustancias a partir de fuentes de combustión doméstica son los programas de educación, sensibilización y capacitación sobre el uso correcto de aparatos, uso de combustibles adecuados y efectos de la combustión doméstica no controlada en la salud. Los aparatos pequeños de calefacción y cocina domésticas no suelen contar con las tecnologías de reducción utilizadas comúnmente en establecimientos industriales. No obstante, con el uso y buen funcionamiento de estufas bien diseñadas se pueden lograr reducciones de las sustancias químicas del Anexo C, con la importante ventaja complementaria de mejorar la calidad del aire en interiores.

Los quemadores cerrados de baja emisión, con ductos de escape y uso de leña seca bien curada se consideran mejores técnicas disponibles. En países y regiones donde no se dispone de este tipo de combustibles y aparatos, las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para la combustión doméstica consisten en garantizar la separación de los desechos domésticos de los combustibles para evitar la quema de los primeros en aparatos de calefacción y cocina. En todos los países, debería evitarse el uso de madera tratada o maderos impregnados de sal marina, así como el uso de plásticos como material para encendido o combustible.

En todos los países del mundo cocinar y calentar la vivienda con leña es una práctica común y significativa. Toda acción para reducir las emisiones de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C provenientes de la combustión doméstica también tendrá

que tomar en cuenta factores locales, sociales, culturales y económicos. Para subrayar la importancia de tales factores, se exponen casos de Australia y Nueva Zelanda.

D. Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales

Resumen

Las calderas industriales y de centrales termoeléctricas queman combustible para calentar agua o producir vapor que se utiliza en la generación de electricidad o en procesos industriales. Las concentraciones volumétricas de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo en las emisiones provenientes de calderas que utilizan combustibles fósiles son, por lo general, muy bajas. Sin embargo, el total de emisiones del sector de calderas puede resultar significativo por la magnitud de la combustión a base de combustibles fósiles, tanto en términos de tonelaje como de distribución, para la generación de electricidad y producción de calor o vapor.

Las medidas que se pueden adoptar para reducir la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C son: mantener condiciones eficientes de combustión en la caldera y garantizar el tiempo necesario para la combustión completa, adoptar medidas para asegurarse de que el combustible no esté contaminado con PCB, HCB o cloro, y de que tenga un bajo contenido de compuestos que actúen como catalizadores en la formación de PCDD y PCDF, utilizar métodos apropiados de depuración de gases para disminuir las emisiones que puedan contener estos contaminantes, y emplear estrategias adecuadas de eliminación, almacenamiento o uso regular de las cenizas recolectadas.

Los niveles de emisión de PCDD/PCDF al aire asociados a mejores técnicas disponibles pueden ser considerablemente inferiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³ (contenido de oxígeno de 6% para combustibles sólidos y de 3% para combustibles líquidos).

E. Instalaciones de combustión de madera u otros combustibles de biomasa

Resumen

El objetivo principal de las instalaciones de combustión de madera y otras biomásas es la conversión de energía. Las grandes instalaciones de combustión de madera y otras biomásas utilizan principalmente hornos de lecho fluidizado y hornos de parrilla. Entre las tecnologías empleadas en plantas pequeñas se encuentran los hornos de alimentación por la parte inferior y hornos de suspensión de ciclones. Las calderas de recuperación de la industria de la pulpa y el papel siguen determinadas condiciones de combustión. La selección de la tecnología depende de las propiedades del combustible y la capacidad térmica requerida.

Durante la combustión de madera y otras biomásas se pueden formar las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, sobre todo si el combustible está contaminado. En el caso de plantas alimentadas con biomasa, en especial instalaciones que queman madera, los niveles de emisión de PCDD/PCDF asociados a mejores técnicas disponibles por lo general son inferiores a 0.1 ng EQT- I/Nm^3 . Dentro de las medidas primarias, el control de la calidad del combustible es un factor clave (que comprende la exclusión de madera tratada). Las medidas de control de biomasa no contaminada implican técnicas optimizadas de combustión y eliminación de polvos. La combustión de paja incrementa el ensuciamiento de superficies y requiere técnicas de combustión que no sean sensibles a la escorificación de cenizas.

En este tipo de instalaciones se debería evitar la combustión de biomasa contaminada, como desechos de madera. Las cenizas volantes (especialmente las fracciones más finas) producidas por la combustión de biomasa deben ser depositadas en rellenos sanitarios por su elevado contenido de metales pesados. En muchos países (entre ellos los de la Unión Europea), la madera tratada con compuestos clorados o metales pesados se considera como desecho y está sujeta a las directivas o reglamentos sobre incineración de desechos.

Otros beneficios ambientales derivados de la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales son la conservación de recursos y la no emisión de dióxido de carbono proveniente de combustibles fósiles (en caso de sustitución).

F. Procesos de producción de productos químicos determinados que liberan sustancias químicas que figuran en el Anexo C

Resumen

La presente sección trata de los procesos de fabricación de productos químicos industriales que teóricamente podrían generar contaminantes orgánicos persistentes (en particular las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo). La mayor parte de los procesos aquí descritos implican las mismas etapas, como cloración de materias primas orgánicas e inorgánicas, purificación de las sustancias, separación de corrientes de sustancias (generalmente por destilación), destrucción de subproductos de alto peso molecular y reciclado o comercialización de cloruro de hidrógeno. Separar y destruir con eficiencia los subproductos orgánicos clorados, que pueden contener contaminantes orgánicos persistentes, así como seguir las correspondiente orientaciones para cualquier procedimiento de incineración, son factores importantes de las mejores técnicas disponibles aplicables a estos procesos. También se describen los procesos modernos de producción de ciertos productos que reducen la formación de contaminantes orgánicos persistentes. Se presentan asimismo diversas normas de desempeño asociadas a mejores técnicas disponibles para procesos específicos.

G. Crematorios

Resumen

Desde la antigüedad hasta nuestros días, la cremación ha sido una práctica aceptada, de importancia religiosa y cultural, que muchos países y culturas utilizan en la muerte de los seres humanos. Para algunos países y culturas, la cremación es parte integral de las prácticas religiosas y funerarias; para otras, se trata de una alternativa voluntaria a la inhumación. Las presentes directrices no pretenden redefinir estas prácticas o subestimar el significado que tienen en algunas poblaciones. Para los países en los que se practica la cremación, y siguiendo las disposiciones del Convenio de Estocolmo, el objetivo de estas directrices es ofrecer métodos para reducir al mínimo o eliminar la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo durante el proceso de cremación.

Los crematorios pueden formar y liberar PCDD, PCDF, HCB y PCB por la presencia de estos compuestos clorados, precursores o cloro en los cadáveres y en algunos plásticos co-incinerados. Algunas medidas para reducir al mínimo la formación y liberación de las sustancias del Anexo C son: evitar el material clorado, diseñar crematorios que operen a una temperatura mínima de 850°C, disponer un tiempo de residencia de 2 segundos para los gases de combustión y suficiente aire para garantizar la combustión. Los crematorios nuevos y grandes deberían además estar equipados con sistemas de control de la contaminación atmosférica para reducir al mínimo la emisión de dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes. Con la aplicación de mejores técnicas disponibles se pueden alcanzar niveles de <0.1 ng EQT-I/Nm³ en emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF.

H. Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible

Resumen

Los principales combustibles que se utilizan en los vehículos de motor son la gasolina y el diesel. El gas licuado de petróleo, el combustible a base de aceite vegetal y otros biocarburantes, además de las mezclas de alcohol y petróleo están adquiriendo importancia.

Se ha detectado la presencia de PCDD y PCDF en las emisiones provenientes de los vehículos de motor que utilizan gasolina o diesel. Las concentraciones más altas que se han identificado en las emisiones de los vehículos que funcionan con gasolina con plomo se deben a la presencia de fuentes de cloro y bromo en forma de aditivo de limpieza (scavenger) en el combustible.

Pueden considerarse los siguientes combustibles como alternativas a la gasolina con plomo: gasolina sin plomo (de preferencia con catalizador), diesel (de preferencia con catalizador de oxidación diesel y filtro de partículas), gas licuado de petróleo, gas natural

comprimido, gas propano / butano, combustibles de biomasa y mezclas de alcohol y petróleo.

Entre las mejores técnicas disponibles se cuenta la prohibición de los aditivos de limpieza halogenados y el equipamiento de los vehículos con un catalizador de oxidación o un filtro de partículas.

No hay datos de mediciones de combustibles de biomasa, mezclas de alcohol y petróleo o gas licuado de petróleo. Tampoco los hay para los motores de dos tiempos.

I. Destrucción de carcasas de animales

Resumen

La formación y emisión de PCDD, PCDF, PCB y HCB de incineradores de carcasas de animales se debe a la presencia de estos materiales clorados, precursores y cloro en las carcasas o en algunos plásticos que pueden co-incinerarse con las carcasas y subproductos. Algunas de las medidas que se pueden tomar para reducir la formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes son evitar la co-incineración con otros desechos, mantener un mínimo de temperatura de 850°C en el horno, un tiempo residencia de los gases de combustión de 2 segundos y suficiente exceso de aire para garantizar la combustión. Las instalaciones grandes (>50 kg/h) deberían contar con equipo de control de la contaminación atmosférica para reducir emisiones de bióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes. Los niveles de desempeño para PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas asociados con mejores técnicas disponibles son <0.1 ng EQT-I/Nm³.

Otros métodos de eliminación, por ejemplo, inhumación, vertido en rellenos o compostaje, no se consideran emisores significativos de las sustancias químicas del Anexo C, pero hay que tener en cuenta los aspectos ambientales, de salud pública y sanidad animal, así como inconvenientes varios. La digestión por hidrólisis alcalina es otra técnica de destrucción de carcasas de animales.

J. Teñido (con cloranil) y terminado (con extracción alcalina) de textiles y cueros

Resumen

Se ha encontrado contaminación con PCDD y PCDF tanto en productos textiles como en curtidos. La presencia de PCDD/PCDF en las industrias textiles y del cuero se debe al uso de sustancias químicas cloradas, concretamente pentaclorofenol y cloronitrofen, para proteger las materias primas (algodón, lana y otras fibras, cuero), y al uso de tintes contaminados con dioxinas (dioxinas o ftalocianinas). Se pueden formar cantidades más pequeñas de PCDD/PCDF en el acabado y durante la incineración de lodo generado durante el proceso.

Existen alternativas a los pigmentos de tinte mencionados, por lo que no deberían aplicarse.

Algunas alternativas posibles al pentaclorofenol y cloronitrofen: 2-(tiocianometilitio) benzotiazole (TCMTB); o-fenilfenol (oPP); 4-cloro-3-metilfenol (CMK); y 2-*n*-octil-4-isotiazolin-3-ona (OIT).

En lo referente a mejores técnicas disponibles, la medida primordial más eficiente para evitar la contaminación de productos textiles y curtidos con PCDD/PCDF sería no emplear biocidas y tintes contaminados con dioxinas en las cadenas de producción. Asimismo, si se emplean estas sustancias, debe darse preferencia a los lotes que tengan concentraciones bajas (sustancias destiladas o purificadas de alguna otra forma). En lo posible, debería evitarse la quema de materiales textiles, de tapicería, curtidos y alfombras para evitar la formación de PCDD/PCDF.

A fin de evitar o reducir la formación y emisión de PCDD/PCDF en la incineración de lodos del tratamiento de aguas residuales y producto de la flotación, deberían aplicarse las mejores técnicas disponibles que se describen en la sección VI.D de esta guía. No obstante, deberían asimismo considerarse otras técnicas respetuosas del medio ambiente.

K. Plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso

Resumen

En el Anexo C del Convenio de Estocolmo las plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso figuran como fuente con potencial para formar y liberar las sustancias nombradas en el mismo Anexo. Las fragmentadoras son grandes máquinas compuestas por uno o más yunques o barras rompedoras y revestidas con placas de desgaste de acero aleado. Un motor eléctrico mueve el rotor con los martillos de acero aleado cuyo movimiento es de cabeceo libre. En la parte inferior de la fragmentadora hay una bandeja vibratoria que recibe el material triturado que se descarga a través de las parrillas. Según el procedimiento, se produce un flujo de metal ferroso, relativamente limpio y compuesto de trozos de acero pequeños (50 mm) y una "borra" que contiene fragmentos de metales no ferrosos y de otros materiales que ingresaron a la fragmentadora (conocida también como trituradora).

Hay muy pocos datos de mediciones de emisiones de chimenea en plantas de fragmentación; sin embargo, los resultados de algunos estudios arrojan niveles de emisiones de PCDD/PCDF al aire de más de 0.1 ng EQT-*l*/m³. Por el momento no hay pruebas suficientes de que durante la fragmentación (mecánica) de vehículos, equipos eléctricos domésticos u otros aparatos eléctricos se produzca nueva formación de dibenzoparadioxinas (PCDD) policloradas, dibenzofuranos policlorados (PCDF) o bifenilos policlorados (PCB). La información existente indica que los PCDD/PCDF y PCB liberados por las plantas de fragmentación son un producto industrial, intencional, que

ha ingresado con los aceites, fluidos dieléctricos y otros materiales contenidos en estos vehículos o bienes de consumo, y que este proceso mecánico se limita a liberar.

En todo caso, en las plantas de fragmentación se deben aplicar medidas para evitar incendios accidentales (que podrían provocar la formación de sustancias del Anexo C). La borra de la fragmentación está compuesta de películas de plástico inflamable y polvo fibroso, lo que obliga a una cuidadosa operación de la planta para evitar incendios accidentales. Normalmente se instalan sistemas para eliminación de polvo (por ejemplo, fragmentación en húmedo) o para recolección de polvo (por ejemplo, ciclones, lavadores Venturi o cámaras de filtros) en plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso. Estos sistemas ayudan a reducir la emisión potencial de contaminantes orgánicos persistentes. Para aumentar el control de las emisiones de polvo, los residuos secos finos se deberían almacenar de forma que su dispersión sea mínima. Otras fuentes de precursores de dioxinas que pueden provocar la formación de PCDD/PCDF cuando son quemadas son los condensadores que contienen PCB, aceites de desecho o textiles contaminados con PCB o clorobenceno y polímeros que contienen pirotardantes bromados (formación de dibenzoparadioxinas polibromadas (PBDD) y dibenzofuranos polibromados (PBDF) como contaminantes).

L. Recuperación del cobre de cables por combustión lenta

Resumen

Se suele recuperar la chatarra de cobre quemando a cielo abierto los cables e hilos eléctricos que vienen recubiertos de plástico. Las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo se forman probablemente a partir del plástico y los residuos de aceite, con el cobre como catalizador, a temperaturas de fundición que van de 250°C a 500°C.

Las mejores técnicas disponibles son el triturado o pelado del cable por medios mecánicos, o la incineración a temperaturas de >850°C. Se ha considerado fijar un precio especial para los cables e hilos eléctricos sin pelar, para así promover que se lleve el material intacto a los fundidores que empleen las mejores técnicas disponibles para su tratamiento.

No se puede hablar de niveles de desempeño asociados con las mejores técnicas disponibles, ya que el proceso de recuperación térmica de cobre de cables no es una de ellas ni una de las mejores prácticas ambientales, y no debería ser practicada.

M. Refinerías de aceites de desecho

Resumen

En el Anexo C del Convenio de Estocolmo las refinerías de aceites de desecho figuran como una de las fuentes que pueden formar y liberar las sustancias nombradas en el mismo anexo.

Para fines de esta sección de las directrices, los aceites de desecho (o aceites usados) son cualquier aceite derivados del petróleo sean sintéticos o de origen vegetal o animal que haya sido usados. Según su origen pueden clasificarse en dos grandes fuentes: aceites industriales de desecho y aceites vegetales o de origen animal. Se pueden identificar tres tipos principales de aceite industrial de desecho: aceite industrial (ej. Aceite hidráulico, lubricante de motores, aceite de corte), aceite de garaje o taller mecánico, y aceite de transformador.

Se ha comprobado que los aceites de desecho están contaminados con dibenzo-p-dioxinas policloradas, dibenzofuranos policlorados y bifenilos policlorados, pero, por ahora, no hay pruebas de nueva formación de estas sustancias en refinerías de aceites de desecho. Los datos existentes indican que las dibenzoparadioxinas policloradas y los dibenzofuranos policlorados o los bifenilos policlorados liberados por las refinerías de aceites de desecho o por las plantas de manipulación y gestión de aceites de desecho provienen de la producción industrial, intencional, de bifenilos policlorados o clorobenzenos que se encuentran en los aceites de desecho, sea por contaminación en el proceso de síntesis (de estas sustancias), o por haberse contaminado durante su uso o en procesos de reciclaje anteriores. En este sentido, más que una fuente de formación, las refinerías de aceites de desecho representan una fuente de distribución de las sustancias del Anexo C.

Según la información disponible, algunas opciones para la gestión de aceites de desecho son la reutilización y regeneración, craqueo térmico, incineración o utilización como combustible. Hay que señalar que en muchos países también se practica el vertido y la quema a cielo abierto.

Para obtener información sobre la eliminación de los aceites de desecho o sobre su uso como combustible, consúltense las secciones pertinentes en estas directrices (secciones V.A Incineradoras de desechos; V.B Hornos de cemento que queman desechos peligrosos; VI.A Quema de desechos a cielo abierto; VI.C Fuentes de combustión doméstica y VI.D Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales).

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Incineradoras de desechos



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

MAYO DE 2007, GINEBRA, SUIZA

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

V.A	Incineradoras de desechos	9
(i)	Desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado	9
1.	Introducción	10
2.	Descripción del proceso	10
2.1	Incineración de desechos sólidos urbanos	12
2.2	Incineración de desechos peligrosos	14
2.3	Incineración de lodos de alcantarillado	17
3.	Fuentes de formación de las sustancias que figuran en el Anexo C	19
4.	Alternativas a la incineración de desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado	23
5.	Mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos	25
5.1	Prácticas de gestión de desechos	25
5.2	Prácticas de operación y gestión de incineradoras	29
6.	Mejores técnicas disponibles para la incineración	31
6.1	Selección del sitio	33
6.2	Mejores técnicas disponibles para el ingreso y control de desechos	33
6.3	Mejores técnicas disponibles para la combustión	33
6.4	Mejores técnicas disponibles para el tratamiento de gases de combustión	36
6.5	Técnicas de gestión para residuos sólidos	39
6.6	Mejores técnicas disponibles para el tratamiento de efluentes	40
6.7	Efecto de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en otros contaminantes	41
6.8	Incineradores nuevos y con importantes modificaciones	41
6.9	Modificación de incineradoras de desechos existentes	43
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles	44
	Referencias	44
(ii)	Desechos médicos	45
1.	Introducción	46
2.	Categorías de desechos sanitarios	46
2.1	Desechos médicos infecciosos	47
2.2	Desechos biológicos procedentes de la asistencia sanitaria	47
2.3	Objetos cortantes	47
3.	Técnicas alternativas para fuentes nuevas y existentes	47
3.1	Fuentes nuevas	47
3.2	Fuentes existentes	48
3.3	Técnicas alternativas	48

4.	Mejores prácticas ambientales para la gestión de desechos sanitarios.....	54
4.1	Reducción en la fuente	55
4.2	Separación.....	55
4.3	Recuperación y reciclaje de recursos	56
4.4	Capacitación del personal.....	56
4.5	Recolección en el sitio de generación de los desechos	56
4.6	Transporte al área de almacenamiento intermedio	57
5.	Técnicas aplicadas a la incineración de desechos médicos.....	57
5.1	Descripción del proceso	57
5.2	Técnicas de tratamiento térmico	59
5.3	Depuración de gases de combustión	61
5.4	Tratamiento de cenizas volantes y de fondo, tratamiento de aguas residuales	61
6.	Mejores técnicas disponibles y resumen de mejores prácticas ambientales.....	62
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles.....	71
	Referencias	71
	Otras fuentes.....	71

Tablas: Sección V.A (i)

Tabla 1.	Desechos y residuos sólidos de la incineración de desechos sólidos urbanos	21
Tabla 2.	Escalas de concentración de compuestos orgánicos en cenizas de plantas modernas.....	22
Tabla 3.	Cálculo de liberaciones de PCDD/PCDF de incineradoras de desechos urbanos en diferentes medios.....	23
Tabla 4.	Ejemplos de técnicas de inspección	27
Tabla 5.	Ejemplos de técnicas de separación	28

Tablas: Sección V.A (ii)

Tabla 1.	Orientación general	63
Tabla 2.	Incineración de desechos sanitarios: Tecnologías de combustión que representan mejores técnicas disponibles	64
Tabla 3.	Incineración de desechos sanitarios: Medidas generales	65
Tabla 4.	Incineración de desechos sanitarios: Medidas de organización.....	66
Tabla 5.	Medidas primarias y máximo aprovechamiento del proceso para reducir emisiones de PCDD/PCDF	67
Tabla 6.	Medidas secundarias	68

Ilustraciones: Sección V.A (i)

Figura 1.	Esquema de flujo simplificado de una incineradora	12
Figura 2.	Incineradora de desechos sólidos urbanos convencional	14
Figura 3.	Esquema de un sistema de incinerador de horno rotatorio	16
Figura 4.	Ejemplo de incineradora de soleras múltiples para lodos de alcantarillado	18

Ilustraciones: Sección V.A (ii)

Figura 1.	Separación y alternativas de tratamiento para desechos médicos	53
Figura 2.	Diagrama simplificado del funcionamiento de un incinerador	58

(i) Desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado

■ Resumen

En el Convenio de Estocolmo se señala a las incineradoras de desechos como industrias con un potencial de formación y liberación relativamente alto de sustancias que figuran en el Anexo C.

Los objetivos previstos de la incineración son la reducción del volumen de los desechos, recuperación de energía, destrucción o, al menos, disminución, de componentes peligrosos, desinfección y recuperación de algunos residuos.

Al considerar propuestas para construir nuevas incineradoras de desechos, debería darse prioridad a alternativas como las actividades para disminuir la generación de desechos, en particular la recuperación y reutilización de recursos, reciclaje, separación de desechos y promoción de productos que generen menos desechos. También debería darse prioridad a los métodos que prevengan la formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes.

Para lograr un diseño y funcionamiento de incineradoras de desechos ambientalmente racional se requiere a la vez el uso de mejores técnicas disponibles y de mejores prácticas ambientales (que son, hasta cierto punto, coincidentes), que permitan evitar o disminuir la formación y liberación de las sustancias que figuran en el Anexo C.

Las mejores prácticas ambientales para incineración de desechos comprenden procedimientos *ex situ* (como la gestión integral de desechos y el estudio de las repercusiones ambientales del emplazamiento) y procedimientos *in situ* (como la inspección de desechos, manipulación de desechos, funcionamiento de incineradores y prácticas de gestión y manipulación de residuos adecuadas).

Las mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos son la selección apropiada del sitio, ingreso y control de desechos, técnicas de combustión, tratamiento de gases de combustión, residuos sólidos y efluentes.

Para obtener los mejores resultados para la protección integral del medio ambiente es esencial coordinar el proceso de incineración de desechos con las primeras etapas (ej., técnicas de gestión de desechos) y las etapas posteriores (ej., eliminación de residuos sólidos derivados de la incineración de desechos).

Las liberaciones de las sustancias que figuran en el Anexo C provenientes de las incineradoras de desechos sólidos urbanos concebidas y operadas según las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales se generan principalmente por cenizas volantes, cenizas de fondo y tortas de filtro del tratamiento de aguas residuales. Por ello es de suma importancia prever el depósito de estos tipos de desechos en

condiciones de seguridad, con un pretratamiento y eliminación final en rellenos sanitarios exclusivos, preparados y operados según las mejores técnicas disponibles.

Con una combinación apropiada de medidas principales y secundarias, se asocian a las mejores técnicas disponibles niveles de desempeño no superiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³ (con 11% de O₂) para PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas. Se ha observado además que, en condiciones normales de funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien concebida.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian con niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/l.

1. Introducción

En el Convenio de Estocolmo se señala a las incineradoras de desechos como industrias con un potencial de formación y liberación relativamente alta de sustancias del Anexo C. Asimismo, la coincineración de desechos puede ser una fuente de emisiones de estas sustancias.

La presente sección se refiere sólo a la incineración exclusiva de desechos y no a otras circunstancias en que los desechos se someten a tratamiento térmico, por ejemplo, los procesos de coincineración que se dan en los hornos de cemento y las grandes plantas de combustión, que son objeto de análisis en las secciones respectivas.

Al considerar propuestas para construir nuevas plantas de eliminación de desechos, el Convenio de Estocolmo aconseja a las Partes considerar como prioridad:

- Alternativas como las actividades que disminuyen la generación de desechos urbanos, en particular la recuperación de recursos, reutilización, reciclaje, separación de desechos y promoción de productos que generen menos desechos, al considerar propuestas para construir nuevas plantas de eliminación de desechos (Convenio de Estocolmo, Anexo C, Parte V, sección A, inciso (f)).
- Métodos que evitarán la formación y liberación de las sustancias del Anexo C.

Las consideraciones sobre la gestión de desechos, descritas en la sección III.C (ii) de estas directrices, y los métodos alternativos sugeridos en el apartado 6, pueden tomarse en cuenta como parte de las estrategias generales para prevención y control de desechos.

2. Descripción del proceso

La incineración se utiliza como forma de tratamiento para una gran variedad de desechos. Por lo general, la incineración en sí es sólo una parte de un complejo sistema de tratamiento de desechos que, en conjunto, se encarga de la gestión total de la gran variedad de desechos que genera la sociedad (para un análisis de asuntos transectoriales

relativos a la incineración y gestión de desechos véase la sección III.C de estas directrices).

El objetivo de la incineración de desechos es tratarlos para reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y, por lo tanto, concentrando) o destruyendo al mismo tiempo sustancias potencialmente nocivas que se liberen, o puedan liberar, durante la incineración. Los procesos de incineración también pueden constituir una forma de recuperar el contenido energético, mineral o químico de los desechos.

Los incineradores están provistos de hornos de distintos tipos y tamaños, y ofrecen distintas combinaciones de tratamiento pre y postcombustión. Además, hay bastante coincidencia entre los modelos recomendados para la incineración de desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos o de lodos de alcantarillado.

Normalmente, las incineradoras están diseñadas para combustión oxidativa completa a temperaturas de 850°C a 1400°C. A estas temperaturas pueden darse también calcinaciones y fundiciones. La gasificación y la pirólisis constituyen alternativas de tratamiento térmico que limitan la cantidad de aire de combustión primaria para convertir los desechos en gas de proceso, que puede utilizarse como materia prima química o puede incinerarse para recuperar energía. No obstante, en comparación con la incineración, la aplicación de estos sistemas es escasa y en algunas plantas se han registrado dificultades de funcionamiento.

Las plantas incineradoras de desechos pueden caracterizarse por los siguientes procesos: recepción de desechos, almacenamiento, pretratamiento, incineración/recuperación de energía, depuración de gases de combustión, gestión de residuos sólidos, y tratamiento de aguas residuales. La forma de concebir y operar cada componente depende en gran medida de la naturaleza de los desechos.

Por lo general, los desechos son materiales muy heterogéneos, compuestos sobre todo de sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante la incineración se generan gases de combustión que contendrán la mayor parte de la energía combustible en forma de calor.

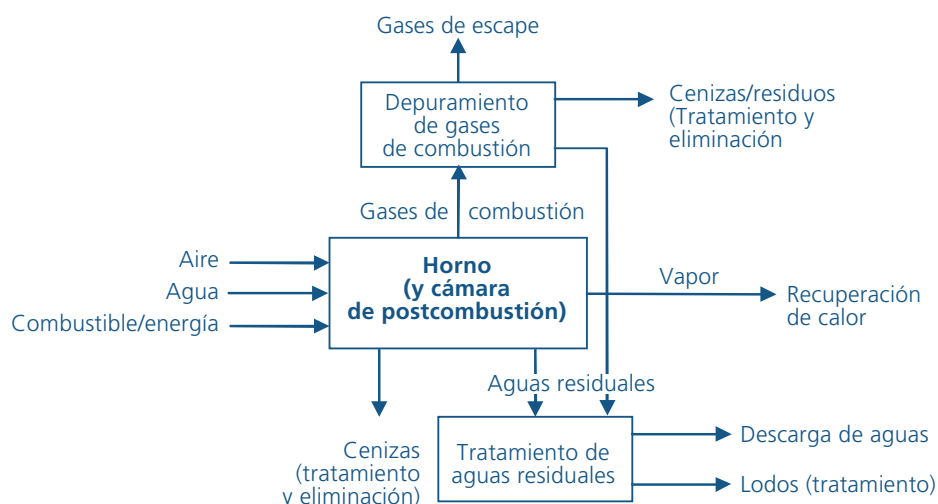
En la incineración oxidativa completa, los componentes principales del gas de combustión son vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno. Según sea la composición del material incinerado, las condiciones de funcionamiento y el sistema de depuración de gases de combustión instalado, se emiten gases ácidos (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cloruro de hidrógeno), partículas (incluidos metales particulados), y una gran variedad de compuestos orgánicos volátiles (como mercurio). Asimismo, se ha demostrado que la incineración de desechos sólidos urbanos y desechos peligrosos genera y libera involuntariamente contaminantes orgánicos persistentes (PCDD/PCDF, PCB, HCB); además, tiene el potencial de liberar dibenzoparadioxinas polibromadas (PBDD) y dibenzofuranos polibromados (PBDF). Es normal que en plantas que tengan deficiencias de diseño u operación estas formaciones se eleven sustancialmente.

Según las temperaturas de combustión durante las etapas principales de la incineración, los metales volátiles y los compuestos inorgánicos (ej., sales) se evaporan total o parcialmente. Estas sustancias se transfieren desde los desechos que ingresan hasta los gases de combustión y las cenizas volantes que contiene. Se generan cenizas volantes

de los residuos minerales (polvo) y cenizas sólidas más pesadas (cenizas de fondo). Las proporciones de residuos sólidos varían mucho según sea el tipo de desecho y el diseño específico del proceso.

Otras emisiones son residuos provenientes del tratamiento y depuración de gases de combustión, tortas de filtro del tratamiento de aguas residuales, sales y liberación de sustancias en aguas residuales.

■ **Figura 1: Esquema de flujo simplificado de una incineradora**



2.1 Incineración de desechos sólidos urbanos

A pesar de que en muchas áreas el vertido de los desechos sin reciclar sigue siendo el método más común para eliminar los desechos sólidos urbanos, la incineración y el posterior vertido de residuos se ha vuelto una práctica habitual en muchos países desarrollados e industrializados. (Para un análisis de jerarquía de la gestión de desechos véase la sección III.C (ii)).

La Directiva del Consejo Europeo sobre el vertido de desechos (1999/31/EC) dispone que los Estados Miembro deben establecer una estrategia nacional para disminuir los desechos biodegradables que llegan a los rellenos sanitarios. Esta estrategia debería prever medidas, en particular, respecto a reciclaje, compostaje, producción de biogás y recuperación de material o energía, para alcanzar las metas.

La incineración de los desechos sólidos urbanos suele venir acompañada de la recuperación de parte de la energía ("energía de desechos") en forma de vapor y/o generación de electricidad. Además, las incineradoras pueden diseñarse de forma que puedan admitir formas procesadas de combustibles derivados de desechos sólidos urbanos, así como para la co-combustión de combustibles fósiles. El tamaño de las incineradoras de desechos urbanos va desde unidades pequeñas que procesan partidas únicas de unas pocas toneladas al día hasta unidades de gran tamaño, con capacidad de alimentación diaria continua de más de mil toneladas. Los costos de inversión de estas plantas capaces de satisfacer criterios que pueden considerarse mejores técnicas disponibles suelen ser de millones hasta cientos de millones de dólares estadounidenses.

Las ventajas principales de la incineración de desechos sólidos urbanos son la destrucción de los materiales orgánicos (incluso tóxicos), la reducción del volumen de desechos y la concentración de contaminantes (ej., metales pesados) a cantidades relativamente pequeñas de cenizas, creando así sumideros sin riesgo si se eliminan en forma adecuada. La energía recuperada puede constituir una importante ventaja adicional.

Las grandes incineradoras de desechos urbanos son importantes plantas industriales, con el potencial de convertirse en fuentes significativas de contaminación ambiental (véase sección 2).

2.1.1 Consideraciones sobre el funcionamiento de incineradoras de desechos sólidos urbanos

En muchas incineradoras de desechos sólidos urbanos también se incineran otras fracciones de desechos, como desechos voluminosos (ej., provenientes de plantas de separación de residuos), lodos de alcantarillado o la fracción altamente calorífica del pretratamiento de los desechos (ej., de plantas de trituración). Estos desechos deben ser evaluados cuidadosamente antes de la incineración para verificar si la planta de incineración de desechos (incluidos el tratamiento de gases de combustión y el tratamiento de aguas residuales y residuos) está preparada para tratar estos tipos de desechos y si puede hacerlo sin riesgo de perjudicar la salud humana o el medio ambiente. Algunos parámetros importantes son el contenido de cloro y bromo, contenido de aluminio, de metales pesados, contenido calorífico y comportamiento de combustión. Las altas concentraciones de bromo pueden generar compuestos bromados como las dibenzoparadioxinas polibromadas (PBDD) y los dibenzofuranos polibromados (PBDF). Desestimar los límites de la planta incineradora puede causar problemas operacionales (ej., cierres reiterados para poder limpiar la chimenea o los intercambiadores de calor) o resultados ambientales deficientes (ej., altas emisiones en agua, alta lixiviabilidad de cenizas volantes).

La Figura 2 muestra la organización típica de una incineradora de desechos sólidos urbanos de gran tamaño.

2.1.2 Recepción, almacenamiento y pretratamiento de desechos sólidos urbanos

Los desechos pueden llegar a la incineradora en camiones, barcazas o por tren. El reciclaje o los programas de separación de desechos previos a la entrega pueden influir enormemente en la eficacia del procesamiento. Eliminar vidrios y metales antes de la incineración aumentará el valor energético por unidad de desecho. No obstante, en algunas plantas se separan los metales de las cenizas de fondo después de la incineración. Reciclar papel, cartón y plástico reducirá el valor energético de los desechos pero también puede reducir el cloro que contienen. Separar los desechos voluminosos evita tener que eliminarlos o triturarlos en la planta.

Además de la separación de desechos, el pretratamiento de desechos sólidos urbanos en bruto puede implicar la compactación y trituración para facilitar la manipulación y lograr más homogeneidad. Las áreas de silos suelen estar cubiertas para protegerlas de

la humedad exterior y es habitual que la planta esté diseñada de forma que se haga pasar el aire de combustión a través del silo para reducir olores.

■ Figura 2. Incineradora de desechos sólidos urbanos convencional



Fuente: European Commission 2006

2.1.3 Tipos de incineradoras de desechos sólidos urbanos

Hay distintos sistemas de combustión para incinerar desechos sólidos urbanos, como el sistema de parrilla móvil, de hornos rotatorios y de lechos fluidizados. En Estados Unidos y Asia se usan también incineradores modulares, que queman los desechos sin procesarlos previamente. La tecnología de lecho fluidizado requiere que las partículas de desechos sean de determinado tamaño, lo que suele exigir cierto pretratamiento y una recolecta selectiva de los desechos. Las capacidades típicas de combustión de los incineradores de desechos sólidos urbanos son de 90 a 2.700 toneladas por día (configuraciones modulares: de 4 a 270 toneladas al día).

Se han desarrollado procesos por desacoplamiento de las etapas que también se llevan a cabo en una incineradora: secado, volatilización, pirólisis, carbonización y oxidación de los desechos. También se aplica la gasificación con agentes gasificantes como vapor, aire, óxidos de carbono u oxígeno. Estos procesos apuntan a disminuir los volúmenes de gases de combustión y los correspondientes costos de tratamiento. Muchas de estas innovaciones han presentado problemas técnicos y económicos al trasladarse al nivel comercial e industrial y, por lo tanto, no han tenido continuidad. Algunos sistemas se usan comercialmente (ej., en Japón) y otros se están evaluando en plantas de demostración por toda Europa, pero aun así, sólo representan una pequeña parte de la capacidad total de tratamiento en comparación con la incineración.

2.2 Incineración de desechos peligrosos

La incineración y otras formas de tratamiento térmico también constituyen opciones de tratamiento de desechos peligrosos. Este tipo de desechos se distingue de otros porque figura en reglamentaciones y normativas sobre desechos o porque tiene propiedades peligrosas. Por ejemplo, en los Estados Unidos, un desecho puede considerarse peligroso si se demuestra que es inflamable, corrosivo, reactivo o tóxico. Las mezclas de desechos peligrosos con otros desechos también pueden considerarse peligrosas.

Debido al gran peligro potencial de trabajar con estos desechos y a la incerteza que se suele asociar con su composición, se requieren procedimientos especiales para su transporte, manipulación, almacenamiento y control. También puede ser necesario aplicar métodos especiales de manejo para cualquier residuo que quede después del tratamiento.

La tecnología de combustión más común en la incineración de desechos peligrosos es el horno rotatorio. Las plantas en el sector comercial pueden procesar de 82 a 270 toneladas de desechos por día (European Commission 2006). Ciertos desechos peligrosos, en particular los solventes usados se quemán también como combustible en hornos de cemento. Esta aplicación se aborda en la sección V.B de las presentes directrices.

Al igual que la incineración de desechos sólidos urbanos, la incineración de desechos peligrosos ofrece la ventaja de destruir los materiales orgánicos (incluidos los tóxicos), reducir el volumen y concentrar los contaminantes en cantidades relativamente pequeñas de cenizas y, con menos frecuencia, la de recuperar energía.

Las incineradoras de desechos peligrosos tienen el potencial de constituir fuentes importantes de contaminación ambiental (véase sección 2).

Los desechos peligrosos se incineran normalmente en dos tipos de plantas:

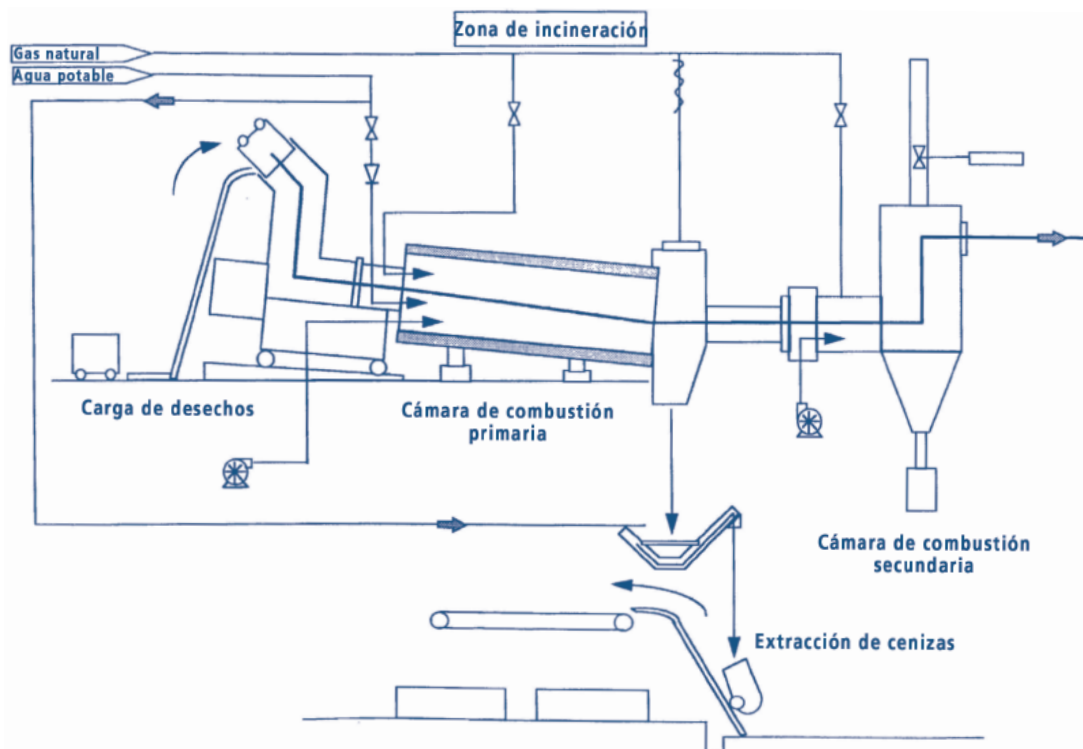
- Plantas comerciales, que proporcionan a las empresas servicios de tratamiento de desechos *ex situ*. Estas incineradoras reciben toda una variedad de flujos de desechos y pueden competir internacionalmente.¹
- Las incineradoras de desechos peligrosos exclusivas o de uso interno, por lo general instaladas en grandes plantas industriales, que procesan los flujos de desechos generados en la planta misma, por ejemplo una incineradora de una planta de elaboración de productos químicos que trata desechos clorados para recuperar cloruro de hidrógeno (HCl).

Los residuos sólidos provenientes de incineradoras de desechos peligrosos son similares a los de incineradoras de desechos sólidos urbanos salvo por la escoria, que se genera en los hornos rotatorios.

2.2.1 Diseño y operación de incineradoras de desechos peligrosos

En las incineradoras de desechos peligrosos se utilizan más comúnmente los hornos rotatorios (Figura 3), pero las incineradoras de parrilla (incluida la co-combustión con otros desechos) también se emplean de vez en cuando para desechos sólidos, y las incineradoras de lecho fluidizado para algunos materiales pretratados. Los hornos estáticos también tienen un uso generalizado en plantas de productos químicos.

■ **Figura 3. Esquema de un sistema de incinerador de horno rotatorio**



Debido a la peligrosa (y a menudo incierta) composición del flujo de desechos entrante, los criterios de aceptación, almacenamiento, manipulación y pretratamiento tienen más importancia que en el caso de los desechos sólidos urbanos. Pueden requerirse combustibles auxiliares en el caso de desechos de escaso valor energético.

En los hornos rotatorios, los desechos sólidos y lodos se descargan, sea por bombeo o por medio de contenedores, en la parte superior del tambor inclinado. Las temperaturas normales en el horno van de 850°C (500°C cuando se utiliza como gasificador) a 1450 °C (cuando se utiliza como horno de alta temperatura para fusión de cenizas). La rotación lenta del tambor permite un tiempo de residencia de 30 a 90 minutos. Las temperaturas entre 850°C y 1000°C pueden considerarse apropiadas para destruir desechos peligrosos no halogenados, mientras que las temperaturas entre 1100°C y 1200°C se consideran apropiadas para disolver compuestos halogenados, es decir, PCDD/PCDF, PCB y HCB.

La cámara de combustión secundaria que sigue al horno permite la oxidación de los gases de combustión. Se pueden inyectar desechos líquidos o combustibles auxiliares en esta cámara junto con aire secundario para mantener un tiempo de residencia mínimo de 2 segundos y temperaturas entre 850°C y 1100°C, disolviendo efectivamente la mayor parte de los compuestos orgánicos restantes (las disposiciones relativas a las condiciones de combustión se prescriben, por ejemplo, en la Directiva 2000/76/EC de la Unión Europea sobre incineración de desechos).

Los desechos peligrosos también se incineran en hornos de cemento; esta aplicación se analiza en la sección V.B de las presentes directrices.

2.2.2 Ingreso, almacenamiento y pretratamiento de desechos peligrosos

Antes de admitir desechos peligrosos a tratamiento, las incineradoras comerciales deben evaluar y caracterizar el material. Se solicita siempre documentación al productor, en particular sobre el origen de los desechos, su código u otra clasificación, identificación de los responsables y presencia de materiales peligrosos específicos. Además, los desechos deben venir debidamente embalados para evitar la posibilidad de reacciones y emisiones durante el transporte.

El almacenamiento en la planta incineradora dependerá de la naturaleza y las propiedades físicas de los desechos. Los desechos peligrosos sólidos se depositan habitualmente en silos construidos para prevenir fugas a cualquier medio, y encerrados a fin de poder sacar el aire de su interior para el proceso de combustión. Los desechos líquidos se almacenan en un área de depósitos, con frecuencia en una atmósfera de gas inerte (N₂, por ejemplo), y se transportan al incinerador por medio de ductos. Algunos desechos pueden ingresar directamente al incinerador en los mismos contenedores de transporte. Las bombas, ductos y demás equipo que pueda estar en contacto con los desechos deben estar construidos a prueba de corrosión y ser de fácil acceso para permitir la limpieza y los muestreos.

Las operaciones de pretratamiento pueden ser de neutralización, drenaje o solidificación de los desechos. También pueden usarse trituradoras y mezcladoras mecánicas para procesar contenedores o mezclar desechos a fin de hacer más eficiente la combustión.

2.3 Incineración de lodos de alcantarillado

Los lodos de alcantarillado doméstico se eliminan de diversas maneras, entre ellas por aplicación en tierras de cultivo después del pretratamiento, eliminación en superficie (ej., paisajismo), incineración, co-eliminación con desechos sólidos urbanos y coincineración. La incineración de lodos de alcantarillado se practica en varios países, sea por sí sola o por coincineración en incineradoras de desechos sólidos urbanos o en otras plantas de combustión (ej., centrales termoeléctricas a base de carbón, hornos de cemento). La eliminación eficaz de lodos de alcantarillado con este proceso depende de diversos factores, por ejemplo, de si los lodos están mezclados con flujos de desechos industriales (que pueden aumentar las cargas de metales pesados), de su ubicación (posibilidad de intrusión de agua salada en zonas costeras), de si se realiza o no pretratamiento, y del clima (disolución por lluvia) (European Commission 2006).

La incineración de lodos de alcantarillado difiere en algunos aspectos de la incineración de desechos sólidos urbanos y desechos peligrosos. La variabilidad en el contenido de humedad, el valor energético, y la posible mezcla con otros desechos (ej., desechos industriales cuando hay interconexión con los sistemas de alcantarillado) requieren consideraciones especiales en cuanto a manipulación y pretratamiento.

El pretratamiento, en especial la deshidratación y el secado, es de particular importancia en la preparación del lodo para la incineración. El secado reduce el volumen de lodo y aumenta la energía calorífica del producto. Normalmente se requiere eliminar la humedad para lograr, por lo menos, 35 % de sólidos secos a fin de proporcionar la

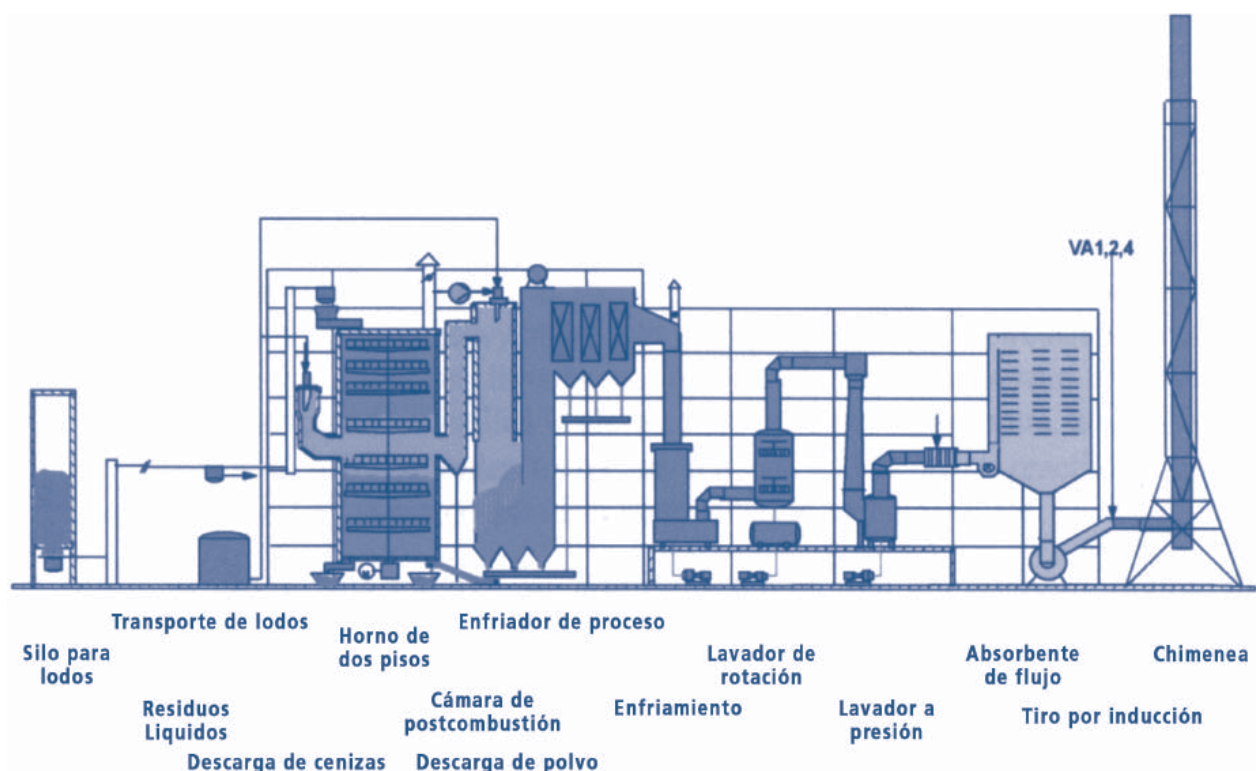
energía calorífica necesaria para la incineración autotérmica. Puede necesitarse un secado posterior si se prevé la co-incineración con desechos sólidos urbanos.

Al igual que en las incineradoras de desechos sólidos urbanos y de desechos peligrosos, los contaminantes y sustancias del Anexo C y sus compuestos precursores se encuentran en los flujos de ingreso a las incineradoras de lodos de alcantarillado y, como consecuencia, estas sustancias se han formado y liberado al aire, agua y residuos/desechos (véase sección 2). Los residuos sólidos producto de la incineración de lodos de alcantarillado se componen principalmente de cenizas volantes y de lecho (de la incineración de lecho fluidizado) y residuos del tratamiento de gases de combustión (véase la descripción de la incineración de desechos sólidos urbanos).

2.3.1 Diseño y funcionamiento de incineradoras de lodos de alcantarillado

Una incineradora convencional de lodos de alcantarillado puede procesar hasta 80,000 toneladas de lodos de alcantarillado (con 35% de sólidos secos) al año. Las tecnologías de incineración preferidas para este tipo de desechos son las de soleras múltiples (Figura 4) y los sistemas de hornos de lecho fluidizado, aunque también se usan hornos rotatorios en aplicaciones de menor escala.

■ **Figura 4. Ejemplo de incineradora de soleras múltiples para lodos de alcantarillado**



Fuente: European Commission 2006

Según el porcentaje de sólidos secos (sequedad), se aplica un combustible auxiliar, por lo general aceite combustible o gas natural. Las temperaturas de operación preferidas son de 850°C a 950°C con un tiempo de residencia de 2 segundos, aunque algunas instalaciones de lecho fluidizado pueden funcionar a temperaturas inferiores, hasta de

820°C, sin pérdida de rendimiento. Operar a 980°C o por encima de esta temperatura puede causar la fusión de las cenizas (European Commission 2006).

Los lodos de alcantarillado se co-incineran con desechos sólidos urbanos en incineradoras de lecho fluidizado e incineradoras de desechos en bruto (en parrillas). En este último caso, es habitual una razón de 1:3 (lodo a desechos), los lodos secos se introducen en la cámara de incineración como lodo pulverizado o drenado que se deposita en la parrilla por medio de rociadores. En algunos casos, los lodos drenados o secados pueden mezclarse con desechos sólidos urbanos en el silo o la tolva antes de ser cargados al incinerador. Los métodos de alimentación constituyen una parte importante de la inversión de capital adicional que se necesita para la co-incineración.

2.3.2 Pretratamiento de lodos de alcantarillado

Los lodos pueden someterse a cierto pretratamiento antes de entrar a la planta incineradora, lo que puede implicar cribado, digestión anaeróbica y aeróbica, y adición de productos químicos para tratamiento.

La deshidratación física disminuye el volumen de lodo y aumenta su poder calorífico. Los procesos de deshidratación mecánica utilizan decantadores, centrífugas, prensas de filtro de banda y de cámara. Los acondicionadores (por ejemplo, agentes flocculantes) se suelen añadir antes de la deshidratación para facilitar el drenaje. Con deshidratación mecánica se suelen obtener de 20% a 35% de sólidos secos (European Commission 2006).

El proceso de secado introduce calor para deshidratar y acondicionar más los lodos. El calor para el secado en la planta incineradora suele provenir del mismo proceso de incineración. Los procesos de secado pueden ser directos (los lodos entran en contacto con el portador térmico) o indirectos (por ejemplo, el calor proviene de una instalación generadora de vapor). En el secado directo el vapor y la mezcla de gases deben depurarse posteriormente.

La incineración autotérmica (autocombustible) de lodos exige un 35% de sólidos secos. Aunque la deshidratación mecánica puede alcanzar este umbral, puede utilizarse un secado adicional del lodo para llegar hasta 80 - 95% de sólidos secos y así aumentar el poder calorífico. La co-incineración con desechos sólidos urbanos requiere, por lo general, un secado adicional del lodo.

3. Fuentes de formación de las sustancias que figuran en el Anexo C

En cuanto a los mecanismos de formación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo, véase la sección III.C (i) de estas directrices.

Las sustancias del Anexo C son liberadas al aire, al agua (cuando se instalan sistemas para depuración de gases de combustión húmedos o cuando los residuos son lavados con líquidos para eliminar algunas sustancias tóxicas) y por medio de los residuos sólidos.

Los residuos sólidos provenientes de la incineración de desechos sólidos urbanos corresponden principalmente a cenizas de fondo, de calderas y cenizas volantes. Los residuos sólidos de incineradoras de desechos peligrosos son parecidos a los de incineradoras de desechos sólidos urbanos a excepción de la escoria generada por la incineración en horno rotatorio. Los residuos sólidos provenientes de la incineración de lodos de alcantarillado son principalmente cenizas volantes y de lecho (de la incineración de lechos fluidizados), y residuos del tratamiento del gas de combustión (véase la descripción de la incineración de desechos sólidos urbanos).

Además, se generan residuos del tratamiento de gases de combustión con características distintas según los sistemas instalados (seco, semi seco, húmedo). Cuando se utilizan sistemas húmedos, también se acumularán tortas de filtro y yeso del tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se deben tomar en cuenta los residuos provenientes del filtrado del aire.

Las alternativas para el tratamiento de residuos derivados de la depuración del aire dependen del adsorbente utilizado (carbón activado, coque, cal, bicarbonato de sodio, zeolita). A veces se permite que los residuos de carbón (activado) de reactores de lechos fijos se incineren en la misma planta incineradora de desechos, si se cumplen ciertas condiciones para el proceso. Los residuos de sistemas de lecho de arrastre también pueden incinerarse si el adsorbente aplicado es sólo carbón activado o coque de horno. Si se utiliza una combinación de carbón activado y otros reactivos, el residuo se envía, por lo general, a tratamiento externo o eliminación, por los riesgos de corrosión.

En muchos países las fracciones de desechos generadas por plantas incineradoras de desechos se clasifican como desechos peligrosos, a excepción del yeso proveniente de la desulfuración de gases de combustión y de la chatarra de metales ferrosos y no ferrosos. A modo de ejemplo, la ley austriaca dispone que cuando exceden el límite de PCDD/PCDF (100 ng EQT-I/kg) los desechos se deben eliminar en condiciones de seguridad ambiental, lo que implica, en la mayoría de los casos, expedición (después del pretratamiento) a rellenos sanitarios especialmente preparados, o almacenamiento subterráneo. Además, según la ley austriaca, debe evitarse la formación y dispersión de polvo proveniente de estos desechos durante el transporte y el almacenamiento intermedio (Directiva sobre incineración de desechos de Austria, Boletín de Derecho Federal No. II 389/2002).

La Tabla 1 ilustra las masas relativas de residuos sólidos de una incineradora de desechos sólidos urbanos ordinaria.

■ **Tabla 1. Desechos y residuos sólidos de la incineración de desechos sólidos urbanos**

Tipos de desechos	Masa específica, seca (kg/t de desechos)
Escoria/cenizas (incluidos desperdicios de cribado de parrillas)	200–350
Polvo de caldera y de procesos de eliminación de polvo	20–40
Residuos de la depuración de gases de combustión sin filtro de polvo:	
Absorción en húmedo ^a	8–15
Absorción en semiseco	15–35
Absorción en seco	7–45
Residuos de la depuración de gases de combustión y de filtros de polvo:	
Absorción en húmedo ^a	30–50
Absorción en semiseco	40–65
Absorción en seco	32–80
Carga de carbón activado	0.5–1

a. Los residuos de la absorción en húmedo tienen una sequedad específica (ej., 40–50% de sólidos secos) (74, TWG Comments, 2004).

Fuente: Umweltbundesamt Deutschland 2001

En la Tabla 2 figuran las concentraciones habituales de compuestos orgánicos en cenizas de plantas de incineración de desechos modernas.

■ **Tabla 2. Escalas de concentración de compuestos orgánicos en cenizas de plantas modernas**

Parámetro	Cenizas de fondo (ng/kg)	Cenizas de caldera (ng/kg)	Cenizas volantes (ng/kg)
PCDD/PCDF (EQT-I)	<1–10	20–500	200–10,000
PCB	<0.005–0.05	0.004–0.05	10,000–250,000
PCBz ^a	<0.002–0.05	200,000–1,000,000	100,000–4,000,000
PCPh ^b	<0.002–0.05	20,000–500,000	50,000–10,000,000
PAH ^c	<0.005–0.01	10,000–300,000	50,000–2,000,000

a. PCBz: bencenos policlorados.

b. PCPh: fenoles policlorados.

c. PAH: hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Fuente: European Commission 2006

Las emisiones atmosféricas de las plantas incineradoras de desechos dependen en gran medida de las condiciones de combustión y del diseño y las condiciones de funcionamiento de los sistemas de tratamiento para gases de combustión. Las emisiones de PCDD/PCDF provenientes de las plantas incineradoras de desechos más modernas que aplican mejores técnicas disponibles se encuentran en un rango de 0.0008–0.05 ng EQT-I/Nm³; (véase Stubenvoll, Böhmer *et al.* 2002). No obstante, las emisiones pueden ser superiores a 150 ng EQT-I/Nm³ en plantas mal diseñadas y operadas.

Las emisiones de PCDD/PCDF en agua sólo se dan cuando se aplican sistemas húmedos al tratamiento de gases de combustión. Las plantas de tratamiento de aguas residuales modernas prevén etapas como la neutralización, precipitación, floculación y filtros de coque activado para eliminar las sustancias orgánicas. Por lo general, las emisiones de estas plantas van de 0.01 a 0.3 ng EQT-I/l (ej., en la Directiva de Incineración de desechos del Consejo Europeo se establece un límite de emisión (ELV) de 0.3 ng EQT-I/l).

Los registros de las concentraciones habituales de PCDD/PCDF encontrados en los mismos desechos indican valores en el rango de 50–250 ng EQT-I/kg para desechos sólidos urbanos, de un máximo de 10,000 ng EQT-I/kg para desechos peligrosos, y de 8.5–73 ng EQT-I/kg para lodos de alcantarillado (European Commission 2006).

En la Tabla 3 figura un cálculo de liberaciones de PCDD/PCDF (EQT-I) en distintos medios a partir de parámetros típicos de incineradoras de desechos sólidos urbanos diseñadas y operadas según mejores técnicas disponibles (para los parámetros, véase Stubenvoll, Böhmer *et al.* 2002 y European Commission 2006).

■ **Tabla 3. Cálculo de liberaciones de PCDD/PCDF de incineradoras de desechos urbanos en diferentes medios**

Medio	Acumulación por tonelada de desechos tratados	Unidad	Concentración promedio	Unidad	Liberación específica (µg EQT-I /t de desechos)
Cenizas de fondo	220	kg	46	ng EQT-I/kg	10.12
Cenizas volantes	20	kg	2,950	ng EQT-I/kg	59
Tortas de filtro	1	kg	4,000	ng EQT-I/kg	4
Aguas esiduales	450	l	0.3	ng EQT-I/l	0.135
Aire	5,000	Nm ³	0.02	ng EQT-I/Nm ³	0.1
Liberación total					73.355

Fuente: Stubenvoll, Böhmer et al. 2002, y European Commission 2006

A partir de los datos presentados en la Tabla 3 queda claro que se liberan dioxinas y furanos principalmente de la incineración de desechos sólidos. En la mayoría de los países las tortas de filtro (ej., del almacenamiento subterráneo) y las cenizas volantes tienen que eliminarse en rellenos sanitarios exclusivos (a veces después de pretratamiento), mientras que las cenizas de fondo son utilizadas en algunos países (ej., para la construcción de carreteras), por lo general después de pretratamiento.

A condición de que el contenido total y la tasa de lixiviación de contaminantes orgánicos persistentes provenientes de cenizas y otros desechos de la incineración de desechos sean bajos (lo que puede lograrse por ejemplo, mediante pretratamiento), los rellenos sanitarios preparados especialmente — si están diseñados y operados según las mejores técnicas disponibles— pueden considerarse sumideros finales para las sustancias peligrosas, de forma que se reduce mucho el riesgo de liberación posterior y reexposición a estos químicos. En este caso las emisiones de plantas incineradoras de desechos modernas es muy baja.

4. Alternativas a la incineración de desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado

En la sección III.C (ii) de esta guía se muestra un panorama general de las consideraciones en materia de gestión de desechos.

Además de instar a las Partes a dar prioridad a enfoques que promuevan el reciclaje y la recuperación de desechos y disminuyan la generación de desechos, el Convenio de Estocolmo subraya la importancia de considerar métodos alternativos de eliminación y

tratamiento que puedan evitar la formación y liberación de las sustancias del Anexo C. A continuación se presentan ejemplos de esas alternativas, con inclusión de tecnologías incipientes.

Para los desechos urbanos, las alternativas posibles a la incineración son:

- Estrategias de gestión llamadas de cero desechos, destinadas a eliminar la generación de desechos mediante la aplicación de toda una serie de medidas, en particular instrumentos legislativos y económicos
- Disminución de desechos, separación en origen y reciclaje para reducir el volumen que requiera eliminación final
- Compostaje, que reduce el volumen de desechos por descomposición biológica
- Tratamiento biológico mecánico, que reduce el volumen de desechos usando medios mecánicos y biológicos, y genera residuos que requieren gestión posterior
- Fundición a alta temperatura, que utiliza medios térmicos para reducir el volumen de desechos y encapsula los residuos que requieren gestión posterior
- Rellenos sanitarios especialmente contruidos, que encierran y aíslan los desechos (además de capturar y quemar de manera efectiva el metano formado, sea con recuperación de energía sea, cuando menos, con quemador tipo antorcha, si el método anterior no es aplicable)

Para los desechos peligrosos, las alternativas posibles a la incineración son:

- Disminución de desechos y su separación en origen con eliminación final mediante otras técnicas o en rellenos sanitarios apropiados

Para los desechos de COP, las alternativas posibles a la incineración se exponen en las Directrices Técnicas de Basilea (Directrices Técnicas del Convenio de Basilea para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes, que los contengan o estén contaminados con ellos; 2005)

- Reducción química en fase gaseosa
- Descomposición por catálisis básica
- Reducción del sodio
- Oxidación supercrítica en agua

Para los lodos de alcantarillado no contaminados, las alternativas posibles a la incineración son la eliminación en rellenos sanitarios o su esparcido en suelos, lo que evita la formación de las sustancias del Anexo C. Se ha observado, sin embargo, que cualquier contaminante orgánico persistente y otras sustancias peligrosas presentes en estos lodos pueden liberarse al medio ambiente con este último método. Para su aplicación en suelos, sería ideal que los lodos no contaminados se recolectaran en forma separada.

Se precisa más actividad en la comunidad internacional para evaluar y verificar tecnologías como las anteriores. También es preciso actuar más en la promoción de otras innovaciones en este importante campo.

5. Mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos

Plantas bien mantenidas, operadores bien capacitados, una ciudadanía informada, y la constante atención en el proceso son todos factores que contribuyen a reducir la formación y liberación de las sustancias del Anexo C provenientes de la incineración de desechos. Además, las estrategias efectivas de gestión de desechos (por ejemplo, la disminución de los desechos, separación en origen y reciclaje), al cambiar el volumen y características de los desechos entrantes pueden, asimismo, tener un efecto significativo en las emisiones.

Se debería mencionar aquí que, por lo ambiguo de la definición de lo que constituyen mejores prácticas ambientales, se dan coincidencias entre las descripciones de mejores prácticas ambientales y mejores técnicas disponibles. Algunas prácticas que figuran en este apartado referente a mejores prácticas ambientales también pueden constituir requisitos para el funcionamiento de una planta que utilice mejores técnicas disponibles.

En este apartado se describen mejores prácticas ambientales para el funcionamiento de una incineradora de desechos. Las prácticas correspondientes que deberían aplicarse antes de que los desechos lleguen a la planta incineradora se describen en otras secciones de estas directrices (véase, por ejemplo, la sección III.C sobre consideraciones transectoriales).

5.1 Prácticas de gestión de desechos

Las consideraciones sobre gestión de desechos, descritas en la sección III.C (ii) de las presentes directrices, y los enfoques alternativos esbozados en el apartado 6, deben tomarse en consideración como parte de las estrategias generales para prevención y control de desechos.

5.1.1 Disminución de desechos

Reducir la masa total de los desechos que deben eliminarse por el método que sea sirve para reducir tanto las emisiones como los residuos de las incineradoras. Destinar los biodegradables al compostaje, así como las iniciativas para reducir la cantidad de materiales de embalaje que ingresan al flujo de desechos puede incidir enormemente en los volúmenes de los desechos. Al fin y al cabo, es poca la responsabilidad que le corresponde en la reducción de desechos al operador de una planta incineradora. No obstante, la coordinación y uniformización de las actividades pertinentes en los distintos niveles organizacionales (ej., operador, nivel local, regional o nacional) son de gran importancia para la protección de todo el medio ambiente.

5.1.2 Separación en origen y reciclaje

La clasificación y recolección Kerbside o centralizada de los materiales reciclables (por ejemplo, aluminio y otros metales, vidrio, papel, plásticos reciclables y desechos de construcción o demolición) también disminuye el volumen de desechos, ahorra valiosos recursos y elimina algunos combustibles. La responsabilidad de estas actividades debe coordinarse entre los niveles correspondientes.

5.1.3 Inspección y clasificación de desechos

Es esencial tener buenos conocimientos de las características y atributos de los desechos entrantes. Las características de un flujo de desechos particular pueden variar significativamente de un país a otro y de una región a otra. En caso de que ciertos desechos o componentes de desechos sean considerados no-incinerables, debe haber procedimientos para detectar y separar estos materiales en el flujo de desechos o en los residuos. Se deben realizar revisiones, muestreos y análisis, muy en particular tratándose de desechos peligrosos. Es importante conservar y tener al día las declaraciones de carga y hacer seguimientos de control. La Tabla 4 ilustra algunas técnicas aplicables a distintos tipos de desechos.

■ **Tabla 4. Ejemplos de técnicas de inspección**

Tipo de desecho	Técnicas	Comentarios
Desechos urbanos mixtos	Inspección visual en el silo. Control aleatorio de las entregas por separación de descargas. Pesaje de desechos tal como se reciben. Detección de radioactividad.	Las cargas industriales y comerciales pueden implicar grandes riesgos.
Desechos urbanos pretratados y combustibles derivados de residuos	Inspección visual. Muestreo y análisis periódicos para detectar propiedades o sustancias importantes.	
Desechos peligrosos	Inspección visual. Muestreo/análisis de todos los camiones de carga a granel. Inspección aleatoria de la carga en tambores. Desembalaje y revisión de las cargas empaquetadas. Evaluación de los parámetros de combustión. Pruebas de mezclado de desechos líquidos antes del almacenamiento. Control del punto de ignición para los desechos en el silo. Análisis de desechos entrantes para determinar la composición elemental, por ejemplo mediante EDXRF ^a .	La extensión y efectividad de los procedimientos son de importancia particular para este sector. Las plantas que reciben flujos de un solo tipo pueden adoptar procedimientos más simples.
Lodos de alcantarillado	Muestreo y análisis periódico para detectar propiedades y sustancias importantes. Detección de piedras/metales antes de las etapas de secado. Control del proceso para adaptarlo a variaciones en los lodos.	

a. EDXRF: Fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (espectrómetro)

Fuente: European Commission 2006

5.1.4 Extracción de incombustibles en la incineradora

La extracción de metales ferrosos y no ferrosos *in situ* es una práctica habitual en incineradoras de desechos sólidos urbanos.

5.1.5 Manipulación, almacenamiento y pretratamiento adecuados

Una manipulación adecuada, sobre todo de los desechos peligrosos, es indispensable. Se debería llevar a cabo una adecuada clasificación y separación para así lograr un procesamiento sin riesgos (Tabla 5).

Las áreas de almacenamiento deben estar debidamente selladas, contar con un drenaje controlado y estar protegidas contra la intemperie. También deberían preverse sistemas de detección y control de incendios para estas áreas, y que tengan la capacidad para guardar el agua que se contamina al extinguir incendios. Las áreas de almacenamiento y manejo deberían estar concebidas para evitar la contaminación del medio ambiente y para facilitar su saneamiento en caso de derrames o fugas. Se pueden disminuir los olores y la liberación de contaminantes orgánicos persistentes volátiles al medio ambiente usando el aire del silo para el proceso de combustión. En el caso de los lodos de alcantarillado, el pretratamiento debe garantizar un suficiente secado y acondicionamiento.

■ **Tabla 5. Ejemplos de técnicas de separación**

Tipo de desecho	Técnicas de separación
Desechos urbanos mezclados	La separación no se efectúa sistemáticamente a no ser que se reciben varios flujos de desechos distintos, que puedan mezclarse en el silo. Pueden separarse los desechos voluminosos que requieran pretratamiento. Establecer áreas de separación de emergencia para desechos rechazados.
Desechos urbanos pretratados y combustibles derivados de residuos	No se separan sistemáticamente. Establecer áreas de separación de emergencia para desechos rechazados.
Desechos peligrosos	Se precisan procedimientos exhaustivos para separar materiales químicamente incompatibles, por ejemplo: <ul style="list-style-type: none">- Agua de fosfuros- Agua de isocianatos- Agua de materiales alcalinos- Cianuro de ácidos- Materiales inflamables de agentes oxidantes- Conservar separados los desechos preseparados que ingresan empaquetados
Lodos de alcantarillado	Por lo general, desechos bien mezclados antes de ingresar a la planta. Algunos flujos industriales pueden ingresar por separado y requieren segregación para mezclarlos.

Fuente: European Commission 2006

5.1.6 Reducción de periodos de almacenamiento

A pesar de que un suministro constante de desechos es importante para tener un funcionamiento continuo y unas condiciones estables de combustión en las grandes incineradoras de desechos sólidos urbanos, es improbable que los desechos almacenados mejoren con el tiempo. La disminución del periodo de almacenamiento ayudará a prevenir la putrefacción y otras reacciones no deseadas, así como el deterioro de recipientes y etiquetas. La gestión de las entregas y la comunicación con los proveedores ayudará a asegurarse de no exceder los periodos de almacenamiento razonables (ej., de cuatro a siete días para desechos sólidos urbanos).

5.1.7 Establecimiento de requisitos de calidad para las plantas alimentadas por desechos

Los operadores deben poder prever en forma precisa el poder calorífico y otros atributos de los desechos que se van a quemar para asegurarse de que se cumplan los parámetros de diseño del incinerador. Para ello pueden usarse los resultados de un programa de vigilancia de alimentación de contaminantes y parámetros clave en el que las frecuencias y rigor de los muestreos y análisis aumenten en función de la variabilidad en la alimentación.

5.1.8 Carga de desechos

Para las plantas que reciben desechos sólidos urbanos heterogéneos, es indispensable lograr una buena mezcla y cargar adecuadamente las tolvas de alimentación. Los operadores de grúas de carga deben ser experimentados y estar en condiciones de poder seleccionar la mezcla de tipos de desechos adecuada para mantener al incinerador funcionando con un rendimiento óptimo.

5.2 Prácticas de operación y gestión de incineradoras

5.2.1 Asegurar una buena combustión

Para poder prevenir la formación y captura de las sustancias del Anexo C, se precisa cuidar y controlar debidamente los parámetros de combustión y de escape. En las unidades de alimentación continua, la sincronización de la introducción de desechos, el control de las condiciones de combustión, y la gestión postcombustión son consideraciones importantes (véase el apartado 6).

5.2.2 Evitar arranques en frío, alteraciones y suspensiones

Por lo general, estos eventos son característicos de una combustión deficiente y, por lo tanto, propician las condiciones para la formación de las sustancias del Anexo C. Para incineradores pequeños y modulares que operan por partidas, encender y apagar pueden ser cosa de todos los días. Precalear el incinerador y realizar una co-combustión inicial con un combustible fósil puro permitirá llegar con más rapidez a las temperaturas de una combustión eficiente. Con todo, cuando sea posible, el funcionamiento continuo debería ser la práctica preferida. Independientemente del modo de operar, los desechos deberían introducirse en el sistema de combustión sólo

cuando se haya alcanzado la temperatura requerida (ej., sobre 850°C). Las inspecciones periódicas y el mantenimiento preventivo servirán para prevenir alteraciones. Los operadores de incineradoras no deberían introducir desechos cuando se opera sin pasar por los filtros (usando la chimenea de emergencia) o durante graves alteraciones en la combustión.

5.2.3 Inspecciones regulares de la planta y almacenamiento

Deberían realizarse inspecciones internas de rutina, así como inspecciones periódicas de parte de las autoridades competentes de los hornos y los aparatos de control de contaminación atmosférica para asegurar la integridad del sistema y el funcionamiento apropiado del incinerador y sus componentes.

5.2.4 Monitoreo

Favorece una combustión de alta eficiencia la creación de un sistema de vigilancia de los parámetros operativos principales, como el monóxido de carbono (CO), el índice de flujo volumétrico, la temperatura y el contenido de oxígeno. Un nivel de CO bajo se asocia con una mayor eficiencia de la combustión en el caso de la combustión de desechos sólidos urbanos. En general, si la concentración de CO por volumen es baja (por ejemplo, <50 partes por millón o 30 mg/m³) en los gases de combustión de la chimenea, esto indica en general que se mantiene una combustión de gran eficiencia dentro de la cámara de combustión. Una buena eficiencia de combustión significa la disminución de la formación de PCDD/PCDF dentro del incinerador, por lo que conviene registrar la temperatura de combustión dentro de la cámara.

El monóxido de carbono, oxígeno del gas de combustión, partículas, cloruro de hidrógeno (HCl), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ácido fluorhídrico (HF), corrientes de aire y temperaturas, bajas de presión, y pH del gas de combustión, son todos ellos elementos que deberían ser monitoreados sistemáticamente. Estas mediciones reflejan las condiciones de la combustión y proporcionan un indicador general del potencial de formación y liberación de las sustancias del Anexo C. Una medición periódica o semi-continua (muestreo continuo y análisis periódico) de PCDD/PCDF en los gases de combustión puede ayudar al operador a asegurarse de que las liberaciones son mínimas y que el incinerador funciona adecuadamente.

En Japón, se han aprobado oficialmente métodos de medición simplificados mediante bioensayos para medir periódicamente las dioxinas de plantas incineradoras de desechos con capacidad de menos de dos toneladas por hora (véase también la sección III.C (vi)).

5.2.5 Manipulación de residuos

Las cenizas de fondo y cenizas volantes del incinerador deben ser manipuladas, transportadas y eliminadas de forma ambientalmente racional, lo que implica tratar las cenizas de fondo separadamente de las cenizas volantes y otros residuos provenientes del tratamiento de los gases de combustión a fin de evitar la contaminación de las cenizas de fondo y mejorar así su potencial de recuperación. El transporte protegido y los rellenos sanitarios exclusivos son una práctica común para manejar estos residuos.

Se requiere una evaluación del contenido y de la movilidad ambiental potencial de los metales pesados y de las sustancias del Anexo C, sobre todo si se prevé la reutilización de los residuos. Asimismo, deberían seguirse las directrices adoptadas por el Convenio de Basilea y, por consiguiente, las adoptadas por la Conferencia de las Partes en el Convenio de Estocolmo. Un análisis periódico de las cenizas también puede servir de indicador del funcionamiento del incinerador o de la introducción de desechos no permitidos.

Los efluentes de la depuración, incluidas las tortas de filtro de la limpieza húmeda de gases de combustión, se consideran desechos peligrosos en muchos países y deben tratarse y eliminarse de manera ambientalmente racional (ej., estabilización previa a la eliminación en rellenos sanitarios construidos especialmente).

5.2.6 Capacitación de los operadores

Es indispensable capacitar con regularidad al personal para un buen funcionamiento de los incineradores de desechos. En los Estados Unidos, por ejemplo, la capacitación y certificación de los operadores está a cargo de la American Society of Mechanical Engineers (véase también la sección III.C (v) de estas directrices).

5.2.7 Sensibilización y comunicación permanentes

Saber generar y conservar la buena disposición de la sociedad ante un proyecto de incineración de desechos es esencial para el éxito de la empresa. En el marco de la planificación del proyecto, la difusión debería empezar lo antes posible. Es natural que las agrupaciones ciudadanas y de defensa de intereses públicos abriguen inquietudes acerca de su construcción y funcionamiento. Tratar el tema en forma transparente y sincera ayudará a prevenir información errónea y malentendidos.

He aquí algunas prácticas efectivas para sensibilizar a la ciudadanía y promover su participación: publicar avisos en periódicos con anticipación, distribuir información en los hogares del área, solicitar opiniones sobre el diseño y las opciones de operación, instalar carteles informativos en espacios públicos, mantener registros de la liberación y transferencia de contaminantes, y organizar reuniones públicas y foros de debate frecuentes.

Las autoridades y promotores de proyectos de incineración deberían acercarse a las entidades interesadas, como son los grupos de interés público, y realizar reuniones consultivas con personas interesadas, organizar visitas públicas, publicar en Internet datos sobre las emisiones y el funcionamiento, y exhibir en la planta misma datos en tiempo real sobre las operaciones y emisiones. Las entrevistas con la ciudadanía deben ser transparentes, significativas y francas para que sean efectivas.

6. Mejores técnicas disponibles para la incineración

Además de aplicar mejores prácticas ambientales a la incineración de desechos sólidos urbanos, existe toda una serie de técnicas comprobadas para la ingeniería de la combustión, la depuración de gases de combustión y la gestión de residuos para

prevenir la formación o disminuir las liberaciones de las sustancias del Anexo C. Para un análisis detallado de lo que significan mejores técnicas disponibles para la incineradoras de desechos, remitimos al Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos de la Comisión Europea I (European Commission 2006, versión en inglés).

También existen tecnologías alternativas nuevas que no son de incineración (véase sección III.C (ii) de estas directrices) y que pueden representar alternativas viables y ambientalmente racionales a la incineración. El objetivo de este apartado, no obstante, es determinar las mejores técnicas aplicables al proceso de incineración. Las mejores técnicas disponibles para la incineración implican el diseño, operación y mantenimiento de una planta incineradora de desechos que disminuya eficazmente la formación y liberación de las sustancias del Anexo C.

Al analizar las mejores técnicas disponibles que se describirán a continuación para la incineración de desechos, es importante considerar que la solución óptima para un tipo específico de planta incineradora dependerá de las condiciones locales. Las mejores técnicas disponibles que aquí se exponen no deben considerarse como un listado en el que se indique la solución idónea, ya que para ello habría que analizar las condiciones locales con mucho detalle, cosa que no permiten estas directrices generales sobre mejores técnicas disponibles. Por consiguiente, limitarse a combinar algunos elementos que se describen como mejores técnicas disponibles en estas directrices sin considerar las condiciones locales puede que no sea la solución óptima en función del medio ambiente en su totalidad (European Commission 2006).

Con una combinación apropiada de medidas primarias y secundarias, los niveles de PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas de un máximo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (con 11% O₂) se asocian a mejores técnicas disponibles. Se observa además que en condiciones normales de funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian con niveles de concentración de PCDD/PCDF bastante inferiores a 0.1 ng EQT-I/l.

Como ejemplo ilustrativo de guía multimedia, Japón estableció en 1997 un objetivo futuro para la cantidad total de liberaciones de PCDD/PCDF de 5 mg EQT-I/tonelada de desecho, que no se refiere solamente al contenido de PCDD/PCDF en emisiones de gas sino también al contenido en cenizas volantes y de fondo (para comparaciones véase el apartado 3, Tabla 3 *supra*).

Es preciso mencionar que la mayor parte de las conclusiones sobre mejores técnicas disponibles que figuran en esta sección se tomaron del Documento sobre incineración de desechos de la Comisión Europea (European Commission 2006). Hay muchas plantas incineradoras de desechos en todo el mundo diseñadas y operadas conforme a la mayoría de los parámetros que definen a las mejores técnicas disponibles, y que registran los niveles de emisiones asociados a ellas.

6.1 Selección del sitio

A continuación se presentan algunos factores locales que deben tomarse en consideración para la incineración de desechos:

- Las circunstancias ambientales locales, por ejemplo, la calidad ambiental preexistente puede influir en el desempeño de la planta en cuanto a liberaciones, o en la disponibilidad de ciertos recursos.
- La naturaleza particular del desecho o desechos generados localmente y los efectos de la infraestructura para gestión de desechos sobre el tipo y naturaleza de los desechos que llegan a la planta.
- El costo y la factibilidad de aplicar una técnica particular considerando sus ventajas potenciales, lo que es de especial pertinencia cuando se analiza el desempeño de las plantas existentes.
- La disponibilidad, grado de utilización y costo de las opciones para recuperar y eliminar los residuos generados por la planta.
- La existencia de usuarios para la energía recuperada y el precio que se obtiene de ella.
- Los factores económicos, comerciales y políticos locales que puedan incidir en la tolerabilidad de alzas en las tarifas de recepción derivadas de la incorporación de ciertas alternativas tecnológicas.

6.2 Mejores técnicas disponibles para el ingreso y control de desechos

- Mantener el sitio en un estado de aseo y limpieza generales.
- Establecer y mantener controles de calidad para el ingreso de desechos, según las clases de desechos que puedan recibirse en la planta, lo que implica:
 - Fijar las limitaciones del proceso de ingreso y determinar los riesgos principales
 - Comunicarse con los proveedores de los desechos para mejorar el control de calidad de los desechos entrantes
 - Controlar la calidad de la alimentación de los desechos *in situ*
 - Revisar, muestrear y evaluar desechos entrantes
 - Utilizar detectores de material radiactivo

6.3 Mejores técnicas disponibles para la combustión

Las condiciones de combustión óptimas implican:

- Mezclar el combustible con aire para disminuir la permanencia de de concentraciones de productos de combustión con una gran carga de combustible.
- Obtener temperaturas lo suficientemente altas en presencia de oxígeno para destruir las especies de hidrocarburos.

- Prevención de zonas de enfriamiento o corredores de baja temperatura que permitan que salga de la cámara de combustión combustible parcialmente reaccionado.

Una administración adecuada del tiempo, temperatura y turbulencia (“las tres *tes*”), así como de oxígeno (flujo de aire), gracias a un buen diseño y funcionamiento del incinerador, ayudará a garantizar las condiciones aquí mencionadas. Con la mayor parte de las tecnologías se requieren temperaturas de 850°C o superiores (ej., para los desechos que contienen sustancias orgánicas halogenadas, expresadas como cloro, >1% por encima de 1100°C) para lograr una combustión completa. La turbulencia, por medio de la mezcla de combustible y aire, ayuda a prevenir la formación de puntos fríos en la cámara de combustión y la acumulación de carbono, que pueden reducir la eficiencia de la combustión. El tiempo de residencia recomendado en la cámara de combustión secundaria del horno primario es de 2 segundos con 6% de oxígeno, por lo menos.

6.3.1 Técnicas generales de combustión

1. Asegurarse de que la construcción del horno se ajuste a las características de los desechos que se procesarán.
2. Mantener las temperaturas en las zonas de combustión de fase gaseosa en la escala óptima para completar la oxidación de los desechos (por ejemplo, 850°C – 950°C en incineradores de parrilla para desechos sólidos urbanos, y 1100°C – 1200°C cuando los desechos tienen un alto contenido de cloro).
3. Prever un tiempo de residencia suficiente (ej., al menos 2 segundos con 6% de oxígeno) y una mezcla turbulenta en la cámara o cámaras de combustión para completar la incineración.
4. Precalentar el aire primario y secundario para facilitar la combustión.
5. Efectuar, en lo posible, procesos continuos en lugar de por partidas para disminuir las liberaciones del encendido y apagado.
6. Establecer sistemas para vigilar parámetros críticos de combustión como temperatura, caídas de presión, niveles de CO, CO₂ y O₂ y, cuando proceda, velocidad de las parrillas.
7. Prever intervenciones de control para ajustar la alimentación de desechos, velocidad de las parrillas, y temperatura, volumen y distribución del aire primario y secundario.
8. Instalar quemadores auxiliares automáticos para mantener las temperaturas óptimas en la cámara o cámaras de combustión.
9. Utilizar el aire de los silos y las instalaciones de almacenamiento como aire de combustión.
10. Instalar sistemas que detengan automáticamente la alimentación de desechos cuando los parámetros de combustión no sean los adecuados.

6.3.2 Técnicas de incineración de desechos sólidos urbanos

1. Los incineradores de desechos en bruto (parrilla móvil) son de uso generalizado en la combustión de desechos sólidos urbanos heterogéneos y tienen un largo historial de funcionamiento.
2. Los incineradores de parrilla enfriados con agua tienen las ventajas adicionales de un mejor control de la combustión y la capacidad de procesar desechos sólidos urbanos con un mayor contenido calorífico.
3. Los hornos rotatorios con parrillas pueden recibir desechos sólidos urbanos heterogéneos pero tienen un menor rendimiento que los incineradores de desechos en bruto o de parrilla móvil.
4. Los hornos de parrillas estáticas con sistemas de transporte (por ejemplo, compuertas) tienen menos partes móviles pero los desechos pueden requerir más pretratamiento (es decir, trituración, separación).
5. Los diseños modulares con cámaras secundarias de combustión dan buen resultado en aplicaciones de menor envergadura. Según el tamaño, estas unidades requieren operar por lotes.
6. Los hornos de lechos fluidizados y hornos con cargador/esparcidor resultan idóneos los para desechos muy desmenuzados y uniformes, como el combustible derivado de basura.

6.3.3 Técnicas de incineración para desechos peligrosos

1. Los hornos rotatorios dan buen resultado en la incineración de desechos peligrosos y pueden recibir líquidos y pastas además de sólidos.
2. Los hornos con enfriamiento por agua pueden funcionar a temperaturas más elevadas y recibir desechos con alto valor energético.
3. La aplicabilidad de calderas para recuperar el calor de los desechos debería considerarse detenidamente, en particular con respecto a la posibilidad de reformación de PCDD/PCDF.
4. La uniformidad (y combustión) de los desechos puede mejorar triturando los tambores y otros desechos peligrosos empaquetados.
5. Un sistema ecualizador de la alimentación (por ejemplo, transportadores helicoidales que puedan aplastar el material y proporcionar una cantidad constante de desechos sólidos peligrosos al horno) ayudará a garantizar una alimentación continua y controlada al horno, así como a mantener condiciones de combustión uniformes.

6.3.4 Técnicas de incineración para lodos de alcantarillado

1. Los incineradores de lecho fluidizado dan buen resultado en el tratamiento térmico de lodos de alcantarillado.

2. Los hornos de lecho fluidizado circulante permiten una flexibilidad en cuanto a combustible mayor que los de lechos burbujeantes, pero precisan ciclones para conservar el material del lecho.
3. Se debe tener cuidado con las unidades de lecho burbujeante para evitar obstrucciones.
4. El uso del calor recuperado del proceso para el secado de lodos reducirá la necesidad de combustible auxiliar.
5. Las tecnologías de suministro son importantes en la coincineración de lodos de alcantarillado en incineradores de desechos sólidos urbanos. Las técnicas comprobadas son: pulverizado de lodo seco, introducción del lodo drenado por medio de rociadores, distribuyéndolo y mezclándolo en la parrilla, y la mezcla del lodo seco o drenado con desechos sólidos urbanos como alimento combinado (European Commission 2006)².

6.4 Mejores técnicas disponibles para el tratamiento de gases de combustión

Son importantes el tipo y orden de los procesos de tratamiento aplicados a los gases de combustión una vez que salen de la cámara de incineración, tanto para el funcionamiento óptimo de los dispositivos como para la rentabilidad general de la planta. Los parámetros de la incineración de desechos que afectan la selección de las técnicas son: tipo, composición y variabilidad de los desechos, tipo de proceso de combustión, temperatura y flujo de los gases de combustión, y necesidad, y disponibilidad, de un tratamiento de aguas residuales. Las siguientes técnicas de tratamiento tienen efectos directos o indirectos en la prevención de la formación y disminución de liberaciones de las sustancias del Anexo C. Las mejores técnicas disponibles implican la adopción de la mejor combinación de sistemas de depuración de gases de combustión.

6.4.1 Técnicas de eliminación de polvo (material particulado)

1. La eliminación del polvo de los gases de combustión es esencial para todo el funcionamiento del incinerador.
2. Los precipitadores electrostáticos y los filtros de tela han resultado efectivos para la captura de partículas en gases de combustión de incinerador. En la Tabla 3 de la sección III.C (iv) de las presentes directrices puede verse una comparación de los sistemas primarios para eliminación de polvo.
3. Los ciclones y multiciclones son menos eficientes en la eliminación de polvo y sólo deberían usarse como una forma de predesempolvamiento para eliminar las partículas más gruesas de los gases de combustión y reducir la carga de polvo en los pasos siguientes. La separación previa de partículas gruesas disminuirá la cantidad de cenizas volantes contaminadas con altas cargas de contaminantes orgánicos persistentes.
4. La eficacia de la recolección de precipitadores electrostáticos se reduce a medida que aumenta la resistividad eléctrica del polvo, factor que debería

tomarse en cuenta en situaciones en que la composición de los desechos cambia rápidamente (ej., incineradores de desechos peligrosos).

5. Los precipitadores electrostáticos y los filtros de tela deberían operar a menos de 200°C para disminuir la formación de PCDD/PCDF y de las otras sustancias del Anexo C.
6. Los precipitadores electrostáticos húmedos pueden capturar partículas muy pequeñas pero requieren un tratamiento del efluente y normalmente se utilizan después del desempolvado.
7. Los filtros de tela (filtros de manga) son muy utilizados en la incineración de desechos y además, cuando se usan en conjunto con la inyección de sorbente semiseco (secado por pulverización), tienen la ventaja de proporcionar mayor filtración y una superficie reactiva en la torta de filtro.
8. La disminución de la presión al paso de los filtros de tela y la temperatura de los gases de combustión (si se utiliza un sistema de depuración al inicio del proceso) se deberían monitorear para asegurarse de que la torta de filtro esté en su lugar y que las mangas no tengan filtraciones o se estén humedeciendo. Un sistema de detección de filtraciones con un detector triboeléctrico es una alternativa para controlar el funcionamiento de los filtros de tela.
9. Los filtros de tela pueden dañarse por efecto del agua y la corrosión; las corrientes de gas deben mantenerse por encima de la temperatura de punto de rocío (130°C – 140°C) para evitarlo. Algunos materiales de filtro son más resistentes. Para una explicación de las alternativas y características de los materiales de filtro véase la Tabla 2 en la sección III.C (iv) de las presentes directrices.

6.4.2 Técnicas de eliminación del gas ácido

1. Los depuradores húmedos son los más eficientes para la eliminación de gases ácidos solubles entre las técnicas probadas en que el pH del agua del depurador es indicativo de la eficiencia de eliminación. Las partículas sólidas del agua del depurador también pueden generar interacción con PCDD/PCDF en la corriente de gas, influyendo así en la fiabilidad de la relación entre los resultados obtenidos del monitoreo de los gases de chimenea y el rendimiento efectivo de la planta.
2. El desempolvado previo del flujo de gas puede ser necesario para evitar obstrucciones del depurador, a no ser que éste tenga la suficiente capacidad.
3. El uso de materiales impregnados de carbón, carbón activado o coque en los materiales del empaquetado del depurador puede llegar a reducir en un 70% los PCDD/PCDF del depurador (European Commission 2006), aunque puede que no se refleje en las emisiones totales.

4. Los secadores por pulverización (depuración semihúmeda) también poseen gran eficiencia de eliminación, con la ventaja de no requerir un tratamiento posterior de los efluentes. Además de los reactivos alcalinos agregados para eliminar el gas ácido, la inyección de carbón activado también es eficaz en la eliminación de PCDD/PCDF así como de mercurio. Además, los sistemas de depuración mediante secado por pulverización obtienen habitualmente un control de 93% de SO₂ y 98% de HCl.
5. Los secadores por pulverización, como se mencionó anteriormente, suelen aplicarse antes que los filtros de tela. Los filtros se encargan de la captura de reactivos y productos de reacción además de proporcionar una superficie reactiva adicional sobre la torta de filtro.
6. La temperatura de entrada a los filtros de tela en estas combinaciones es importante. Normalmente se precisan temperaturas superiores a 130°C – 140°C para evitar la condensación y corrosión de las mangas.
7. Con respecto a la eliminación de gas ácido, los sistemas de depuración seca no pueden lograr la eficiencia de los depuradores húmedos o semihúmedos (secado por pulverización) sin aumentar significativamente la cantidad de reactivo/sorbente. El aumento en el uso de los reactivos incrementa el volumen de cenizas volantes.

6.4.3 Técnicas de refinamiento de gases de combustión

1. La eliminación de polvo adicional puede ser conveniente antes de enviar los gases de combustión depurados a la chimenea. En las técnicas para refinar los gases de combustión se emplean filtros de tela, precipitadores electrostáticos húmedos y depuradores tipo Venturi.
2. La filtración doble (filtros en serie) puede lograr habitualmente eficiencias de recolección de polvo de 1 mg/m³ o menos.
3. Las ventajas adicionales de estas técnicas pueden ser escasas, y poca la rentabilidad, si ya se aplican técnicas efectivas al inicio del proceso.
4. Donde el refinamiento de los gases de combustión puede tener más utilidad es en plantas de gran tamaño y en la depuración a fondo de flujos de gas antes de reacciones catalíticas selectivas.
5. La adsorción puede realizarse mediante la inyección de carbón activado, en lechos estáticos o con materiales impregnados de carbón.

6.4.4 Técnicas de eliminación por óxidos de nitrógeno (NO_x) usando un catalizador

1. Aunque la función primaria de una reacción catalítica selectiva es reducir las emisiones de NO_x, esta técnica también puede destruir sustancias del Anexo C en fase gaseosa (por ejemplo, PCDD/PCDF) con una eficiencia de 98–99.5% (European Commission 2006).

2. Los gases de combustión pueden requerir recalentamiento a los 250°C – 400°C necesarios para el funcionamiento apropiado del catalizador.
3. El desempeño de los sistemas de reacción catalítica selectiva es mejor con un refinamiento de los gases de combustión en los procesos previos. Estos sistemas se instalan después del desempolvamiento y de la eliminación de gas ácido.
4. Los notables costos (de capital y energía) de la reacción catalítica selectiva pueden ser solventados con más facilidad por instalaciones grandes, que tienen mayores flujos de gas y economías de escala.

6.5 Técnicas de gestión para residuos sólidos

Los desechos y residuos derivados de la incineración se componen de diversos tipos de cenizas (ej., cenizas de fondo, cenizas de caldera, cenizas volantes) y residuos de otros procesos de tratamiento de gases de combustión (como yeso proveniente de los depuradores húmedos), incluidos los efluentes líquidos en el caso de los sistemas de depuración húmeda.

Los depuradores secos y semihúmedos generalmente producen cantidades de desechos sólidos mayores que los depuradores húmedos. Además, estos desechos pueden contener cenizas volantes (si no se separan eficientemente), metales pesados (sobre todo, mercurio) y sorbentes sin reaccionar.

Como los componentes problemáticos pueden variar considerablemente, conviene en general mantener la separación de residuos para tratamiento, gestión y eliminación. La presencia y concentración de las sustancias del Anexo C en estos residuos (si se tratan en forma separada) está en función de su presencia en los desechos entrantes, su supervivencia o formación en el proceso de incineración, y formación y captura durante el tratamiento de gases de combustión. Las técnicas que pueden considerarse se presentan en detalle en las Orientaciones Técnicas de Basilea, capítulo IV, G 3, y también en la sección III.C (iv), subsecciones 2.1.2 y 2.2 de estas directrices. Será necesario establecer en cada caso cuáles de estas técnicas pueden considerarse mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.

6.5.1 Técnicas de tratamiento para cenizas de fondo y de caldera

Las cenizas de fondo derivadas de incineradores diseñados y operados según mejores técnicas disponibles (es decir, incineradores con un buen comportamiento de combustión) suelen tener un muy bajo contenido de las sustancias del Anexo C, de un orden de magnitud parecido al de las concentraciones de fondo en suelos urbanos (es decir, <1–10 ng EQT-I /kg de ceniza). Los niveles de cenizas de caldera tienden a ser superiores (20–500 ng EQT-I /kg de ceniza) pero en ambos casos se encuentran muy por debajo de las concentraciones promedio encontradas en las cenizas volantes (European Commission 2006).

Por las diferencias en la concentración de los contaminantes, la mezcla de cenizas de fondo con cenizas volantes contaminará las primeras y está prohibida en muchos países.

La recolección y almacenamiento separados de estos residuos facilitan a los operadores su eliminación.

En muchos países, las cenizas de fondo (o escoria de los incineradores de lecho fluidizado) se expiden a rellenos sanitarios, pero puede reutilizarse en materiales de construcción y en la construcción de carreteras, una vez pretratamiento. Antes de usarlas, no obstante, debería evaluarse su contenido y lixivialidad y deben definirse los niveles más altos de contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados y otros parámetros.

Las técnicas de pretratamiento posibles son: tratamiento seco, húmedo y térmico, así como selección trituración y separación de metales.

Se sabe que la lixivialidad de las sustancias del Anexo C aumenta junto con el pH y las condiciones húmicas (presencia de materia orgánica). Por ello, parece preferible su eliminación en instalaciones selladas y exclusivas en lugar de vertederos que reciben desechos mixtos.

6.5.2 Técnicas de gestión para el tratamiento de residuos de gases de combustión

A diferencia de las cenizas de fondo, los residuos de los dispositivos para control de la contaminación atmosférica, incluidas las cenizas volantes y los lodos de depuradores, poseen concentraciones relativamente altas de metales pesados, contaminantes orgánicos (en particular, PCDD/PCDF), cloruros y sulfuros. La eliminación por separado de cenizas volantes y residuos procedentes de las etapas de limpieza de gases de combustión (ej., para la eliminación de gas ácido y dioxinas) impide que se mezclen fracciones de desechos poco contaminadas con las altamente contaminadas.

Cuando las cenizas de fondo se vayan a reutilizar (ej., como material de construcción), la combinación con otros residuos de gases de combustión no constituye una de las mejores técnicas disponibles.

En muchos países, las cenizas volantes son enviadas a vertederos sanitarios exclusivos. Sin embargo, para que esta práctica constituya una MTD es probable que se deba exigir un pretratamiento (véase asimismo la sección III.C (iv), subsecciones 2.1.2 y 2.2).

6.6 Mejores técnicas disponibles para el tratamiento de efluentes

En la incineración, las aguas residuales de procesos provienen principalmente del uso de tecnologías de depuración húmeda. Puede reducirse esta necesidad de aguas residuales y su tratamiento con el uso de sistemas secos y semihúmedos.

Las mejores técnicas disponibles para el tratamiento de aguas residuales consisten en optimizar la recirculación y reutilización en la misma planta del agua residual que se produce, el uso de sistemas separados para el tratamiento de aguas residuales con distintos grados de contaminación, el uso de tratamientos físico-químicos de los efluentes del depurador y la eliminación de amoníaco, en caso necesario. Para eliminar compuestos orgánicos se emplean filtros de coque activado y polímeros impregnados con carbón.

Con una combinación de técnicas de tratamiento adecuadas (véase también la sección III.C sobre Consideraciones transectoriales) los niveles de PCDD/PCDF en el agua residual tratada serán del orden de <0.01–0.1 ng EQT-/l (European Commission 2006).

6.7 Efecto de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en otros contaminantes

En la descripción de técnicas y prácticas en esta orientación provisional se pone de relieve, ante todo, su efectividad comprobada para prevenir, disminuir o reducir la formación y liberación de las sustancias del Anexo C. Muchas de estas prácticas sirven también para reducir emisiones de otros contaminantes, y algunas pueden estar concebidas inicialmente con tal fin (ej., la separación en origen de metales y otros materiales no combustibles de los flujos de desechos, la reducción catalítica selectiva para controlar el NO_x, los controles de gas ácido para reducir el SO₂, la absorción por carbón para control del mercurio). Algunas técnicas pensadas para captar otros contaminantes (ej., los precipitadores electrostáticos de alta temperatura de entrada) han tenido que ser rediseñadas o reemplazadas para evitar incrementos en la formación y liberación de las sustancias del Anexo C.

En última instancia, las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para la incineración de desechos no se reducen al efecto que puedan tener en las sustancias del Anexo C, ya que se refieren a todos los aspectos de la incineración, la recuperación de energía, el tratamiento de gases de combustión, el tratamiento de aguas residuales y los procesos de tratamiento de residuos. La gran mayoría de estas técnicas, no obstante, son complementarias de los objetivos de prevención o reducción de las liberaciones de las sustancias de Anexo C (en cuanto a co-beneficios, véase la sección III.C (iii) de estas directrices).

6.8 Incineradores nuevos y con importantes modificaciones

El Convenio de Estocolmo (Anexo C, Parte V, sección B, inciso (b)) establece que antes de que las Partes aprueben propuestas de construir o realizar importantes modificaciones a fuentes que liberan las sustancias del Anexo C, deberían “considerarse de manera prioritaria” los “procesos, técnicas o prácticas de carácter alternativo que tengan similar utilidad, pero que eviten la formación y liberación” de estos compuestos. En los casos en que, habiéndose efectuado tal estudio, se decida proceder a la construcción o modificación, el Convenio presenta a consideración un conjunto de medidas de reducción generales. Si bien estas medidas generales se han incorporado al análisis anterior de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para estas categorías, hay factores adicionales que serán importantes a la hora de decidir si es factible construir o modificar una planta incineradora de desechos. Las repercusiones directas e indirectas sobre la salud humana y el medio ambiente deberían preverse por medio de una adecuada evaluación del impacto ambiental. Además, deberían considerarse los siguientes otros factores:

6.8.1 Otros factores en la instalación de nuevas incineradoras de desechos sólidos urbanos

1. ¿Se ha previsto con precisión la naturaleza y volumen de la generación de desechos sólidos urbanos no reciclables en el área de operación?
2. ¿El suministro de desechos permitirá el funcionamiento continuo del incinerador?
3. ¿Esta previsión toma en cuenta los programas de disminución, reciclaje y recuperación de desechos pertinentes?
4. ¿La infraestructura de transporte es suficiente para la recolección y transporte?
5. ¿Se ha investigado la eventualidad de restricciones al transporte local o interestatal de desechos?
6. ¿Puede accederse a mercados para algunos de los materiales separados *in situ*?
7. ¿Puede accederse a mercados para el vapor o electricidad excedentes generados *in situ*?
8. ¿Hay opciones ambientalmente racionales para el tratamiento y eliminación de residuos?

6.8.2 Otros factores en la instalación de nuevas incineradoras de desechos peligrosos

1. ¿Se ha previsto con precisión la naturaleza y volumen de la generación de desechos peligrosos en el área de operación?
2. ¿El suministro de desechos permitirá el funcionamiento continuo del incinerador?
3. ¿La infraestructura es suficiente para cubrir las necesidades de transporte?
4. Si se ha previsto transporte internacional, ¿existen los acuerdos necesarios que permitan el movimiento transfronterizo?
5. ¿Se han hecho los acuerdos necesarios con los proveedores para garantizar el embalaje y manejo en condiciones de seguridad?
6. ¿Puede accederse a mercados para el vapor o electricidad excedentes generados *in situ*?
7. ¿Hay opciones ambientalmente racionales para el tratamiento y eliminación de residuos?

6.8.3 Otros factores en la instalación de nuevos incineradores de lodos de alcantarillado

1. ¿Se ha previsto con precisión la naturaleza y volumen de la generación de lodos de alcantarillado en el área de operación?
2. ¿El suministro de desechos permitirá el funcionamiento continuo del incinerador?
3. ¿Se ha determinado si los lodos de alcantarillado en el área de servicio están mezclados con desechos industriales u otros desechos?
4. ¿Se pretende co-incinerar lodos de alcantarillado con desechos sólidos urbanos o como combustible complementario en instalaciones de servicios públicos?
5. ¿Puede accederse a mercados para el vapor o electricidad excedentes generados *in situ*?
6. ¿Hay opciones ambientalmente racionales para el tratamiento y eliminación de residuos?

6.9 Modificación de incineradoras de desechos existentes

Cabe prever modificaciones significativas a una incineradora de desechos existente por diversas razones, por ejemplo, para ampliar su capacidad, efectuar reparaciones necesarias, mejoras para aumentar la eficiencia de la combustión y la recuperación de energía, y para modernizar los equipos de control de la contaminación atmosférica y tratamiento de aguas residuales. Muchas plantas de incineración de desechos ya se han modernizado con estos dispositivos, con lo que ha mejorado enormemente su desempeño ambiental. Antes de llevar a cabo una modificación, además de las "consideraciones prioritarias" mencionadas anteriormente, será importante considerar los siguientes factores:

1. ¿Cómo afectará la modificación las liberaciones potenciales de las sustancias del Anexo C?
2. Si la modificación consiste en añadir un dispositivo de control de la contaminación atmosférica, ¿su diseño es apropiado para la instalación?
3. ¿Hay espacio suficiente para su instalación y operación según las mejores técnicas disponibles? Por ejemplo, el espacio disponible puede requerir una modernización de doble filtración (filtros en serie, aunque no necesariamente adyacentes) en vez de un sistema de depuración alternativo.
4. ¿El dispositivo modernizado operará concertadamente con los dispositivos de control de contaminación atmosférica y de agua residual existentes para disminuir las liberaciones?

Los costos de realizar modificaciones a una instalación existente dependen de la situación de cada planta y pueden representar montos de 25% a 50% superiores a los costos de cambios similares para una instalación nueva (European Commission 2006). Los factores que influyen en este aumento tienen que ver con la ingeniería adicional

necesaria, el retiro y la eliminación del equipo reemplazado, la reconfiguración de conexiones, y las pérdidas de productividad por la interrupción de actividad.

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Con una combinación apropiada de medidas primarias y secundarias, se asocian a mejores técnicas disponibles los niveles de PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas de un máximo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (con 11% O₂). Se observa además que en condiciones normales de funcionamiento se pueden obtener emisiones inferiores en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se encuentran asociadas a niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/l.

Referencias

Austrian Waste Incineration Ordinance, Fed. Law Gazette Nr. II 389/2002

Basel Convention Secretariat. 2002. *Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Biomedical and Health-Care Waste*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.

European Commission. 2006. *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm.

European Council Directive on the landfill of waste (1999/31/EC)

European Directive on the Incineration of Waste (2000/76/EC)

Stubenvoll J., Böhmer S. et al. 2002. *State of the Art for Waste Incineration Plants*. Umweltbundesamt, Vienna.

www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/pdfs/english_version.pdf.

Umweltbundesamt Berlin. 2001. Draft of a German Report for the creation of a BREF-document "Waste Incineration" Umweltbundesamt Berlin.

UNEP (United Nations Environment Programme) Basel Convention Technical Guidelines: General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs); 2005.

(ii) Desechos médicos

■ Resumen

La incineración de desechos médicos (desechos sanitarios infecciosos, desechos biológicos y objetos cortantes) se efectúa en plantas incineradoras de desechos exclusivas a fin de evitar al máximo los riesgos químicos, biológicos y físicos, y reducir el volumen de desechos como etapa de tratamiento previo a la expedición a rellenos sanitarios ambientalmente racionales.

Si los desechos médicos se incineran en condiciones que no constituyen mejores técnicas disponibles o mejores prácticas ambientales, las concentraciones de PCDD y PCDF emitidas pueden ser relativamente altas. En el caso de pequeñas incineradoras de desechos médicos, suele ser difícil aplicar mejores técnicas disponibles, por lo elevado de los costos asociados a la construcción, funcionamiento, mantenimiento y vigilancia de estas instalaciones.

Las alternativas posibles a la incineración son la esterilización (vapor, sistemas mejorados, calor seco), el tratamiento por microondas, la hidrólisis alcalina, el tratamiento biológico o, en ciertos casos, el vertido en rellenos sanitarios. El paso más importante en la gestión de desechos médicos consiste en separar los distintos tipos de desechos desde su origen. En vista de que de 75% a 90% de los desechos de hospitales son comparables a los desechos sólidos urbanos, la separación disminuye enormemente la cantidad de desechos médicos. Es esencial una gestión eficaz de los desechos, en particular la reducción y separación de los desechos desde su origen.

El tratamiento adecuado de cenizas de fondo y residuos generados por la depuración de gases de combustión es primordial para disminuir las liberaciones de PCDD/PCDF al medio ambiente. El uso de mejores técnicas disponibles en las incineradoras reducirá asimismo las emisiones de ácido clorhídrico y metales (en particular, mercurio) y, de hecho, también reducirá las posteriores emisiones de los residuos depositados en vertederos sanitarios.

En cuanto a la incineración, tan solo las medidas primarias reducirán ya significativamente la emisión de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Sin embargo, la aplicación de las mejores prácticas disponibles requiere medidas primarias y también secundarias.

Con una combinación apropiada de medidas primarias y secundarias, se asocian a mejores técnicas disponibles los niveles de desempeño de un máximo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (con 11% O₂) para PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas. Se observa además que en condiciones normales de funcionamiento se pueden obtener emisiones inferiores a este nivel en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian a niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/l.

1. Introducción

En esta sección se abordan las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el tratamiento (térmico) de desechos médicos (de ahora en adelante, desechos sanitarios), ya que, en la Parte II, el Convenio de Estocolmo considera las incineradoras de desechos médicos como una categoría de fuente que puede generar importantes emisiones de las sustancias del Anexo C del Convenio.

En esta sección se tratará casi exclusivamente de desechos sanitarios infecciosos. Cuando los desechos comparables a los desechos domésticos se separan adecuadamente de los desechos infecciosos, pueden ser derivados hacia los mecanismos de eliminación de desechos urbanos. En cambio, si no existen prácticas de separación de desechos eficaces, o no habiendo sistemas de gestión y capacitación necesarios para mantenerlas, la cantidad total de desechos potencialmente infecciosos que requiere tratamiento aumenta drásticamente.

Hay otras técnicas para tratar desechos sanitarios, como la esterilización de desechos infecciosos, que no generan emisiones de las sustancias del Anexo C. Ya se han descrito las ventajas, inconvenientes y aplicabilidad de estas técnicas, por lo que no explicarán en detalle en esta sección.

2. Categorías de desechos sanitarios

Los hospitales producen grandes cantidades de desechos que corresponden a distintas categorías. Los desechos médicos también pueden provenir de otras fuentes, como son los servicios de emergencias médicas, centros de transfusión o diálisis, laboratorios, prácticas de investigación con animales y bancos de sangre. Entre el 75% y el 90% de los desechos producidos no son peligrosos o son desechos médicos generales, comparables a los desechos domésticos. En su mayoría provienen de las actividades administrativas y de aseo de los establecimientos hospitalarios y también pueden contener desechos derivados del mantenimiento de las instalaciones. El 10%–25% restante de los desechos médicos se considera peligroso y puede implicar diversos riesgos para la salud. Menos del 10% de estos desechos es de naturaleza infecciosa. Otros tipos de desechos son las sustancias tóxicas, los medicamentos citotóxicos y los desechos inflamables o radiactivos.

Los distintos tipos de desechos sanitarios pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Desechos sanitarios infecciosos (peligrosos)
- Objetos cortantes (peligrosos)
- Desechos anatómicos y patológicos (restos orgánicos, etc.)
- Sustancias químicas, desechos tóxicos o farmacéuticos, incluidos los medicamentos citotóxicos (antineoplásicos) (en su mayoría peligrosos)
- Desechos radiactivos
- Desechos generales no infecciosos (ej., vidrio, papel, envoltorios, alimentos)

A efectos de estas directrices, las siguientes definiciones han sido tomadas de las Directrices Técnicas sobre el Manejo Ambientalmente Racional de los Desechos Biomédicos y Sanitarios (Basel Convention Secretariat 2002).

2.1 Desechos médicos infecciosos³

Los desechos médicos infecciosos comprenden materiales descartados o equipos contaminados con sangre y sus derivados, y otros fluidos corporales o sustancias excretadas por pacientes infectados con enfermedades transmisibles peligrosas. También corresponden a desechos contaminados provenientes de pacientes que sean portadores conocidos de enfermedades de transmisión sanguínea sometidos a hemodiálisis (por ejemplo equipos de diálisis tales como tubos y filtros, sábanas desechables, ropa de cama, delantales, guantes o túnicas de laboratorio contaminadas con sangre), y desechos de laboratorio (cultivos y cepas con cualquier agente biológico viable artificialmente cultivado en cantidades importantes, platos y elementos utilizados para transferir, inocular y mezclar cultivos de agentes infecciosos, y animales infectados provenientes de laboratorios).

2.2 Desechos biológicos procedentes de la asistencia sanitaria

Los desechos biológicos procedentes de la asistencia sanitaria consisten en todas las partes corporales y otros desechos anatómicos, incluidos la sangre y los fluidos biológicos y los desechos patológicos reconocibles por el público o el personal de asistencia sanitaria, que requieran, por razones éticas, la aplicación de requisitos especiales de eliminación.

2.3 Objetos cortantes

En ésta categoría figuran todos los desechos biomédicos y sanitarios con filos o partes punzantes que puedan causar lesiones o penetrar en el organismo humano a través de la piel. Los objetos cortantes provenientes de pacientes infectados con enfermedades transmisibles peligrosas o de pabellones de aislamiento, así como otros objetos punzantes contaminados con los desechos de laboratorio antes mencionados, deben clasificarse como desechos infecciosos.

3. Técnicas alternativas para fuentes nuevas y existentes

3.1 Fuentes nuevas

Al momento de decidirse por métodos de tratamiento de desechos generados por actividades de asistencia médica, se debería dar prioridad a procesos, técnicas o prácticas alternativas que tienen una utilidad similar pero que no forman ni liberan las sustancias del Anexo C.

Por los altos costos de inversión, operación, mantenimiento y vigilancia de las incineradoras de desechos que aplican mejores técnicas disponibles, rara vez se logra un funcionamiento económico y efectivo, y más aún en el caso de las pequeñas

instalaciones de incineración que tienen los hospitales. No es de extrañar, entonces, que muchas instalaciones pequeñas sean clausuradas en lugar de modernizadas.

Por consiguiente, en muchos casos puede ser preferible la esterilización con vapor en el mismo sitio y otras técnicas de tratamiento de desechos sanitarios que no utilizan combustión. En otros, se prefieren las plantas de tratamiento de desechos centralizadas al tratamiento descentralizado *in situ* de los desechos sanitarios. El tratamiento de desechos médicos, por lo tanto, debería formar parte integral del plan de gestión de desechos de cualquier país o región.

3.2 Fuentes existentes

Por deficiencias de diseño, operación, equipamiento y vigilancia en muchas incineradoras pequeñas de hospitales, no puede considerarse que estas instalaciones utilicen mejores técnicas disponibles. Un incinerador de desechos médicos sin la tecnología necesaria para reducir la contaminación libera una gran variedad de contaminantes, incluidos PCDD/PCDF, metales (como plomo, mercurio y cadmio), material particulado, gases ácidos (cloruro de hidrógeno (HCl) y dióxido de azufre (SO₂)), monóxido de carbono (CO) y óxido de nitrógeno (NO_x). Estas emisiones tienen consecuencias negativas importantes para la seguridad de los trabajadores, la salud pública y el medio ambiente.

El costo de la modernización de instalaciones antiguas es un factor clave cuando se habla de eliminación de desechos médicos. Al evaluar los costos de una unidad de incineración que utilice mejores técnicas disponibles, los responsables de tomar las decisiones deberían considerar factores como los costos de capital y costos operativos del incinerador, además de los del depurador y otros aparatos para control de contaminación, el costo de las modernizaciones de la cámara secundaria en incineradores antiguos, los costos de pruebas periódicas en las chimeneas, el monitoreo, capacitación y acreditación del operador, y los costos de mantenimiento y reparación, sobre todo cuando se presenta desgaste o agrietado en el revestimiento refractario.

Por consiguiente, cuando se estudian técnicas alternativas para el tratamiento de desechos debe considerarse la posibilidad de clausurar las instalaciones que no estén en condiciones adecuadas, o transferir los desechos a plantas centralizadas de tratamiento de desechos sanitarios.

3.3 Técnicas alternativas

Las siguientes técnicas alternativas no generan ni liberan sustancias del Anexo C y, por lo tanto, se les debería dar prioridad para la eliminación final de estas sustancias. Independientemente, en otros aspectos podrían presentar ventajas e inconvenientes. Para más información sobre estas técnicas remitimos a Basel Convention Secretariat 2002.

Los siguientes métodos son adecuados para desechos infecciosos y biológicos y objetos cortantes, y se aplican en forma muy generalizada.⁴ Crear un programa efectivo para gestión de desechos, como se describe en el apartado 4 de esta sección, es fundamental para todas las técnicas que se describen a continuación. Los desechos químicos peligrosos, desechos quimioterapéuticos, compuestos orgánicos volátiles, mercurio y

desechos radiactivos no deberían tratarse mediante los sistemas descritos en esta sección, ya que con ello se generaría la liberación de sustancias tóxicas en el aire, los condensados o los desechos tratados.

Las técnicas alternativas como son las de esterilización, tratamiento por microondas, hidrólisis alcalina y tratamiento biológico implican, de todas formas, la eliminación final en rellenos sanitarios.

Se debería capacitar a los trabajadores en habilidades como el manejo apropiado de los desechos y el funcionamiento y mantenimiento de los equipos. También debe considerarse la exposición en el lugar de trabajo a las mismas sustancias desinfectantes por emisiones fugitivas, fugas o derrames accidentales de los depósitos de almacenamiento, descargas provenientes de la unidad de tratamiento o sustancias volatilizadas provenientes de desechos tratados o de efluentes líquidos. A veces, los desinfectantes químicos se almacenan en forma concentrada, con lo que aumentan los riesgos.

Puesto que, por lo general, los procesos químicos requieren trituración, la liberación de agentes patógenos por la formación de aerosoles puede ser motivo de preocupación. Por lo general, las tecnologías que utilizan sustancias químicas operan como sistemas cerrados o bajo presión negativa, expulsando sus emanaciones a través de filtros HEPA (absorbente de partículas de alta eficiencia) y otros filtros.

Los establecimientos médicos y hospitalarios deberían considerar los siguientes factores al seleccionar una tecnología que no utilice la incineración (Health Care Without Harm Europe 2004):

- Aceptación legal
- Capacidad de flujo
- Tipos de desechos tratados
- Eficacia de la inactivación microbiana
- Emisiones ambientales y residuos de desechos
- Requisitos de espacio
- Requisitos de instalación de servicios y otros
- Reducción de desechos
- Seguridad y salud ocupacionales
- Ruido
- Olores
- Automatización
- Fiabilidad
- Nivel de comercialización
- Antecedentes del fabricante o vendedor de la tecnología
- Costo
- Aceptación de parte de la comunidad y del personal

3.3.1 Esterilización por vapor

La esterilización por vapor o autoclave consiste en exponer los desechos a vapor saturado bajo presión en un autoclave o recipiente de presión. Con esta tecnología no se pierde la individualidad de los desechos ni reduce su volumen a menos que se agregue una trituradora o moledora. Si los flujos de desechos no se separan adecuadamente para evitar que entren sustancias químicas peligrosas (ej., medicamentos antineoplásicos o metales pesados como el mercurio) en la cámara de tratamiento, se liberarán contaminantes tóxicos en el aire, los condensados o los desechos tratados. Pueden generarse olores molestos que contienen niveles bajos de alcohol, fenoles, aldehídos y otros compuestos orgánicos pero estos olores pueden reducirse con equipos de ventilación apropiados (ej., filtros de partículas o de carbón). Sería útil contar con más análisis independientes de las emisiones de autoclaves operando en condiciones típicas.

Los autoclaves pueden ser de gran variedad de tamaños; pueden tratar desde unos pocos kilos a varias toneladas por ciclo. Los costos de capital son relativamente bajos en comparación a otras técnicas alternativas. Los autoclaves deben inspeccionarse al menos una vez al año para determinar cualquier cambio importante respecto de las lecturas anteriores de los perfiles temperatura-tiempo, presión de vacío y vapor.

El ciclo de tratamiento (el requisito mínimo es de 30 minutos a 121°C) se determina por la capacidad del calor de penetrar la carga de desechos. Algunos tipos de desechos o configuraciones de carga que crean barreras para la transferencia del calor requieren periodos de exposición más largos y/o temperaturas más altas. El nivel necesario de desinfección debe controlarse con los medios apropiados (ej., tiras de ensayo, pruebas microbiológicas).

3.3.2 Sistemas mejorados de esterilización por vapor

Los autoclaves mejorados o sistemas de esterilización avanzados a base de vapor combinan el tratamiento con vapor con prevacío y diversos tipos de procesos mecánicos antes, durante y después del tratamiento con vapor. Muchos de los sistemas mejorados también comprenden sistemas automatizados para la alimentación de desechos, vacío/deshidratación después del tratamiento, enfriamiento de desechos tratados, y filtrado del aire particulado de alta eficiencia y/o filtros de carbón para eliminar olores.

Los sistemas mejorados con trituradoras o molidoras incorporadas pueden tratar desechos que contengan objetos cortantes y también desechos patológicos, como partes anatómicas. Entre los inconvenientes hay que mencionar los costos de capital, que son relativamente altos, el ruido y los altos costos de mantenimiento de las trituradoras y otros dispositivos mecánicos.

Al igual que en la esterilización por vapor simple, la esterilización mejorada requiere una separación apropiada de los desechos para evitar liberaciones de sustancias peligrosas a los diferentes medios (véase Figura 1)

3.3.3 Tratamiento con microondas

La desinfección con microondas también es, de hecho, un proceso a base de vapor ya que la desinfección se realiza mediante la acción de calor húmedo y vapor generado por energía de microondas. Las unidades de microondas con trituradores internos pueden tratar desechos patológicos y habitualmente se utilizan para tratar desechos de objetos cortantes. Los inconvenientes son los costos de capital relativamente altos, el ruido de la trituradora, y la posibilidad de olores molestos. Pueden generarse olores molestos que contienen niveles bajos de alcohol, fenoles, aldehídos, y otros compuestos orgánicos, pero se pueden mitigar con los equipos de ventilación apropiados (ej., filtros de partículas o de carbono).

3.3.4 Esterilización con calor seco

La esterilización con calor seco consiste en exponer los desechos al calor, a temperaturas y durante periodos suficientes que garanticen la esterilización de toda la carga de desechos. Como regla general, los procesos con calor seco emplean temperaturas más altas y periodos de exposición más largos que los procesos de vapor. Normalmente tienen incorporado el proceso de trituración (para disminuir el volumen de desechos). La tecnología es simple, automatizada y de fácil uso.

Los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, desechos quimioterapéuticos, mercurio, otros desechos químicos peligrosos y desechos radiológicos no deberían tratarse en sistemas de calor seco. Pueden producirse olores molestos, que en algunos sistemas se eliminan mediante filtros para partículas de aire de alta eficiencia o filtros de carbono. El aire caliente de la cámara se enfría en un depurador Venturi, que elimina también partículas.

3.3.5 Hidrólisis alcalina

La hidrólisis alcalina (o digestión alcalina en caliente) es otro proceso químico empleado para desintegrar materiales orgánicos. El mismo proceso puede degradar agentes quimioterapéuticos, formaldehído, fijadores y otras sustancias tóxicas sin envasar. En un proceso típico se utiliza un tanque de acero inoxidable sellado en el que se mezclan los desechos con álcali calentado a temperaturas entre 110°C y 150°C. Según la cantidad de desechos, la concentración de álcalis y la temperatura, el proceso de la digestión puede tardar entre 3 y 8 horas. Los sistemas comerciales son muy automatizados. Puede requerirse tratamiento para los desechos y líquidos derivados de la hidrólisis alcalina.

3.3.6 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico consiste en el uso de microorganismos o sustancias bioquímicas para descomponer los desechos. Este proceso implica el uso de enzimas y digestión aerobia y anaerobia. Es preferible que el tratamiento se lleve a cabo en un sistema cerrado. Pueden generarse olores molestos en la aplicación de tratamiento anaerobio.

3.3.7 Rellenos sanitarios especialmente contruidos

- (a) Desechos infecciosos (ej., desechos médicos infecciosos, objetos cortopunzantes, desechos anatómicos y patológicos):

Estos desechos no deberían verterse en rellenos sanitarios. No obstante, si se esterilizan pueden considerarse desechos generales no infecciosos y pueden llevarse a rellenos sanitarios o tratarse según la sección V.A (i) *supra* (salvo los objetos cortopunzantes, que también deben considerarse en función de sus características físicas).

- (b) Desechos de sustancias químicas, tóxicas, farmacéuticas y desechos generales:

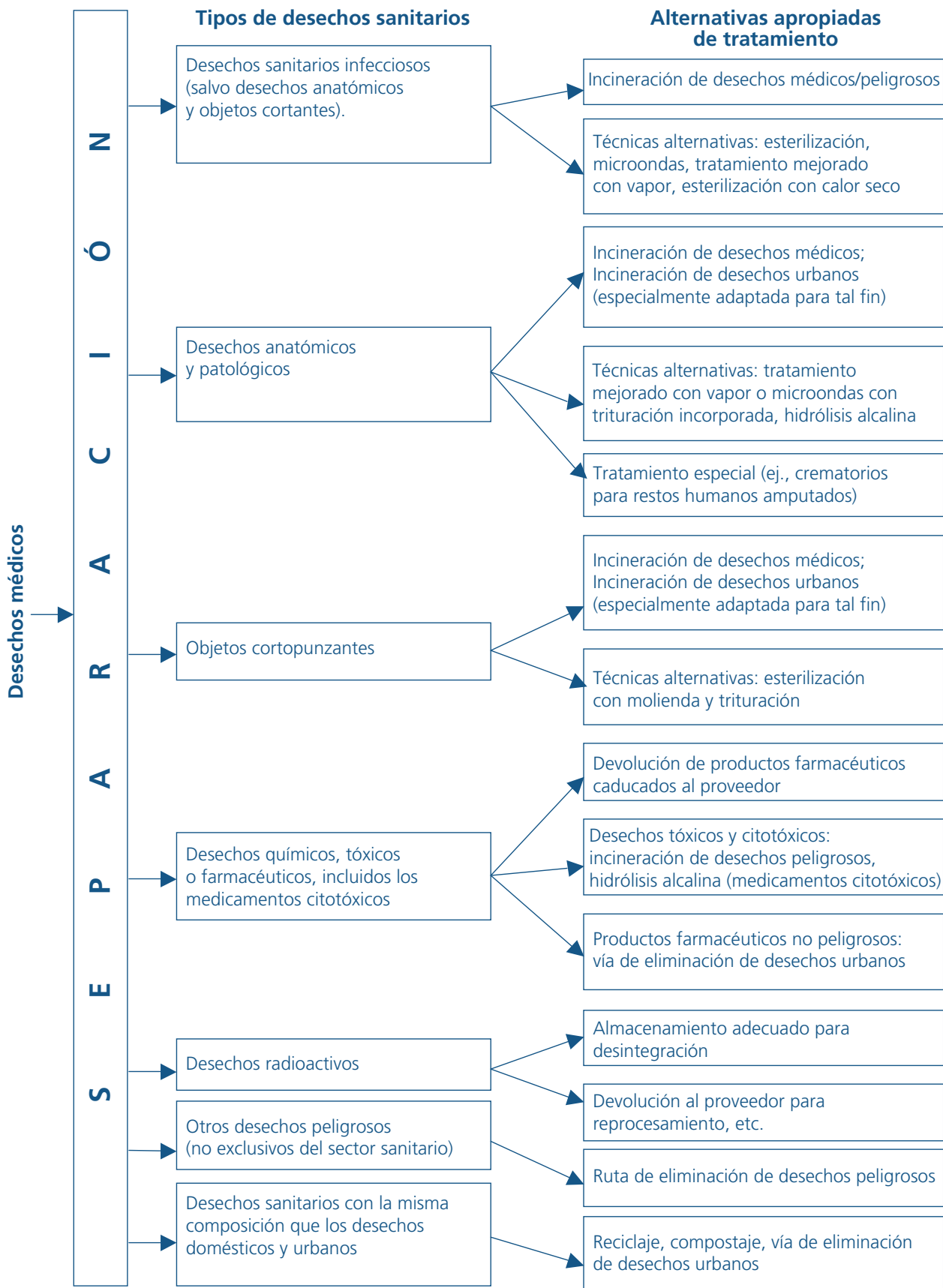
Un relleno sanitario especialmente contruido puede ser una opción para estos desechos pero se debe prestar atención a sus características físicas y químicas individuales.

- (c) Desechos radiactivos:

Estos desechos no deberían verterse en rellenos sanitarios.

En la figura 1 (Basel Convention Secretariat 2002, capítulo 2, Figura 2, adaptación) se explican las fracciones de desechos en que deberían separarse los desechos sanitarios y sugiere alternativas de tratamiento.

■ **Figura 1. Separación y alternativas de tratamiento para desechos médicos**



4. Mejores prácticas ambientales para la gestión de desechos sanitarios

Todo hospital debería tener un plan de gestión de desechos para la separación y el tratamiento minucioso de sus desechos. De esta forma pueden reducirse los costos de su eliminación final. Un plan para gestión de desechos de un hospital también puede comprender el tratamiento de ciertas fracciones de desechos provenientes de otros hospitales para reducir los costos y aumentar el desempeño ambiental de la gestión total de los desechos.

- Los objetivos principales de la gestión de desechos hospitalarios son los siguientes:
- Aminorar los riesgos para el personal, la población y el medio ambiente
- Disminuir las cantidades de desechos que se generan
- Realizar la segregación y separación de desechos
- Designar lugares para depósito en los pabellones
- Establecer vías seguras para el transporte de desechos
- Establecer un área segura y adecuada para el almacenamiento temporal
- Tratar y eliminar los desechos de manera ambientalmente racional

En el marco del Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, se publicaron las *Directrices Técnicas sobre el Manejo Ambientalmente Racional de los Desechos Biomédicos y Sanitarios* (Basel Convention Secretariat 2002). Se recomienda encarecidamente el uso y la aplicación de estas directrices, que contienen información detallada sobre los peligros de los desechos sanitarios, la gestión segura de desechos médicos, la separación y recolección adecuada de desechos, los métodos de tratamiento y eliminación, y la creación de capacidad.

En previsión del establecimiento de un plan adecuado para la gestión de desechos sanitarios, es preciso:

- Caracterizar la naturaleza y cantidad de las diferentes fracciones de desechos
- Determinar alternativas para evitar o reducir la generación de desechos (políticas de compra para evitar embalajes innecesarios, tamaños de embalaje rentabilizados, gestión de existencias, evaluación de procesos laborales, reutilización de materiales y equipos cuando sea factible y no implique riesgos)
- Establecer sistemas de capacitación y gestión para garantizar una separación y manipulación eficaces de desechos infecciosos, tóxicos y ordinarios
- Determinar los contenedores apropiados para recolección, almacenamiento y trasiego
- Establecer las responsabilidades del personal

- Describir las alternativas de tratamiento adecuadas para las distintas fracciones de desechos
- Prever la documentación y control adecuados para la eliminación de desechos
- Describir el transporte de la fracción de desechos al lugar de eliminación definitiva y el tipo de tratamiento final
- Calcular los costos de las distintas actividades

Antes de un tratamiento y eliminación eficaces, con tecnología de punta, hay ciertas prácticas que se consideran necesarias. Las prácticas que se describen a continuación pueden relacionarse directamente con formas de reducir y evitar las sustancias del Anexo C pero también representan principios generales que pueden influir en la generación de fracciones de desechos y contribuir a la seguridad del personal, de la población y el medio ambiente.

Hay gran cantidad de material sobre la gestión de desechos médicos en distintas fuentes (Basel Convention Secretariat 2002; WHO 2000; Health Care Without Harm Europe 2004), si se desea información más detallada. En estas directrices sólo se ofrece un panorama sumario de las mejores prácticas comunes.

4.1 Reducción en la fuente

Reducción en la fuente significa disminuir o eliminar la generación de desechos desde su origen. La reducción en la fuente debería tener mayor prioridad que el reciclaje o la reutilización. El personal médico, los encargados de la gestión de desechos y las instancias de normalización de productos deberían saber las proporciones del flujo de desechos que son generadas por los productos que adquieren. De hecho, una estrecha participación del personal de compras es esencial para la efectividad de cualquier programa de reducción en la fuente. Se deberían tomar medidas para reducir en la fuente los desechos médicos reglamentados, los desechos peligrosos, los desechos de bajo nivel radiactivo, así como la basura ordinaria. Algunas técnicas específicas para la reducción en la fuente (teniendo presente que los productos alternativos deben cumplir los requisitos pertinentes en términos de higiene y seguridad del paciente) son las siguientes:

- Eliminación o cambio del material, o sustitución del producto
- Cambio de tecnología o proceso
- Adquisiciones preferenciales
- Buenas prácticas operativas

4.2 Separación

Por encima de todo, la separación es la clave para la gestión eficaz de desechos médicos. Garantiza que se sigan las vías de eliminación correctas. Los desechos deberían separarse según las alternativas de tratamiento sugeridas. La separación debería efectuarse bajo supervisión del productor de los desechos y lo más cerca posible de la fuente, es decir, en el pabellón, al pie de la cama, en el anfiteatro, en el laboratorio, en la sala de partos,

etc., y debe realizarla la persona que genera el desecho, por ejemplo el personal auxiliar, el doctor o el especialista, a fin de aislar el desecho inmediatamente y de evitar los peligros de una segunda clasificación.

4.3 Recuperación y reciclaje de recursos

Algunos ejemplos específicos de medios para recuperar y reutilizar los materiales del flujo de desechos:

- Reciclar periódicos, material de embalaje, papelería de oficina, vidrio, latas de aluminio, escombros y otros materiales reciclables
- Comprar productos hechos de material reciclado después de su consumo
- Compostar los desechos de alimentos orgánicos
- Recuperar la plata de las sustancias químicas fotográficas

4.4 Capacitación del personal

El personal debería recibir instrucciones detalladas sobre los siguientes aspectos:

- Riesgos asociados con los desechos sanitarios
- Clasificación y códigos de las distintas fracciones de desechos y sus criterios de clasificación
- Costos del tratamiento de desechos
- Procesos de gestión de desechos desde su generación hasta su eliminación
- Funcionamiento y mantenimiento de plantas de tratamiento de desechos
- Responsabilidades
- Repercusiones de los errores y las deficiencias de gestión

4.5 Recolección en el sitio de generación de los desechos

- Entregar recipientes con código de color en los puntos de generación o cerca de ellos para separar los distintos tipos de desechos
- Embalar adecuadamente los desechos: deberían usarse recipientes sólidos o bolsas de plástico colocadas dentro de un contenedor rígido o semirígido para los desechos infecciosos no cortantes. Las bolsas de plástico deberían ser impermeables, y tener la consistencia necesaria para que no se rasguen o revienten en condiciones ordinarias de uso. Los recipientes para objetos cortopunzantes deberían ser rígidos, resistentes a las perforaciones y a prueba de filtraciones. Pueden ser reciclables (de metal o plástico autoclavable) o desechables (cartón grueso o plástico). Los contenedores para objetos cortopunzantes deberían tener tapa
- Rotular debidamente los recipientes de desechos, por ejemplo, 'infeccioso' o 'citotóxico'

- Los recipientes sólo deberían llenarse hasta las tres cuartas partes de su capacidad
- Los desechos muy infecciosos deberían, en lo posible, esterilizarse inmediatamente en autoclave. Por lo tanto, deberían envasarse en bolsas compatibles con el proceso de tratamiento propuesto

4.6 Transporte al área de almacenamiento intermedio

- Una vez llenos los recipientes primarios, deben trasladarse a un área de almacenamiento intermedia
- Establecer un área de almacenamiento designada siguiendo las recomendaciones de la OMS, con acceso exclusivo para personal autorizado
- El personal que maneja los desechos debe llevar vestimenta de protección (guantes, zapatos) durante la recolección, transporte y almacenamiento
- Definir claramente las vías y tiempos de transporte
- No se deberían compactar recipientes con objetos cortopunzantes u otros desechos infecciosos
- La clasificación de fracciones de desechos infecciosos no debe realizarse manualmente

5. Técnicas aplicadas a la incineración de desechos médicos

5.1 Descripción del proceso

No se deberían quemar los desechos sanitarios a cielo abierto. La incineración es un método importante para tratar y descontaminar desechos biomédicos y sanitarios. Este apartado contiene orientación sobre la incineración de las siguientes fracciones de desechos (mayormente) peligrosos: desechos sanitarios infecciosos, desechos biológicos sanitarios y objetos cortopunzantes.

La incineración es un proceso de oxidación seca a alta temperatura (850°C a 1100°C) que reduce los desechos orgánicos y combustibles a una materia inorgánica e incombustible, lo que da como resultado una disminución muy significativa del volumen y peso de los desechos.

La pirólisis es un proceso de combustión en el que se produce degradación térmica en una atmósfera carente de oxígeno a temperatura entre 500°C y 600°C.

La incineración y pirólisis sólo deberían realizarse en plantas cuya organización, funcionamiento y mantenimiento sean apropiados. El sistema debería estar concebido para las características específicas de los desechos sanitarios peligrosos (alto contenido de agua, alto contenido de plástico). Las tecnologías que a continuación se exponen son bastante sofisticadas, por lo que sólo deberían incinerarse fracciones de desechos peligrosos en las plantas que las emplean. Otros desechos sanitarios que son parecidos

a los desechos urbanos deberían separarse de antemano y someterse a otras tecnologías de tratamiento de desechos.

Si los desechos infecciosos no se incineran inmediatamente (durante 48 horas), deben depositarse en una cámara refrigerada (máximo 10°C). Las áreas de trabajo y almacenamiento deberían estar organizadas de forma que se facilite su desinfección.

Una planta de incineración se compone esencialmente de las siguientes unidades (Figura 2):

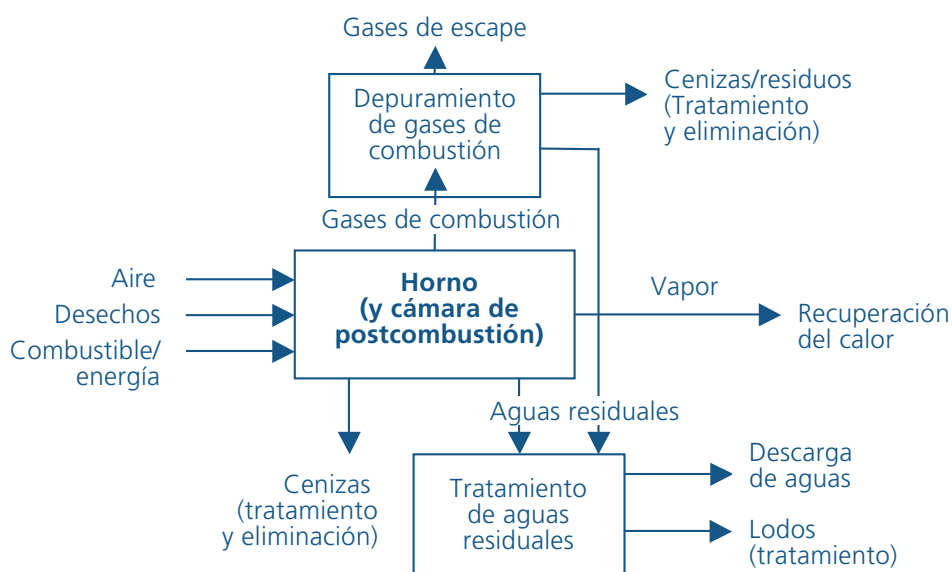
- Caldera u horno
- Cámara de postcombustión
- Dispositivos secos, húmedos y/o catalíticos para depuración de gases de combustión (incluidas las técnicas de absorción)
- Planta de tratamiento de aguas residuales (cuando se usan sistemas húmedos para tratamiento de gases de combustión)

Las siguientes tecnologías se consideran mejores técnicas disponibles para el tratamiento térmico de desechos sanitarios:

- Tratamiento pirolítico o gasificación de desechos
- Horno rotatorio
- Incinerador de parrilla especialmente adaptado para desechos sanitarios infecciosos (línea de eliminación de desechos urbanos)
- Incinerador de lecho fluidizado
- Sistemas modulares

Los incineradores de cámara simple, de tambor y de ladrillo no se consideran como mejores técnicas disponibles.

■ Figura 2. Diagrama simplificado del funcionamiento de un incinerador



5.2 Técnicas de tratamiento térmico

5.2.1 Plantas de pirólisis

Las plantas de pirólisis con cámaras de postcombustión suelen ser plantas pequeñas que operan en forma intermitente. Los desechos sanitarios vienen embalados en bidones o bolsas para carga. Las plantas de mayor tamaño deberían estar equipadas con aparatos de carga automática. En plantas con sistemas de desgasificación o de gasificación, el secado, desgasificación y gasificación se realizan en un reactor antes de la combustión.

Los desechos se introducen por cargas dentro una cámara de destilación, que se calienta hasta llegar a una temperatura suficiente para destilar los desechos. Los gases emitidos por la cámara de destilación se mezclan con una corriente de aire continua en la cámara de postcombustión y se mantienen a una temperatura de aproximadamente 900°C por co-combustión de combustible complementario. Los gases de combustión emitidos por la cámara de postcombustión se enfrían en una caldera de agua caliente conectada posteriormente y se mandan a un sistema de depuración de gases de combustión. La caldera transforma el agua en vapor, que puede utilizarse para generar electricidad para un hospital, viviendas o comercios. A fin de garantizar la suficiente combustión de las cenizas, se le enciende con quemadores de gas antes de descargarlo de la cámara de destilación. En las plantas pequeñas las fluctuaciones en el caudal y las variaciones en el contenido de los desechos incinerados se compensan con los combustibles auxiliares.

En las plantas de pirólisis el contenido de polvo de los gases de combustión es pequeño en comparación con los sistemas de combustión convencionales. Sin embargo, hay una gran demanda de combustibles adicionales, por lo que se forman grandes volúmenes de gases de combustión.

Capacidades habituales (tratamiento *in situ*): de 200 kg a 10 ton al día.

5.2.2 Horno rotatorio

Otra tecnología empleada es el horno rotatorio (véase además la sección V.A (i), subsección 2.2 de estas directrices). La combustión de desechos sanitarios puede efectuarse en pequeños hornos rotatorios (por ejemplo, en el hospital) o, lo que es más habitual, en grandes plantas donde se realiza la combustión de fracciones diversas de desechos peligrosos.

Los desechos son trasladados por medio de grúas desde el silo a la tolva para desechos, ubicada frente a la cámara de combustión. En la mayoría de los casos se acopla una esclusa a la tolva para enviar los desechos directamente al horno rotatorio. Los desechos líquidos y muy viscosos pueden alimentarse por la pared frontal. Por la inclinación y rotación del horno, los desechos avanzan y van circulando, lo que produce un contacto intenso con el aire primario que fluye a través del horno rotatorio. A diferencia de la combustión en parrilla, los hornos rotatorios son sistemas cerrados; por eso también pueden recibir materiales líquidos y muy viscosos. Los gases de escape que salen del horno rotatorio son tratados en una cámara de postcombustión. A fin de asegurar las altas temperaturas necesarias para completar la destrucción de los compuestos orgánicos (850°C – 1100°C, según el tipo de desecho), las cámaras de postcombustión

están equipadas con quemadores que se encienden automáticamente cuando la temperatura cae por debajo del valor previsto.

Al final del horno rotatorio aparece escoria, ya sea sinterizada o fundida. Al caer en el agua de la unidad de desescoriado se forma una escoria granulada. Cuando la escoria se sinteriza, esta etapa es similar al del sistema de combustión en parrillas. Los hornos rotatorios y las cámaras de postcombustión se construyen por lo general como cámaras de combustión adiabáticas, con revestimiento de cerámica. Después de la cámara de combustión los gases emitidos pasan a un área vacía hasta llegar a una temperatura de 700°C. Luego se disponen haces de dispositivos de calentamiento, como evaporadores, supercalentadores y precalentadores de agua de alimentación. El sistema de caldera de recuperación y suministro de energía es similar al de los sistemas de combustión en parrillas.

Capacidades del incinerador: de 0.5 a 3 toneladas por hora (para la incineración de desechos sanitarios).

5.2.3 Incinerador de parrilla

La incineración de desechos sanitarios en incineradores de desechos urbanos requiere adaptaciones especiales. Si se van a incinerar desechos sanitarios infecciosos en un incinerador de desechos urbanos, deben desinfectarse y esterilizarse con anterioridad, o bien vaciarse en el incinerador mediante carga automática dentro de contenedores apropiados. Debe evitarse mezclar previamente desechos infecciosos con otros tipos de desechos así como la manipulación directa. Véase la sección V.A (i) de las presentes directrices para más información sobre la incineración de desechos urbanos.

5.2.4 Incineradores de lecho fluidizado

Los incineradores de lecho fluidizado son de uso generalizado en la incineración de desechos muy desmenuzados, como el combustible derivado de desechos y los lodos de alcantarillado. Este método se ha usado durante décadas, principalmente para la combustión de combustibles homogéneos. El incinerador de lecho fluidizado consiste en una cámara de combustión revestida con forma de cilindro vertical. En la parte inferior, un lecho de material inerte (ej., arena o cenizas) sobre una parrilla o una placa de distribución se fluidiza con aire. Los desechos para incineración se van depositando en el lecho de arena fluidizada por la parte superior o lateral.

Se introduce aire precalentado en la cámara de combustión a través de aberturas en la placa del lecho, formando un lecho fluidizado con la arena que se encuentra en la cámara de combustión. Los desechos se depositan dentro del reactor mediante una bomba, un alimentador con válvula estrella o un tubo transportador helicoidal. En el lecho fluidizado se lleva a cabo el secado, la volatilización, la ignición y la combustión. La temperatura en el espacio libre por encima del lecho generalmente va de 850°C a 950°C. Sobre el material del lecho fluidizado, el espacio libre sirve para retener los gases en una zona de combustión. En el lecho mismo la temperatura es inferior, y puede ser de unos 650°C. Por las características de mezclado del reactor, en los sistemas de incineración en lecho fluidizado suele darse una distribución uniforme de temperaturas y oxígeno, cuyo resultado es un funcionamiento estable. En el caso de desechos

heterogéneos, la combustión de lecho fluidizado requiere una etapa de preparación de los desechos para que su tamaño se ajuste a las especificaciones correspondientes. Para algunos desechos, puede consistir en una combinación de recolección selectiva de los mismos o pretratamiento, como la trituración. Algunos tipos de lechos fluidizados (por ejemplo, el lecho fluidizado rotatorio) pueden recibir partículas de desechos de tamaño más grande que otros. Cuando es así, es posible que no se requiera reducción, o que baste con una reducción aproximada.

5.2.5 Sistemas modulares

Los sistemas modulares son un tipo común de incinerador de desechos (sólidos urbanos) muy utilizados en los Estados Unidos, Europa y Asia. Los incineradores modulares constan de dos cámaras de combustión montadas verticalmente (una cámara primaria y una secundaria). En las configuraciones modulares la capacidad de combustión habitualmente va de 1 a 270 toneladas al día. Hay dos tipos principales de sistemas modulares: sistemas con exceso de aire y con insuficiencia de aire:

- El sistema modular con exceso de aire consiste en dos cámaras de combustión, primaria y secundaria, que funcionan con niveles de aire superiores a los requisitos estequiométricos (ej., 100–250% de exceso de aire)
- En el tipo de sistema modular con insuficiencia de aire (o aire controlado), se proporciona aire a la cámara primaria a niveles subestequiométricos. Los productos de la combustión incompleta se incorporan a los gases de combustión que se forman en la cámara de combustión primaria y luego pasan a una cámara de combustión secundaria. Se agrega excedente de aire a la cámara secundaria, y se completa la combustión con temperaturas elevadas sostenidas con combustible auxiliar (por lo general, gas natural). La temperatura elevada y uniforme de la cámara secundaria, combinada con el mezclado turbulento de los gases de combustión, favorece una baja formación y emisión de material particulado y contaminantes orgánicos

5.3 Depuración de gases de combustión

Los gases de combustión producidos por incineradores contienen cenizas volantes (material particulado) contaminadas con metales, PCDD/PCDF, compuestos orgánicos termoresistentes, y gases como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, óxidos de carbono y haluros de hidrógeno. Los gases de combustión generados en un sistema de operación por lotes no controlada (sin depuración de gases de combustión) contendrán aproximadamente 2000 ng. EQT/m³ (UNEP 2005).⁵

Para garantizar que se aplican mejores técnicas disponibles se deben combinar correctamente las medidas adecuadas para depuración de gases de combustión (véase la sección III.C (iv) y V.A. (i) 6.4 de las presentes directrices).

5.4 Tratamiento de cenizas volantes y de fondo, tratamiento de aguas residuales

Las principales fracciones de desechos son cenizas volantes, escoria, tortas de filtro utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, yeso, y carbón activado agotado. Estos

desechos son mayormente peligrosos y se deben eliminar en rellenos sanitarios especiales. Los métodos más empleados son el depósito en vertederos dentro de contenedores de doble pared, la solidificación y posterior envío a rellenos sanitarios, y el postratamiento térmico (véase también la sección V.A (i), apartado 5 de las presentes directrices).

6. Mejores técnicas disponibles y resumen de mejores prácticas ambientales

Además de aplicar mejores prácticas ambientales a la incineración de desechos sanitarios, hay toda una serie de técnicas comprobadas de ingeniería de combustión, depuración de gases de combustión y gestión de residuos para prevenir la formación o disminuir las liberaciones de las sustancias del Anexo C. Para un análisis detallado de lo que representan mejores técnicas disponibles para la incineradoras de desechos remitimos al *European Commission BAT Reference (BREF) Document on Waste Incineration* (European Commission 2006).

Existen además tecnologías que no utilizan la incineración (véase la sección III.C (ii) de estas directrices), y que pueden representar alternativas factibles y ambientalmente racionales a la incineración. En este apartado, sin embargo, se trata de determinar cuáles son mejores técnicas aplicables al proceso de incineración, a saber, un buen diseño, funcionamiento y mantenimiento de una planta incineradora de desechos que permitan disminuir efectivamente la formación y liberación de las sustancias de Anexo C.

Al analizar las mejores técnicas disponibles que se describen aquí para la incineración de desechos es importante considerar que la solución óptima para un tipo específico de planta incineradora dependerá de las condiciones locales. Las mejores técnicas disponibles que aquí se exponen no deben considerarse como un listado en el que se indique la solución idónea, ya que para ello habría que analizar las condiciones locales con mucho detalle, cosa que no permiten estas directrices generales sobre mejores técnicas disponibles. Por consiguiente, el hecho de combinar algunos elementos que se describen como mejores técnicas disponibles en estas directrices, sin considerar las condiciones locales, puede que no indique la solución local óptima en función del medio ambiente en su totalidad. (European Commission 2006).

El uso de mejores técnicas disponibles en incineradores también reducirá las emisiones de ácido hidroc্লórico y metales (en especial de mercurio). El tratamiento apropiado de cenizas de fondo y residuos derivados de la depuración de gases de combustión es esencial para disminuir las liberaciones de PCDD/PCDF al medio ambiente y reducirá las posteriores liberaciones generadas por los residuos depositados en rellenos sanitarios.

En relación con la incineración, las medidas primarias por sí solas reducirán significativamente la emisión de las sustancias que figuran del Anexo C del Convenio de Estocolmo. No obstante, la instrumentación de las mejores técnicas disponibles requiere medidas primarias y secundarias. Con una adecuada combinación de medidas primarias y secundarias, los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF son de un máximo de 0.1 ng EQT- I/Nm^3 (con 11% O_2). Se observa además que, en condiciones normales de

funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Las mejores técnicas disponibles para descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes, que reciben efluentes del tratamiento de depuración de gases de combustión, se asocian a niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-*l*l.

En las tablas siguientes se presenta un resumen de lo que constituyen mejores prácticas ambientales y mejores técnicas disponibles para la incineración de desechos sanitarios.

■ **Tabla 1. Orientación general**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Separación de desechos	Clasificación clara. Separar desechos sanitarios de otros desechos en la fuente, y disminuir la cantidad de desechos para tratamiento en la categoría de desechos sanitarios.		Puede ser efectiva directamente para la reducción de las sustancias del Anexo C pero como parte de un concepto integral para la gestión de desechos.
Procesos alternativos	En especial, si la planta existente o prevista no puede cumplir los requisitos de desempeño, se debería dar prioridad a procesos alternativos que tengan menor potencial de impacto ambiental que la incineración de desechos.	Procesos alternativos a la incineración de desechos sanitarios infecciosos: <ul style="list-style-type: none"> - Esterilización con vapor - Sistema avanzado de esterilización con vapor - Tratamiento con microondas - Esterilización con calor seco - Tratamiento biológico - Hidrólisis alcalina - Rellenos sanitarios 	

■ Tabla 2. Incineración de desechos sanitarios: Tecnologías de combustión que representan mejores técnicas disponibles

Tecnología	Consideraciones	Otros comentarios
Incineración pirolítica	Ideal para plantas pequeñas (de 200 kg/día a 10 t/día) y tratamiento <i>in situ</i> .	Altos costos de inversión y mantenimiento; se precisa personal bien capacitado.
Horno rotatorio	Ideal para plantas de tamaño medio (0.5–3 tons/hora).	Uso de refrigeración por agua en los hornos rotatorios, altos costos de inversión y mantenimiento; se precisa personal bien capacitado; alto consumo de energía.
Incinerador con parrilla (incinerador de desechos urbanos)		Uso de refrigeración por agua en las parrillas. La quema en incineradores de desechos urbanos exige adaptaciones especiales para desechos sanitarios (ej., carga automática). No se permite manipulación directa ni mezcla previa de desechos sanitarios infecciosos.
Incinerador de lecho fluidizado		
Sistemas modulares	De una a 270 toneladas por día.	

■ **Tabla 3. Incineración de desechos sanitarios: Medidas generales**

Opciones de gestión	Características de las emisiones	Otras consideraciones
No incinerar desechos a menos que se tomen medidas específicas para reducir las sustancias del Anexo C (medidas primarias y secundarias, según corresponda; véase Tablas 5 y 6).	Posibles liberaciones de los compuestos del Anexo C y metales volátiles.	Detectar posible contenido de halógeno en los desechos y tomar las medidas primarias y secundarias apropiadas (véase Tablas 5 y 6). Detectar posible contenido de metales pesados en los desechos y tomar las medidas primarias y secundarias apropiadas (véase Tablas 5 y 6).
Transporte, almacenamiento, y seguridad adecuados para desechos sanitarios según características de los tipos de desechos.	No reduce directamente las sustancias del Anexo C pero forma parte de un concepto integrado para la gestión de desechos.	
Ubicación de la planta: Son preferibles las unidades centralizadas de incineración al tratamiento <i>in situ</i> descentralizado para desechos sanitarios peligrosos.		
Incineración de desechos sanitarios sólo en instalaciones exclusivas o grandes incineradoras para desechos peligrosos.		Las características de los desechos sanitarios (alto contenido de agua y plástico) requieren equipo especial.
Si no se utiliza una incineradora de desechos sanitarios exclusiva, se debe prever un sistema de carga separada para desechos infecciosos.	No reduce directamente las sustancias del Anexo C pero forma parte de un concepto integrado para la gestión de desechos.	
No incinerar desechos radiactivos.	No sirve para reducir las sustancias de Anexo C.	

■ **Tabla 4. Incineración de desechos sanitarios: Medidas de organización**

Medida	Consideraciones
<ul style="list-style-type: none"> • Personal bien capacitado. • Operación y vigilancia del incinerador con mantenimiento periódico (limpieza de la cámara de combustión, desincrustación de entradas de aire y quemadores de combustible; uso de vestimenta de protección). • Mediciones regulares y/o continuas de los contaminantes pertinentes. • Implantación de vigilancia ambiental (establecer protocolos normalizados de vigilancia). • Creación y puesta en marcha de sistemas de auditoría y registro. • Infraestructura general, pavimentación, ventilación. • Evaluación del impacto ambiental, audiencias públicas y atención a las opiniones de la comunidad antes del establecimiento de nuevas incineradoras. 	<p>El funcionamiento de incineradores exige operadores calificados. Conviene recordar que durante todo su periodo de funcionamiento (20 años o más, por lo general), la incineradora debería poder contar con operadores calificados. Se debería corroborar la disponibilidad de estos operadores en la zona antes de adquirir incineradores de alta tecnología. Si no se cuenta con operadores calificados, los establecimientos sanitarios deberían recurrir a tecnologías alternativas para la desinfección de desechos sanitarios o contratar los servicios de incineración de una planta regional.</p> <p>Igualmente se deberían firmar contratos a largo plazo para mantenimiento y reparación, modernización (de ser necesaria) y tratamiento y eliminación final de residuos sólidos derivados de la incineración.</p>

■ Tabla 5. Medidas primarias y máximo aprovechamiento del proceso para reducir emisiones de PCDD/PCDF

Opciones de gestión para aprovechamiento óptimo de las condiciones de combustión	Otras consideraciones
Introducir los desechos en la cámara de combustión sólo a 850°C; las instalaciones deberían tener y utilizar un sistema automático para evitar la alimentación de desechos antes de que se llegue a la temperatura adecuada.	Se necesita modernizar todo el proceso.
Instalar quemadores auxiliares (para las operaciones de arranque y paro).	
En general, evitar arranques e interrupciones del proceso de incineración.	
Evitar temperaturas menores a 850°C y zonas frías en los gases de combustión.	
Suficiente contenido de oxígeno; control del ingreso de oxígeno en función del poder calorífico y la consistencia del material introducido.	A contenido de oxígeno: 6% vol.
Tiempo de residencia suficiente (mínimo 2 seg.) en una cámara de combustión secundaria después de la última inyección de aire y temperaturas por encima de 850°C (1100°C para desechos altamente clorados, o sea, desechos con más de 1% de sustancias orgánicas halogenadas) y 6% O ₂ .	Se requiere un tiempo de residencia suficiente especialmente por el contenido de plástico y agua de los desechos.
Alta turbulencia de gases de escape y reducción del exceso de aire: ej., inyección de aire secundario o gas de combustión recirculado, precalentamiento de los flujos de aire, ingreso de aire regulado.	El ingreso de aire optimizado contribuye a aumentar las temperaturas.
Vigilancia (en línea) para controlar la combustión (temperatura, contenido de oxígeno, CO, polvo), operación y control de la incineración desde una consola central.	

■ **Tabla 6. Medidas secundarias**

Opciones de gestión	Características de las liberaciones	Aplicabilidad	Otras consideraciones
Desempolvamiento			
Evitar la deposición de partículas mediante deshollinadores, sacudidores mecánicos, sopladores de hollín sónicos o de vapor, limpieza frecuente de secciones transitadas por gases de combustión a temperaturas críticas.			Los sopladores de hollín a base de vapor pueden aumentar los niveles de formación de PCDD/PCDF.
Eliminar eficazmente el polvo por los siguientes medios:	<10 % de emisiones restantes en comparación con sistemas no controlados	Media	Eliminación de PCDD/PCDF adsorbidos en partículas.
Filtros de tela	1–0.1% de emisiones restantes	Alto	Utilización a temperaturas de <260°C (según el material).
Filtros de cerámica			Técnica reciente; utilización a temperaturas de 800°C a 1000°C, poco usual en incineradoras de desechos.
Ciclones (sólo para depuración previa de gases de combustión)	Baja eficiencia	Media	Eficaz sólo para partículas grandes.
Precipitación electrostática	Eficiencia regular		Utilización a una temperatura de 450°C; posible promoción de síntesis <i>de novo</i> de PCDD/PCDF, baja eficiencia con partículas finas, más emisiones de NO _x , disminución de la recuperación de calor
Unidad de adsorción de alto rendimiento con partículas de carbón vegetal activado (Venturi electrodinámico)			Para eliminar partículas finas de polvo

Opciones de gestión	Características de las liberaciones	Aplicabilidad	Otras consideraciones
Reducción de emisiones de las sustancias que figuran en el Anexo C mediante:			
Oxidación catalítica	Alta eficiencia (<0.1 ng EQT/m ³)	Altos costos de inversión altos, bajos costos de operación	Sólo para compuestos gaseosos; es necesario eliminar previamente metales pesados y polvo; reducción adicional de NO _x si se agrega NH ₃ ; exigencias de espacio; los catalizadores pueden ser reprocesados por el fabricante en la mayoría de los casos; sobrecalentamiento en presencia de demasiado CO; más consumo de energía por recalentamiento de gases de combustión; sin residuos sólidos.
Enfriamiento brusco por gas			Poco común en incineradoras de desechos.
Filtros de tela revestidos con catalizador	Alta eficiencia (<0.1 ng EQT/m ³)		Por ejemplo, hecho de PTFE, con despolvamiento paralelo, menor contaminación del polvo del filtro por la destrucción de PCDD/PCDF en la superficie catalizadora.
Diferentes tipos de métodos de adsorción húmeda y seca con combinaciones de carbón vegetal activado, coque de horno de solera, soluciones de cal y caliza en reactores de lecho fijo, lecho móvil y lecho fluidizado:			
Reactor de lecho fijo, absorción con carbón vegetal activado o coque de horno de solera	<0.1 ng EQT/m ³	Altos costos de inversión, costos de operación medios	Exigencia de espacio; hay que eliminar los residuos sólidos derivados de la limpieza de gases de combustión (= desechos peligrosos); vigilancia permanente de CO; posible aumento de emisiones de polvo por la adición de partículas de carbón; consumo de coque de horno de solera de 2 a 5 veces mayor al de carbón vegetal activado; posible incineración de agentes de adsorción usados en la planta; riesgo de incendio/explosión.

Opciones de gestión	Características de las liberaciones	Aplicabilidad	Otras consideraciones
Reactor de corriente de arrastre o lecho fluidizado móvil con adición de coque/cal o piedra caliza y posterior filtro de tela	<0.1 ng EQT/m ³	Bajos costos de inversión, costos de operación medios	Poco común en plantas de incineración exclusiva de desechos sanitarios; hay que eliminar los residuos sólidos generados por la depuración de gases de combustión (= desechos peligrosos); riesgo de incendio/explosión.
<p>Tratamiento adecuado para cenizas volantes y de fondo, y para aguas residuales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Eliminación en rellenos sanitarios seguros (ej., almacenamiento subterráneo). - Tratamiento catalítico para el polvo de filtros de tela con bajas temperaturas y falta de oxígeno. - Depuración del polvo de filtros de tela por proceso 3-R (extracción de metales pesados mediante ácidos). - Combustión para destrucción de materia orgánica (ej., horno rotatorio, Hagenmeier-Trommel) y posterior uso de filtros de tela, depuradores. - Vitrificación del polvo de filtros de tela u otros métodos de inmovilización (ej., solidificación con cemento) y posterior envío a rellenos sanitarios. - Aplicación de tecnología de plasma (técnica incipiente). 			<p>Los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y del enfriamiento de cenizas volantes constituyen desechos peligrosos.</p> <p>Los gases de combustión pueden devolverse a la cámara de combustión del incinerador.</p>

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Con una combinación apropiada de medidas primarias y secundarias, se asocian a mejores técnicas disponibles los niveles de PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas de un máximo de 0.1 ng EQT-I /Nm³ (con 11% O₂). Se observa además que en condiciones normales de funcionamiento, se pueden obtener emisiones inferiores en una planta incineradora de desechos bien diseñada.

Se asocian a mejores técnicas disponibles niveles de concentración de PCDD/PCDF muy por debajo de 0.1 ng EQT-I /l en descargas de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento de efluentes que reciben efluentes de la depuración de gases de combustión.

Referencias

Basel Convention Secretariat. 2002. *Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of Biomedical and Health-Care Waste*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.

Health Care Without Harm. 2001. *Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies*. Chapter 11. Health Care Without Harm, Washington, D.C. www.noharm.org/nonincineration.
Health Care Without Harm Europe. 2004. *Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies in Europe*. www.noharm.org.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

WHO (World Health Organization). 1999. *Safe Management of Wastes from Health Care Activities*. WHO, Geneva.

WHO (World Health Organization). 2004 *Safe health-care waste management; Policy Paper*

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005 *Basel Convention Technical Guidelines: General technical guidelines for the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants (POPs)*.

Otras fuentes

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2001. *Canada-Wide Standards for Dioxins and Furans for Incineration*. CCME, Winnipeg.
www.ccme.ca/initiatives/standards.html?category_id=50#23.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Hospital/Medical/Infectious Waste Incinerators: Final Rule*. 40 CFR Part 60. EPA, Washington, D.C.
www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/1997/September/Day-15/a23835.htm.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Federal Plan Requirements for Hospital/Medical/Infectious Waste Incinerators Constructed on or before June 20, 1996: Final Rule*. 40 CFR Part 62. EPA, Washington, D.C.
www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2000/August/Day-15/a20341.htm.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2004. *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Proposed Standards for Hazardous Air Pollutants for Hazardous Waste Combustors*. Draft. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/fedrgstr.

European Commission. 2000. "Directive 2000/76/EC on the Incineration of Waste." *Official Journal of the European Communities* L332:91.

European Commission. 2006. *Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm.

Giroletti E. and Lodola L. 1993. *Waste Treatment and Management*. Medical Waste Treatment: ISPPA courses. unipv.it/webgiro/ricerch/Public/ISPPA93-medicalWaste.pdf.

Institute for Environmental Medicine and Hospital Hygiene. 2000. "Practical Guide for Optimising the Disposal of Hospital Waste: Reduction and Utilisation of Hospital Waste, with the Focus on Hazardous, Toxic and Infectious Waste." *LIFE96ENV/D/10*. University Clinical Centre, Freiburg.

Stubenvoll J., Böhmer S. et al. 2002. *State of the Art for Waste Incineration Plants*. Umweltbundesamt, Vienna.

www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/industrie/pdfs/english_version.pdf.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). 1998. *Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants*. New York and Geneva. www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1998.POPs.e.pdf.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases Edition 2.1*. UNEP, Geneva. www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/toolkit/Toolkit%20-%20version/Toolkit-2005_2-1_en.pdf.

Notes

- ¹ Ver en particular las disposiciones del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación en lo referente al transporte de desechos peligrosos.
- ² En el Anexo I se comparan las técnicas de combustión de los distintos tipos de hornos.
- ³ La interpretación de la definición de desechos médicos varía según las circunstancias, políticas y reglamentación nacionales. Las organizaciones internacionales (la OMS, la Organización de las Naciones Unidas, etc.) tienen interpretaciones específicas de la definición. La infecciosidad es una de las características peligrosas mencionadas en el Anexo III del Convenio de Basilea y se define en la categoría H6.2.
- ⁴ Puede obtenerse información sobre los costos de las diversas técnicas en *Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies*, capítulo 11 (Health Care Without Harm 2001).
- ⁵ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen del gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para información sobre la medición de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3 de este documento.

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Hornos de cemento que
incineran desechos peligrosos



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

MAYO DE 2007, GINEBRA, SUIZA

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Í N D I C E

V.B. Hornos de cemento que incineran desechos peligrosos	9
Preámbulo	9
1. Introducción	10
1.1 Panorama de la industria del cemento	10
1.2 Combustión de desechos en hornos de cemento	11
2. Vínculos a información pertinente	12
2.1 Consideraciones generales sobre la gestión de desechos (sección III.C (ii))	13
2.2 Otras opciones para el tratamiento de desechos	13
2.3 Directrices Técnicas de Basilea.....	13
3. Procesos de producción de cemento	13
3.1 Principios generales.....	13
3.2 Preparación de materias primas.....	14
3.3 Los procesos del horno rotatorio.....	15
3.4 El proceso de molienda de cemento.....	18
3.5 Control de emisiones	18
4. Combustión	18
4.1 Funcionamiento con combustibles convencionales	18
4.2 Combustión de desechos o desechos peligrosos	19
5. Productos entrantes y salientes del proceso	26
5.1 Productos salientes generales.....	26
5.2 Uso de energía.....	27
5.3 Emisiones de PCDD/PCDF.....	28
5.4 Liberaciones de PCB y HCB	34
6. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	34
6.1 Medidas generales de gestión.....	34
6.2 Medidas específicas.....	36
7. Niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles.....	42
8. Monitoreo de emisiones contaminantes y parámetros de operación	42
Referencias	44
Otras fuentes	45

Tablas

Tabla 1.	Resumen de los datos de las mediciones de PCDD/PCDF	30
Tabla 2.	Alimentación de desechos al precalentador/precalcinador e influencia en las emisiones de PCDD/PCDF	33

Ilustraciones

Figura 1.	Descripción del proceso y límites del sistema de producción de cemento	15
Figura 2.	Horno rotatorio con precalentador y calcinador de suspensión	17
Figura 3.	Perfil de la temperatura y etapas de tiempos de residencia de un horno de clinker con precalentador y precalcinador de ciclón	29

■ Resumen

La finalidad principal de los hornos de cemento es la producción de clinker. Con la combustión de desechos en hornos de cemento se busca recuperar energía y sustituir combustibles fósiles o minerales. En algunos casos, se eliminan desechos peligrosos en estas plantas.

El proceso de fabricación comprende la descomposición de carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C aproximadamente para obtener óxido de calcio (CaO , cal) (calcinación) seguida de un proceso de clinkerización a unos 1450°C en horno rotatorio. A continuación, se muele el clinker junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. Según las condiciones físicas y químicas, los principales procesos de fabricación de cemento se conocen como proceso seco, húmedo, semiseco y semihúmedo.

El proceso de combustión en el horno tiene el potencial de producir y luego liberar sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. Además, se pueden producir liberaciones en los lugares de almacenamiento.

Un buen diseño de las condiciones del proceso, así como la aplicación de medidas primordiales adecuadas, debería permitir que los hornos de cemento que incineran desechos peligrosos funcionen de manera tal que la formación y liberación de sustancias del Anexo C ser lo bastante reducidas para lograr concentraciones de PCDD y PCDF en gases de combustión de $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (10% de contenido de oxígeno), dependiendo de factores como el uso de combustibles limpios, alimentación de desechos, temperatura y eliminación de polvo. Cuando sea necesario, deberían aplicarse medidas secundarias adicionales para reducir las emisiones.

Se cuenta con muchos datos sobre las emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF.

Se han registrado liberaciones de PCDD/PCDF provenientes del polvo de hornos de cemento y, posiblemente, del clinker, que se siguen investigando. Los datos sobre liberaciones de PCB y HCB todavía son escasos.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión son $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 10% de O_2 y gas seco.

Preámbulo

El siguiente proyecto de directrices proporciona orientación sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para hornos de cemento que incineran desechos peligrosos relativos al artículo 5 y al Anexo C, Parte II, del Convenio. Se pueden co-procesar desechos en hornos de cemento para usarlos como combustible alternativo o con la finalidad de destruirlos. Por consiguiente, en esta sección también se consideran los requisitos del artículo 6 del Convenio para la destrucción de desechos que contienen contaminantes orgánicos persistentes.

Asimismo, en esta sección se abordarán las *Directrices técnicas generales para el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en contaminantes orgánicos persistentes (COP)*, que los contengan o estén contaminados con ellos, redactadas por las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (Basel Convention Secretariat 2005). Estas directrices sirven de orientación sobre mejores técnicas disponibles para la destrucción o transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes, y señalan que la co-incineración en hornos de cemento es un proceso que puede usarse para esta destrucción y transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes en desechos.

La destrucción y co-incineración de desechos y desechos peligrosos en hornos de cemento también entran en el ámbito de esta sección. Al leer estas directrices se debería tener presente que actualmente no existe una definición estricta de los términos "desecho" y "desecho peligroso". En el contexto de estas directrices se utiliza el término "desecho" independientemente de su poder calorífico o de su potencial para sustituir recursos minerales.

En la presente sección se plantean las problemáticas derivadas de las categorías de fuentes en el Anexo C, Parte II b: hornos de cemento que incineran desechos peligrosos; y el caso de la co-incineración de desechos urbanos o lodos de alcantarillado en hornos de cemento, categoría de fuentes, Parte II a.

1. Introducción

1.1 Panorama de la industria del cemento

La producción mundial de cemento ha crecido constantemente en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continuará. Según investigaciones de la propia industria, la producción mundial de cemento en 2003 fue de 1,940 millones de toneladas, mientras que en 2001 fue de 1,690 millones de toneladas, y de 1,660 millones de toneladas en 2002. Una parte considerable de la producción se realiza en procesos secos (de Bas 2002; DFIU/IFARE 2002).

En los últimos años ha habido un incremento anual constante de aproximadamente 3.6% por la fuerte demanda de países en desarrollo y países con economías en transición. Actualmente, del total de la producción mundial, Europa aporta 14.4%, los Estados Unidos de América, 4.7%, el resto de América, 6.6%, Asia, 67.5% (China, 41.9%), África, 4.1% y el resto del mundo, 2.7%. Se estima que el consumo promedio mundial de cemento per capita fue de 260 kg en 2004 (Cembureau 2004).

La producción de cemento en Europa asciende a unos 190 millones de toneladas por año. Más del 75% de esta producción corresponde a procesos secos, debido al aumento en la aplicación de estos procesos de mayor rendimiento energético en instalaciones nuevas o que se han ampliado en los últimos años; el 16% corresponde a procesos semisecos o semihúmedos y el 6% a procesos húmedos. La capacidad normal de los nuevos hornos europeos es de 3,000 toneladas de clinker al día (Wulf-Schnabel and Lohse 1999).

La industria de cemento de China produjo 1,038 millones de toneladas de cemento en 2005 (808 kg per capita, 45.4% de la producción mundial)¹. Aproximadamente 60% de esa producción proviene de 4,000 hornos de eje vertical (Karstensen 2006a).

En los Estados Unidos, un horno promedio produce 468,000 toneladas por año (cifras de 2002). Actualmente, cerca de 81% de la producción de cemento en los Estados Unidos se realiza con tecnología de proceso seco (Sitio de internet de la *Portland Cement Association*).

Tradicionalmente, el combustible primordial para hornos de cemento es el carbón. Sin embargo, se han usado y siguen usando diversos combustibles, como el petróleo, coque, gas natural y aceite (European Commission 2001). En Europa, el consumo energético específico de la industria del cemento ha disminuido cerca de 30% (porcentaje que equivale a aproximadamente 11 millones de toneladas de carbón por año) durante los últimos 20 años (Cembureau 2004). No deja de ser frecuente que los hornos sean del tipo multcombustible, y que se pase de uno a otro combustible en función de los costos corrientes.

1.2 Combustión de desechos en hornos de cemento

Además de los combustibles convencionales mencionados en la sección 1.1, la industria del cemento utiliza varios tipos de desechos como combustible. En la industria del cemento europea el consumo de desechos como combustible asciende a 6 millones de toneladas, lo que corresponde a una tasa de sustitución térmica de 18% (Cembureau 2004).

Además, los hornos de cemento pueden contribuir a la destrucción de desechos, incluso desechos peligrosos, aunque el contenido de energía o mineral útil en algunos de ellos sea bajo o nulo. Este proceso puede realizarse a petición de los gobiernos nacionales o como respuesta a la demanda local. En una instalación bien controlada puede lograrse una destrucción de gran eficiencia de los compuestos orgánicos presentes en estos desechos.

Como se explica más adelante, el coprocesamiento de desechos peligrosos sólo puede efectuarse si se cumplen ciertos requisitos de control de los desechos que ingresan (por ejemplo, contenido de metales pesados, poder calorífico, contenido de cenizas, contenido de cloro), control del proceso y control de las emisiones.

No obstante, hay que reiterar que los hornos de cemento son, ante todo, sistemas de producción de clinker, y no todas las condiciones de funcionamiento en las que se pueden fabricar productos de clinker satisfactorios son ideales para la destrucción de desechos. Por ejemplo, los hornos de cemento tienden a operar a niveles de oxígeno de escape más bajos y niveles de monóxido de carbono más altos que un incinerador correctamente operado. La destrucción de desechos orgánicos no sólo requiere altas temperaturas y largos tiempos de residencia, sino que también requiere oxígeno suficiente y que estén lo suficientemente mezclados los componentes orgánicos destinados a la destrucción con el oxígeno. Pueden que los desechos no queden completamente destruidos si el desecho no es introducido adecuadamente en el horno o si los niveles de oxígeno disponible son demasiado bajos. Un diseño y funcionamiento óptimo son factores primordiales para usar hornos de cemento con esta finalidad.

Se debería destacar que esta actividad es distinta de la sustitución de combustible o de materia prima en el proceso. Los hornos de cemento se han usado de esta manera durante muchos años en países como Japón, Noruega y Suiza, donde hay poco espacio para rellenos sanitarios. Más recientemente, se han usado hornos modernos para destruir desechos en algunos países en desarrollo donde la falta de infraestructura de eliminación de desechos e incineración hace que los hornos sean la alternativa más económica y accesible. El objetivo de esta sección es servir de guía para los problemas ambientales que pueden surgir en estos casos. Aun habiendo una infraestructura apropiada para la eliminación de desechos, puede ser útil complementar la capacidad local mediante el uso de hornos de cemento.

La aplicación de métodos que implican la gestión de desechos, como el reciclaje o el reprocesamiento, es preferible al depósito en rellenos sanitarios o al vertido o destrucción de desechos en hornos de cemento. Cada caso debería ser objeto de evaluación en el marco de una estrategia integral para la gestión de desechos (véase sección III C (ii)).

Como excepción, los hornos de cemento pueden emplearse para la eliminación libre de riesgos de los desechos que poseen un bajo poder calorífico o valor mineral, y que no contribuyen al proceso de producción de clinker. Para este tipo de tratamiento, las autoridades reguladoras y los operadores de la planta de cemento deben llegar a acuerdos especiales, según el caso.

Cuando se usan hornos de cemento para destruir desechos, deben evaluarse cuidadosamente las rutas de eliminación alternativas. La destrucción de desechos en hornos de cemento debe cumplir estrictas normas ambientales, sanitarias y de seguridad, y no debe perjudicar la calidad del producto final. En países donde no existen requisitos estrictos para el producto final es más importante estipular la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales a las plantas que co-incineran desechos. El proceso debe controlarse con precisión cuando se destruyen estos desechos, y las emisiones deben medirse regularmente.

2. Vínculos a información pertinente

Pueden encontrarse antecedentes completos sobre la operación de hornos de cemento en general y sobre la combustión de desechos en hornos de cemento en los siguientes sitios:

European Commission.2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain². (<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

European Commission.2005. *Reference Document on the Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.(<http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>)

Holcim. 2006. *Guidelines on Co-Processing Waste Materials in Cement Production*. The GTZ- Holcim public private partnership 2006. (http://www.holcim.com/gc/CORP/uploads/GuidelinesCOPROCEM_web.pdf)

CSI (Cement Sustainability Initiative). 2006. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland. (http://www.wbcdcement.org/pdf/tf2/tf2_guidelines.pdf)

2.1 Consideraciones generales sobre la gestión de desechos (sección III.C (ii))

La sociedad puede gestionar los desechos de diversas formas, según sea su naturaleza física y química, y el contexto económico, social y ambiental en que se generen. A continuación se enumerarán algunos de ellos. Las decisiones particulares siempre dependerán de circunstancias locales, como la disponibilidad de plantas para el tratamiento de desechos, los mercados alternativos para los materiales, y la infraestructura disponible para recolectar, gestionar y transportar los materiales de desechos en forma libre de riesgos (CSI 2005). En la sección III C (ii) de las presentes directrices se ilustra el orden jerárquico de la toma de decisiones para la gestión de desechos.

2.2 Otras opciones para el tratamiento de desechos

El uso de hornos de cemento para el tratamiento de desechos sólo debería considerarse como parte del marco general de las opciones para gestión de desechos en una jerarquía como la que se ha explicado. La incineración de desechos también es una alternativa para la eliminación de desechos y deberían considerarse las directrices para mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de esta categoría de fuente cuando se usen hornos de cemento con esta finalidad.

2.3 Directrices Técnicas de Basilea

Las Directrices técnicas elaboradas por el Convenio de Basilea deben tomarse debidamente en cuenta ya que proporcionan orientación sobre mejores técnicas disponibles para la destrucción o transformación irreversible de contaminantes orgánicos persistentes contenidos en desechos.

3. Procesos de producción de cemento

En estas directrices la descripción del proceso de producción de cemento se limita a las distintas vías del proceso en hornos rotatorios. Se debe tener presente que en China la mayor parte del cemento se produce en hornos de eje vertical que muestran una baja eficiencia energética y un deficiente desempeño ambiental (H. Klee, *World Business Council for Sustainable Development*, comunicación personal, 2004). Por lo tanto, los hornos de eje vertical no deberían considerarse como una opción de mejor técnica disponible.

3.1 Principios generales

La química básica del proceso de fabricación de cemento comienza con la descomposición del carbonato de calcio (CaCO_3) a 900°C aproximadamente para dejar

óxido de calcio (CaO , cal) y liberar dióxido de carbono gaseoso (CO_2). Este proceso se conoce como calcinación, y viene seguido de un proceso de clinkerización en que el óxido de calcio reacciona a altas temperaturas (1400°C – 1500°C habitualmente) con óxido de silicio, de aluminio y ferroso para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el clinker de Portland. Luego, este clinker es molido junto con yeso y otros aditivos para producir cemento. La Figura 1 ilustra los procesos principales y los límites del sistema de producción de cemento.

3.2 Preparación de materias primas

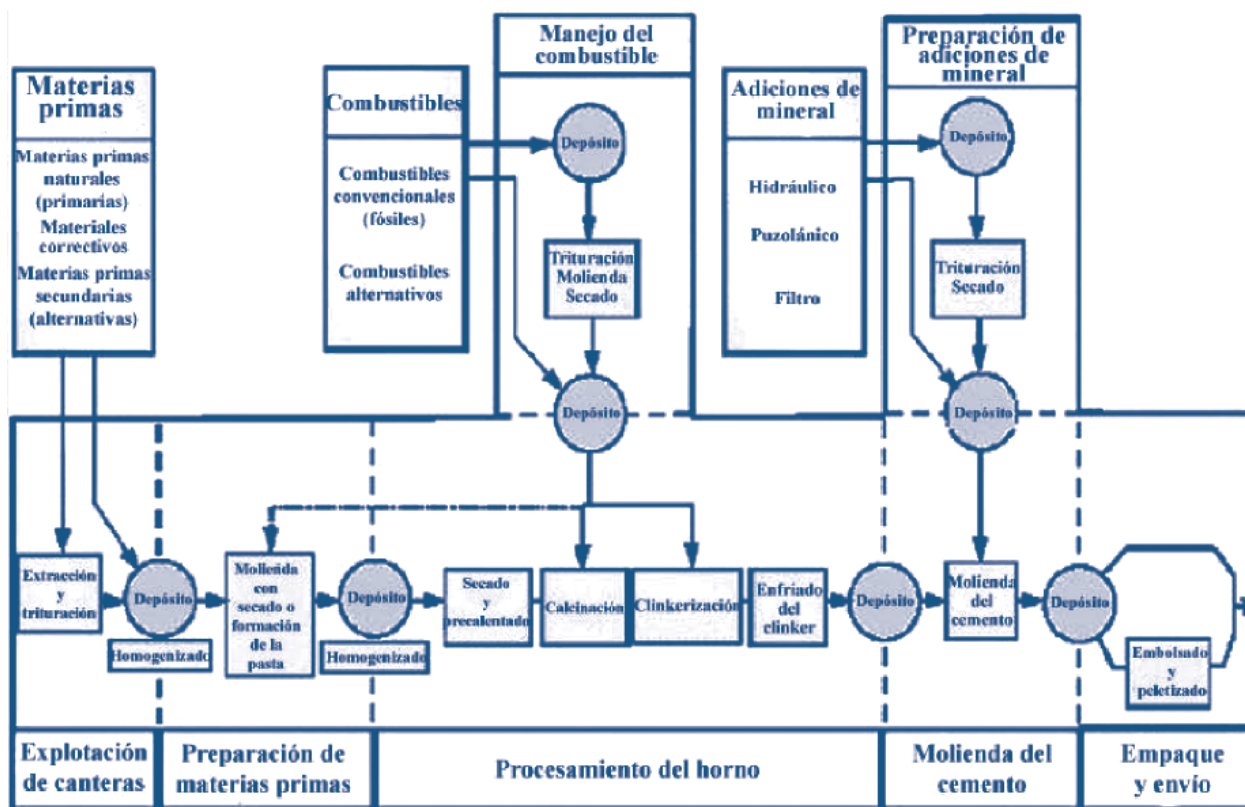
La preparación de materias primas es de gran importancia para el posterior sistema de combustión, tanto para obtener la composición química correcta de la materia prima introducida, como para asegurarse de que sea lo bastante fina. Medir y dosificar con precisión los componentes de alimentación del molino basándose en el peso es importante para lograr una composición química homogénea. Estos preparativos son esenciales para el funcionamiento estable del horno y para obtener un producto de alta calidad.

La preparación de los combustibles sólidos (trituration, molienda y secado) se realiza normalmente en el sitio.

Las materias primas, en proporciones controladas, se muelen y combinan para formar una mezcla homogénea con la composición química requerida. En los procesos seco y semiseco, los componentes de la materia prima se muelen y secan para obtener un polvo fino, aprovechando principalmente los gases de escape del horno y/o de aire de escape refrigerante. Para materias primas con un contenido de humedad relativamente alto, y en los procedimientos de encendido, puede necesitarse un horno auxiliar para proporcionar calor adicional.

La molienda húmeda sólo se emplea en combinación con un sistema húmedo o semihúmedo. Los componentes de la materia prima se muelen con agua para formar una lechada. Normalmente se prefiere el proceso húmedo cuando la materia prima tiene un contenido de humedad superior al 20% de su peso.

■ **Figura 1. Descripción del proceso y límites del sistema de producción de cemento**



Source: European Commission 2001

3.3 Los procesos del horno rotatorio

La materia prima de alimentación, conocida como crudo, mezcla cruda, harina, torta o pasta (con un proceso húmedo) de horno, se calienta en un horno, que es una cámara cilíndrica de acero giratoria, de gran tamaño e inclinada (horno rotatorio). Los hornos funcionan con una configuración de contracorriente. Los gases y sólidos fluyen en direcciones contrarias a través del horno, proporcionando una transferencia de calor más eficiente. El crudo es alimentado por el extremo superior o frío del horno rotatorio, y la inclinación y rotación hacen que se desplace hacia el extremo inferior o caliente. El horno se enciende en el extremo caliente, normalmente con carbón o coque de petróleo como combustible primario. A medida de que el crudo discurre a lo largo del horno y se calienta, se producen las reacciones de secado y de piropcesamiento para formar el clinker, que consiste en gránulos de material fundido incombustible. Hay diversas maneras de introducir los combustibles (tanto fósiles como alternativos) en el horno, que se describen con más detalle en la subsección 4.1.

El clinker sale del extremo caliente del horno a una temperatura aproximada de 1000°C, cae dentro de un enfriador de clinker, habitualmente una parrilla deslizante por la que se insufla aire de enfriamiento.

Pueden seguirse diversas vías para la fabricación de cemento durante la fase de piropcesamiento para obtener las transformaciones físicas y químicas necesarias. Estas

vías se distinguen entre sí por diseño de los equipos, el método de operación y el consumo de combustible.

3.3.1 El proceso seco

En el proceso seco, las materias primas se muelen y secan para obtener crudo en forma de polvo fluido. Se introduce el crudo seco en el horno con precalentador o precalcinador o, más raramente, en un horno largo de vía seca. La eficiencia energética del horno es mayor si se precalienta el crudo antes de introducirlo en el horno.

3.3.1.1 El proceso de precalentamiento seco

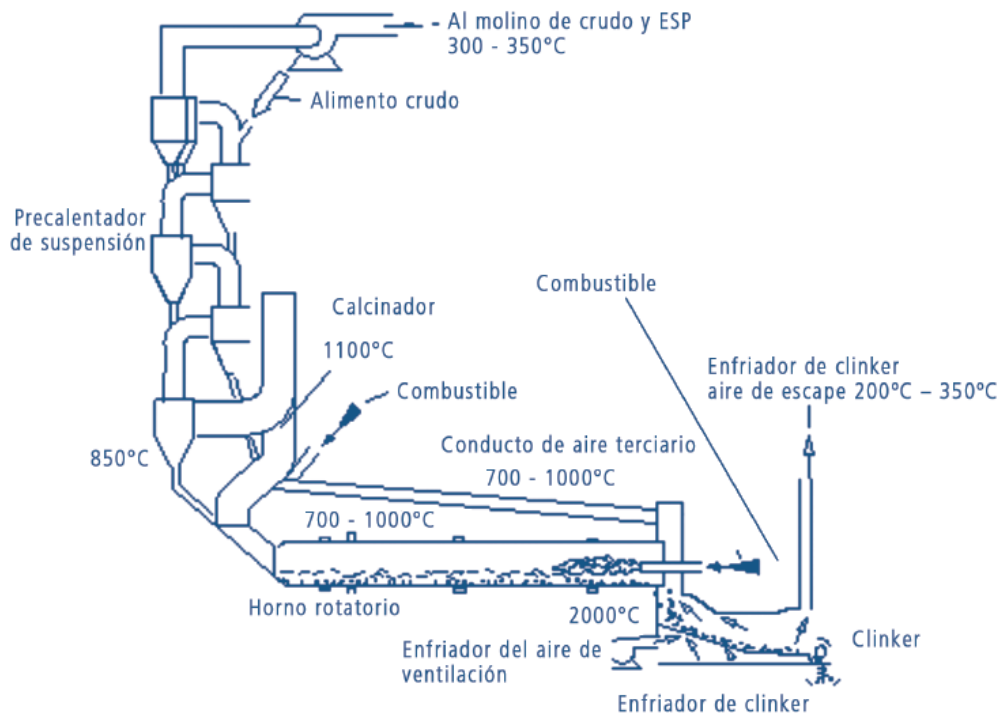
En este proceso se utilizan precalentadores para aumentar la eficiencia térmica. Un precalentador de crudo consiste en una torre vertical que contiene una serie de recipientes tipo ciclón. Se introduce el crudo en la parte superior de la torre. Los gases calientes de escape provenientes del horno atraviesan a contracorriente el crudo que va descendiendo para calentarlo antes que ingrese al horno. Se separa el crudo de los gases de combustión del horno en el ciclón, que luego cae a la siguiente etapa. Como el crudo entra en el horno a mayor temperatura que en los hornos largos convencionales de proceso seco, el horno con precalentador es más corto.

Con los sistemas de precalentamiento hay que eliminar a veces elementos no deseados, como ciertos componentes alcalinos, mediante un sistema de derivación (bypass) de álcalis ubicado entre el extremo de alimentación del horno rotatorio y la torre de precalentamiento. Si no se hace así, estos componentes alcalinos pueden acumularse en el horno, formando incrustaciones que se depositan en las paredes del recipiente y que pueden obligar a apagar el horno para poderlas retirar. Este problema puede reducirse retirando parte de los gases con alto contenido de álcalis. Si esta desviación de álcalis tiene un ducto de escape separado, cabe esperar que contenga y libere los mismos contaminantes que el escape del horno.

3.3.1.2 El proceso de precalentamiento/precalcinación en seco

Este proceso es similar al proceso de precalentamiento seco, pero se añade un sistema de combustión auxiliar para aumentar la temperatura de las materias primas antes de introducirlas en el horno (Figura 2). Se agrega un recipiente de combustión de precalcinación en la parte inferior de la torre de precalentamiento. La ventaja fundamental de usar el precalcinador es que aumenta la capacidad de producción del horno, ya que en él sólo se realiza la combustión del clinker. El uso del precalcinador también aumenta la duración del refractario del horno por la disminución de la carga térmica en la zona de combustión. Esta configuración también puede requerir un sistema de desviación para el control de álcalis, tomando en cuenta que, de liberarse por una chimenea de escape independiente, pueden contener y liberar los mismos contaminantes que el escape del horno.

■ Figura 2. Horno rotatorio con precalentador y calcinador de suspensión



Nota: ESP = precipitador electrostático (instrumento para la recolección del polvo).

3.3.2 El proceso semiseco

En el proceso semiseco el crudo se granula con 12%–14% de agua y se introduce en un precalentador de parrilla antes de entrar al horno, o en un horno largo equipado con cadenas, donde los gránulos se secan y calcinan parcialmente al contacto con los gases de escape del horno caliente antes de introducirse en el horno rotatorio.

3.3.3 El proceso semihúmedo

En el proceso semihúmedo las materias primas (que suelen tener un alto contenido de humedad) se muelen en agua para formar una pasta bombeable, que luego se escurre en prensas de filtro. Las tortas de filtro se extruyen en forma de gránulos y se introducen en un precalentador de parrilla o directamente en el secador de tortas de filtros para la producción de crudo.

3.3.4 El proceso húmedo

En el proceso húmedo, las materias primas (que suelen tener un alto contenido de humedad) se muelen en agua para formar una pasta bombeable, que se introduce directamente en el horno o se pasa primero por un secador de pasta. El proceso húmedo es un proceso más antiguo que se usa en caso de molienda húmeda de materias primas. Necesita más energía en comparación con el proceso seco debido a la evaporación de agua derivada de la pasta.

3.4 El proceso de molienda de cemento

El clinker es molido con yeso y otros aditivos, normalmente en un molino de bolas, para generar el producto final: cemento. El cemento se transporta desde el molino de cemento acabado a silos de almacenamiento, verticales y de gran tamaño, en los sectores de embarque o transporte. El cemento se saca de los silos de almacenamiento mediante diversos aparatos de extracción y se traslada a estaciones para carga dentro de la planta o directamente a los vehículos de transporte.

3.5 Control de emisiones

En general, los hornos de cemento modernos están equipados con precipitadores electrostáticos, con filtros de tela, o con ambos, para controlar el material particulado. En algunos casos, los gases de combustión son enfriados antes de entrar en el dispositivo para control de contaminación de aire seco. No se han usado dispositivos para control de la contaminación de gases ácidos en hornos de cemento porque las materias primas son altamente alcalinas y proporcionan un grado importante de control de gases ácidos (Karstensen 2006b), sin embargo, hay hornos equipados con depuradores húmedos si el crudo tiene alto contenido de azufre.

Las técnicas para la reducción de NO_x corresponden principalmente a métodos integrados como enfriamiento de llama, diseño del quemador, combustión por etapas o reducción no catalítica selectiva mediante inyección de amoníaco.

4. Combustión

4.1 Funcionamiento con combustibles convencionales

Los combustibles convencionales empleados en plantas de cemento son combustibles fósiles como carbón, lignito, aceite combustible o gas natural. Estos combustibles pueden utilizarse solos o combinados, en cuyo caso debe asegurarse una calidad mínima (en términos de poder calorífico, contenido de metales pesados o azufre). Algunos combustibles fósiles (ej., el carbón) se trituran en molinos antes de su inyección.

Para que el horno funcione con regularidad y se obtenga una producción de clinker homogéneo y una combustión completa, se deben considerar algunas normas importantes para la preparación de los combustibles. La oxidación de los componentes del combustible es más rápida cuando se mezclan adecuadamente y la superficie específica es más amplia. En el caso de combustibles líquidos, la inyección debe ser lo más suave posible. Con combustibles sólidos, se requiere mezclarlos de manera minuciosa con los demás combustibles que se usen al mismo tiempo. Este procedimiento no absolutamente necesario si la materia prima es homogénea y muy uniforme.

Una planta de cemento consume de 3,000 a 6,500 MJ (sin incluir la electricidad y el transporte) por tonelada de clinker producida, según las materias primas y el proceso utilizado. La mayoría de los hornos de cemento emplean carbón y coque de petróleo como combustibles primarios, y en menor medida, gas natural y aceite combustible.

Además de proporcionar energía, la quema de algunos de estos combustibles dejan cenizas del combustible con compuestos de sílice y alúmina (y otros elementos traza), que se combinan con las materias primas en el horno, contribuyendo a la estructura del clinker y forman parte del producto final. El consumo de energía habitualmente equivale del 30% al 40% de los costos de producción. Los distintos tipos de combustibles, del más al menos importante, son los siguientes:

- Carbón y coque de petróleo pulverizado (petcoque)
- Aceite combustible (pesado)
- Gas natural

Los puntos potenciales de alimentación para introducir el combustible en el sistema del horno son:

- El quemador principal en la salida del horno rotatorio
- Resbaladera de alimentación en la cámara de transición en la entrada del horno rotatorio (para combustible en trozos)
- Quemadores secundarios para el ducto ascendente
- Quemadores precalcinadores para el precalcinador
- Una abertura de alimentación para el precalcinador/precalentador (para combustible en trozos)
- Una válvula en la mitad del horno en el caso de hornos largos húmedos y secos (para combustible en trozos)

Según sean las condiciones de funcionamiento, concretamente en el caso de operación defectuosa de las instalaciones, pueden generarse importantes emisiones de dibenzoparadióxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF). Con un funcionamiento adecuado, la liberación de PCDD/PCDF debería estar muy por debajo de 0.1 ng EQT/m³.

4.2 Combustión de desechos o desechos peligrosos

La selección de desechos y materiales está determinada por otras consideraciones diversas que están relacionadas entre sí, en particular:

- El efecto en las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible
- El efecto en el costo del combustible
- El efecto en otras emisiones como las de NO_x, SO₂, partículas, otros contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados, CO, sustancias orgánicas
- El efecto en la actividad minera y extractora
- La estabilidad del funcionamiento del horno (afectada por parámetros como el poder calorífico y el contenido de agua)

- El efecto en la calidad del producto (ej., límite de contenido de cloro en el cemento: <0.1%)

Las exigencias para la calidad del producto, en particular el límite de 0.1% para el contenido de cloro en el cemento, reduce las opciones de combustión, y debe vigilarse la cantidad de cloro entrante.

4.2.1 Ejemplo de desechos y combustibles alternativos

La sustitución de combustibles fósiles por alternativos es una práctica muy establecida en diversos países. Algunos países vienen utilizando desechos como combustible alternativo desde hace casi 30 años, y algunos gobiernos promueven activamente este método, siempre que se cumplan estrictos requisitos relacionados con el control del ingreso, proceso y emisiones. No obstante, algunos interesados y otras jurisdicciones han considerado la práctica con los mismos criterios de la incineración. En los países donde esta práctica está muy arraigada, se ha dado importancia a los tipos de materias primas más convenientes para usar en hornos de cemento (CSI 2005), entre ellas:

- Neumáticos usados
- Carne, harina de huesos y grasa animal
- Plásticos
- Aserrín impregnado
- Desechos de madera, papel, cartón, embalajes
- Lodos (fibra de papel, aguas residuales)
- Desechos orgánicos y de la agricultura
- Esquisto, esquisto bituminoso
- Lodos de carbón
- Residuos de destilación
- Fracciones pequeñas de carbón o coque /ánodos/coques químicos
- Aceites residuales, agua aceitosa
- Solventes usados

Es importante controlar los parámetros de los desechos (ej., poder calorífico, contenido de agua, de cenizas, de cloro, de metales pesados).

4.2.2 Lista de desechos no recomendados

El co-procesamiento sólo debería practicarse si se cumplen todas y cada una de las condiciones tangibles previas y requisitos de la normativa ambiental, sanitaria, de seguridad, socioeconómica y operacional. Por lo tanto, no todos los materiales de desechos son adecuados para el co-procesamiento. He aquí la lista de los desechos no recomendados para el co-procesamiento en plantas de cemento:

- Desechos nucleares
- Desechos electrónicos
- Explosivos
- Ácidos minerales
- Desechos con asbesto
- Desechos con una alta concentración de cianuro
- Desechos médicos infecciosos
- Armas químicas o biológicas destinadas a su destrucción
- Baterías completas
- Basura domiciliaria sin clasificar y otros desechos de composición desconocida

Los desechos electrónicos se componen de computadoras y accesorios, equipos electrónicos de entretenimiento, de comunicación, juguetes y productos de línea blanca como aparatos de cocina o artefactos médicos. La composición promedio muestra que los desechos electrónicos contienen, por una parte, sustancias peligrosas para la salud y el ambiente como Cl, Br, P, Cd, Ni, Hg, PCB e pirorretardantes bromados en altas concentraciones; por otra parte, los desechos electrónicos poseen un contenido tan alto de metales preciosos escasos que conviene hacer todo lo necesario para su reciclaje. El co-procesamiento de las partes de plástico de los desechos electrónicos sería una alternativa interesante, pero requiere desensamblar y separar con anterioridad (según Holcim, 2006).

Este listado no es exhaustivo. En general, los desechos con un bajo poder calorífico y un alto contenido de metales pesados no son adecuados para horno de cemento. Los desechos sólidos urbanos no deberían co-incinerarse en hornos de cemento debido a su composición impredecible y a sus características. Además, cada planta puede excluir otros materiales, según las circunstancias locales.

4.2.3 Consideraciones para la selección de desechos

La selección de desechos es un proceso complejo, influido por muchos factores, como el funcionamiento del horno, la naturaleza de los mismos desechos, el efecto general en el medio ambiente, la calidad deseada del clinker y la probabilidad de formación y liberación al medio ambiente de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo y de otras emisiones. El operador debería establecer un procedimiento de evaluación y admisión para los combustibles y, basándose en este procedimiento, realizar una evaluación del efecto del combustible en las emisiones de la planta y de la necesidad potencial de equipos o procedimientos nuevos para garantizar que no produzcan efectos negativos en el medio ambiente.

A continuación se analizarán algunas variables que deberían considerarse al seleccionar combustibles y materias primas (CSI 2005).

4.2.3.1 Funcionamiento del horno

- Contenido de cloro, azufre y álcali: Estos compuestos pueden acumularse en el sistema del horno, produciendo acumulaciones, obturaciones y un funcionamiento inestable. El exceso de cloro o álcali puede generar polvo de horno de cemento o polvo del dispositivo de extracción del gas (y puede requerir la instalación de un dispositivo extractor), que debe quitarse, reciclarse o eliminarse responsablemente
- Contenido de agua: Un alto contenido de agua puede reducir la productividad y eficiencia del sistema del horno.
- Poder calorífico (combustible): El poder calorífico es el parámetro clave para la energía proporcionada al proceso.
- Contenido de cenizas: El contenido de cenizas afecta la composición química del cemento y puede requerir ajustar la composición de la mezcla de materias primas.
- Otros factores también importantes, como la capacidad de tratamiento y el volumen de gases residuales.
- La estabilidad de la operación (picos de CO) y el estado (líquido, sólido), preparación (triturado, molienda) y homogeneidad de los desechos.

4.2.3.2 Calidad del clinker y del cemento

- Contenido de fosfato: Influye en el tiempo de endurecimiento.
- Contenido de cloro, azufre y álcali: Afecta la calidad de todo el producto.
- Talio y cromo: en relación al polvo de horno de cemento y a la calidad del cemento, y probables reacciones alérgicas de usuarios susceptibles.

4.2.3.3 Emisiones contaminantes atmosféricas además de las sustancias que figuran en el Anexo C

- Altos contenidos de azufre en las materias primas y en combustibles y desechos introducidos en el horno: Pueden generar la liberación de SO₂.
- Control de emisiones: Cuando se instala un sistema de extracción de álcalis hay que realizar también un control de emisiones atmosféricas del escape del sistema de extracción similar al de la chimenea principal.
- Cloro en materias primas o combustibles: Pueden combinarse con álcalis que también se encuentran en el alimento para formar material particulado fino compuesto de cloruros de esos álcalis, que pueden ser difíciles de controlar. En algunos casos los cloruros se combinan con el amoníaco presente en la piedra caliza introducida para producir columnas separadas, muy visibles, de partículas finas compuestas principalmente de cloruro de amonio.
- Metales en el combustible o en las materias primas: Las materias primas y los combustibles siempre contendrán metales en diversas concentraciones. El

comportamiento de estos metales en el proceso de combustión depende de su volatilidad. Los compuestos metálicos no volátiles permanecen en el proceso y salen del horno como parte de la composición del clinker. Los compuestos metálicos semivolátiles son parcialmente absorbidos en la fase gaseosa a temperaturas de sinterización y se condensan en la materia prima en secciones más frías del sistema del horno. Este proceso genera un efecto cíclico dentro del sistema del horno (ciclos internos) que se va acumulando hasta el punto en que se establece y mantiene un equilibrio entre entrada y salida por el clinker de cemento. Los compuestos metálicos volátiles se condensan en las partículas de las materias primas a temperaturas más bajas y pueden formar ciclos internos o externos, si no salen con los gases de combustión del horno. El talio, mercurio y sus compuestos son especialmente fáciles de volatilizar, y también, aunque en menor medida, el cadmio, plomo, selenio y sus compuestos. (European Commission 2001).

- La concentración de metales en el polvo del horno de cemento depende de la materia prima y de la recirculación en el sistema del horno. En particular, el uso de carbón y combustibles de desecho puede aumentar el ingreso de metales en el proceso. Los aparatos para control de polvo sólo pueden capturar la fracción de metales pesados unida a las partículas. La tasa de retención para la fracción gaseosa de los metales volátiles como el mercurio es baja. Por lo tanto, debe limitarse el ingreso de ese tipo de material en el sistema del horno, lo que debe tomarse en consideración al co-incinerar desechos que contienen metales pesados volátiles como mercurio, plomo o cadmio. La madera tratada con cobre, cromo, arsénico, etc. también requiere consideración especial en cuanto a la eficacia del sistema para depuración de gases de combustión.
- La elección de los combustibles también puede afectar las emisiones de gases de invernadero. Por ejemplo, sustituir combustibles fósiles por biomasa genera una disminución en las emisiones netas de CO₂.
- Los desechos pueden afectar las emisiones de NO_x, según su composición y contenido de agua.

4.2.4 Análisis de los flujos de entrada

Los operadores del horno deberían establecer criterios para la admisión de materias primas que contienen desechos, y deberían realizar procedimientos de evaluación constantes, que abarcaran los siguientes aspectos:

- Nombre y dirección del distribuidor/proveedor, origen de los desechos, volumen, contenido de agua y cenizas, poder calorífico, concentración de cloruros, fluoruros, azufre y metales pesados.
- Todo proveedor de material debería proporcionar, la primera vez, y luego en forma periódica, muestras representativas del combustible para ser evaluadas antes de entregar el combustible a la planta.
- Todo proveedor debería asimismo adjuntar una hoja de datos que contenga en detalle las propiedades químicas y físicas del combustible entregado, e

información sobre consideraciones ambientales, de salud y de seguridad pertinentes durante el transporte, manejo y uso.

- Las características físicas y químicas de la muestra deberían analizarse y verificarse a la vista de las especificaciones.

Debe establecerse un sistema claro para la gestión de garantía y control de calidad, en particular el muestreo y análisis periódicos de los materiales entregados efectivamente a la planta y la verificación de que los niveles de contaminantes importantes no rebasen las especificaciones establecidas.

4.2.5 Pretratamiento y almacenamiento de desechos usados como combustible alternativo

Los requisitos de almacenamiento para los desechos dependen del tipo de material. En general, se debe procurar disminuir las emisiones de contaminantes, y atender las consideraciones técnicas y de higiene.

En cuanto al almacenamiento inicial, los materiales fuertemente contaminados (ej., con un contenido biológico considerable) y con un alto nivel de humedad (hasta un 40%) deben almacenarse en depósitos construidos especialmente tomando en cuenta las consideraciones de higiene. Las harinas cárnicas deben acondicionarse en sistemas herméticos. Se suministran en contenedores, y el material se transporta por vía neumática o mediante equipos mecánicos al lugar de almacenamiento. Los desechos líquidos (aceites residuales, solventes) deben almacenarse en tanques especiales diseñados en previsión de filtraciones y explosiones. Deben fijarse y aplicarse precauciones de seguridad especiales (tomando en consideración, por ejemplo, el riesgo de explosión).

El almacenamiento intermedio en la planta de acondicionamiento sirve para verificar la calidad de los combustibles derivados de desechos después del proceso de preparación. En estas instalaciones normalmente se utilizan contenedores.

El almacenamiento inicial y la preparación de distintos tipos de desechos para usarlos como combustible suele estar a cargo del proveedor o de alguna empresa especializada en el tratamiento de desechos, y se realizan fuera de la planta de cemento. Estas soluciones centralizadas pueden ser ventajosas para los operadores de hornos, cuya responsabilidad consiste en elaborar clinker para la producción de cemento. No obstante, el principio de debida diligencia exige que estos combustibles deberían someterse a medidas de garantía de calidad de la planta que los recibe, lo que significa que sólo las fracciones de desechos separadas y pretratadas deben almacenarse en la planta de cemento y al horno de cemento. En vista de que el suministro de desechos que puedan usarse como combustible tiende a ser variable, y los mercados de material de desecho crecen rápidamente, es aconsejable configurar para fines múltiples las instalaciones de almacenamiento y preparación (Karstensen 2006b). En la Unión Europea se han empezado a tomar medidas (2003) para normalizar los combustibles sólidos reciclados, derivados de desechos no peligrosos.

No puede considerarse como práctica aceptable una mezcla de desechos cuya finalidad sea cumplir ciertos requisitos, pero que, al diluir las concentraciones, tenga como resultado ocultar el impacto ambiental.

4.2.6 Eficiencia de la destrucción

El coprocesamiento de desechos peligrosos sólo puede realizarse si se cumplen ciertos requisitos de control en el ingreso, control en el proceso y control en las emisiones. Uno de estos parámetros en el proceso es el contenido de oxígeno de los gases de escape. La destrucción de desechos orgánicos no sólo exige altas temperaturas y largos tiempos de residencia, sino que también requiere que haya oxígeno suficiente, una correcta introducción en el horno de los compuestos orgánicos destinados a la destrucción, y un mezclado suficiente de los compuestos y el oxígeno. Un buen diseño y funcionamiento son cruciales para usar los hornos de cemento con esta finalidad.

Muchos hornos de cementos co-procesan desechos como actividad comercial (ej., reciben desechos de generadores *ex situ*), en la mayoría de los casos para usarlos como combustible sustituto en la producción de clinker de cemento Portland. Habitualmente, los desechos líquidos se inyectan en el extremo caliente del horno. Los desechos sólidos pueden introducirse en el área de calcinación en algunas instalaciones. Para hornos largos, significa que los desechos sólidos ingresan por la mitad del horno, y para los hornos con precalentamiento/precalcinación se introducen por la tolva de alimentación en la sección de alta temperatura.

En el caso de los desechos peligrosos, debe garantizarse la destrucción completa de los compuestos combustibles tóxicos, como las sustancias orgánicas halogenadas. Los desechos introducidos por el quemador principal serán destruidos en el área de combustión primaria a una temperatura de llama de $>1800^{\circ}\text{C}$. Los desechos introducidos por un quemador, precalentador o precalcinador secundario serán expuestos a temperaturas inferiores, aunque las temperaturas típicas esperadas en el área de combustión del precalcinador son $>1000^{\circ}\text{C}$.

Los compuestos volátiles del material introducido al final del horno rotatorio o como combustible en trozo pueden evaporarse o evolucionar por pirólisis y ser liberados por la chimenea sin combustión, ya que el funcionamiento del horno es contracorriente. Los desechos inyectados por lotes en las zonas medias o finales del horno no experimentan las mismas temperaturas excepcionalmente altas que los desechos líquidos introducidos en el extremo caliente. En algunos casos, los compuestos orgánicos volátiles pueden liberarse de la carga tan rápidamente que no llegan a mezclarse con oxígeno y se encienden antes de enfriarse por debajo de un nivel de temperatura crítico, formando productos de combustión incompleta. Los sensores de CO instalados para controlar el proceso pueden detectar la combustión incompleta y permitir así tomar las medidas correctivas.

Los desechos peligrosos utilizados como combustible por la industria del cemento consisten principalmente en material orgánico, pero también pueden contener cantidades variables de componentes metálicos. Para determinar si un horno de cemento puede o no quemar combustible de desechos peligrosos en forma eficaz, se debe determinar el destino de los componentes orgánicos.

Desde la década de 1970, cuando se consideró por primera vez la posibilidad de quemar desechos en hornos de cemento, se vienen evaluando las emisiones de hornos de cemento para detectar la presencia de sustancias químicas orgánicas durante la combustión de materiales peligrosos. La eficiencia de la destrucción y eliminación de sustancias como cloruro de metileno, tetracloruro de carbono, triclorobenceno, tricloroetano y bifenilo policlorado (PCB) ha sido calculada en un 99.995% y aún más (Karstensen 2006b).

El uso potencial de hornos de cemento para incinerar desechos que contienen PCB ha sido investigado en muchos países. Las eficiencias en la destrucción y eliminación, determinadas a partir de varias incineraciones de prueba, indican que los hornos de cemento bien diseñados y operados son efectivos en la destrucción de PCB. Se exige una eficiencia de destrucción y eliminación de 99.9999% en varias jurisdicciones (ej., la *Toxic Substances Control Act* de los Estados Unidos, las *Federal Mobile PCB Treatment and Destruction Regulations* de Canadá) para la incineración de estos compuestos, porcentaje que puede usarse como criterio indicativo de mejores técnicas disponibles.

5. Productos entrantes y salientes del proceso

5.1 Productos salientes generales

Los principales problemas ambientales asociados con la producción del cemento son las emisiones atmosféricas, el uso de energía, y la contaminación del suelo y aguas subterráneas producida por la manipulación y almacenamiento del polvo de desecho de las operaciones del horno. Las descargas de aguas residuales normalmente se limitan a escurrimientos superficiales y al agua de refrigeración, y por lo general no contribuyen substancialmente a la contaminación del agua.

Los resultados primarios del proceso de producción de cemento son los siguientes:

- Producto: Clinker, que es molido y mezclado con otros ingredientes para producir cemento.
- Gases de combustión: Los volúmenes típicos de los gases de combustión son de 1,700 a 2,500 m³/Mg de clinker (metros cúbicos por tonelada métrica de clinker, condiciones de referencia de 101.3 kPa, 273 K, gas seco) para todos los tipos de horno. Los sistemas de horno de suspensión con precalentamiento y precalcación normalmente generan gases de combustión de 2,000 m³/Mg de clinker (gas seco, 101.3 kPa, 273 K), aproximadamente.
- Polvo de horno de cemento (recolectado por los sistemas de control de contaminación del aire): en los Estados Unidos, aproximadamente el 64% del polvo de hornos de cemento se vuelve a reciclar dentro del horno y el resto, generado en volúmenes aproximados de 40 kg/ton de clinker, se entierra generalmente en rellenos sanitarios (WISE 2002; EPA 2000). Holcim, uno de los mayores productores de cemento a nivel mundial, vendió o envió a rellenos sanitarios 29 kg de polvo de horno de cemento por tonelada en 2001 (Sitio Web de Holcim).

- Reciclar el polvo de hornos de cemento en el horno generalmente provoca un aumento gradual en el contenido de álcalis del polvo generado, lo que puede dañar el revestimiento del horno, producir cemento de menor calidad, aumentar las emisiones de partículas en la chimenea (EPA 1998b), la cantidad de polvo de horno de cemento que debe eliminarse y, por consiguiente, las emisiones atmosféricas producto de su manejo y eliminación (EPA 1998a). En Europa, el polvo de horno de cemento normalmente se devuelve al material de alimentación del horno o se agrega directamente al cemento producido (Lohse and Wulf-Schnabel 1996). La acumulación de álcalis en el sistema del horno puede evitarse eliminando el polvo de horno recolectado o usando un sistema de desvío de álcalis. Para hornos con precalentamiento y precalcación, se realiza a veces mediante un sistema de derivación de álcalis (*bypass*) en la torre de precalentamiento que elimina los álcalis del sistema del horno.
- Gases de escape del *bypass* de álcalis: En instalaciones equipadas con derivación de álcalis, los gases del *bypass* de álcalis pueden liberarse por una chimenea de escape separada o por la chimenea principal del horno. Según la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos, los contaminantes de este flujo de gas son similares a los gases de combustión principales del horno y se precisan equipos similares de reducción y vigilancia de contaminación (EPA 1999). Usualmente se precisa un porcentaje de derivación de álcalis de más de 10% para la eliminación de álcalis (Sutou, Harada and Ueno 2001). Sin embargo, también se ha registrado una tasa de derivación de 30% (Holsiepe, Shenk and Keefe 2001).

5.2 Uso de energía

La industria cementera consume gran cantidad de energía. Este consumo representa habitualmente de 30% a 40% de los costos operativos (ej., sin contar los costos de capital). Una planta de cemento consume de 3,000 a 6,500 MJ de combustible por tonelada de clinker producido. En este amplio rango de demanda de energía se encuentran todos los tipos de hornos de cemento.

El uso teórico de energía para el proceso de combustión (que implica reacciones químicas) es de 1,700 a 1,800 MJ, aproximadamente, por tonelada de clinker. El uso real de energía de combustible para los diferentes sistemas de hornos se encuentra en los siguientes rangos (en MJ por tonelada de clinker)³:

- 3,000–3,800 para procesos secos, hornos con precalentador y precalcador de ciclón multietapas
- 3,100–4,200 para hornos rotatorios de proceso seco equipados con precalentadores de ciclón
- 3,300–4,500 para procesos semisecos/semihúmedos (horno Lepol)
- Hasta 5,000 para hornos largos de proceso seco
- 5,000–6,000 para hornos largos de proceso húmedo
- 3,100 a >6,500 para hornos verticales y cementos especiales

El consumo de electricidad es de aproximadamente 90–130 kWh por tonelada de cemento (European Commission 2001).

Para optimizar el aporte de energía en los sistemas de hornos existentes se puede cambiar su configuración de modo que funcionen como horno corto de proceso seco con precalentamiento y precalcación en varias etapas, lo que normalmente sólo es factible como parte de una modernización de gran envergadura asociada a un aumento de la producción.

Puede disminuirse el uso de energía eléctrica instalando sistemas de gestión energética y usando equipos de bajo consumo de energía, como rodillos de molienda de alta presión para la conminución del clinker y transmisores de velocidad variable para los ventiladores.

Por lo general, la mayoría de sistemas de reducción de emisiones que operan en fin de proceso reducen la eficiencia energética ya que su funcionamiento suele exigir un aumento del uso de energía eléctrica. Algunas de las técnicas de reducción que se describen a continuación tendrán un efecto positivo en el uso energético, optimizando, por ejemplo, el control del proceso.

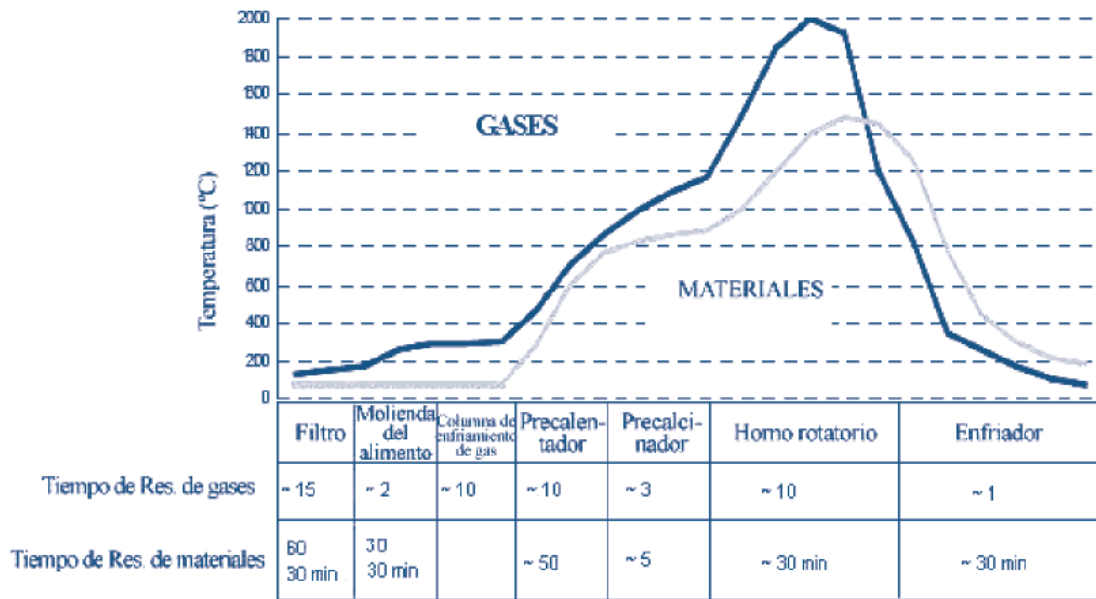
Las estimaciones actuales sugieren que la industria del cemento puede aumentar su eficiencia energética en un porcentaje de 0.5% a 2% al año reemplazando equipos antiguos u obsoletos. Si se reemplazan las viejas unidades de proceso húmedo por plantas nuevas de proceso seco se pueden obtener mejoras significativas en cuanto a eficiencia energética (CSI 2005).

5.3 Emisiones de PCDD/PCDF

5.3.1 Formación de PCDD/PCDF

Cualquier ingreso de cloro en presencia de material orgánico puede generar potencialmente la formación de PCDD y PCDF en procesos térmicos (combustión). Los PCDD/PCDF pueden formarse por el mecanismo de síntesis *de novo* dentro del precalentador o después de él, y dentro del dispositivo de control de contaminación del aire si hay precursores de cloro e hidrocarburo en cantidades suficientes a temperaturas entre los 200°C y los 450°C. En la Figura 3 se presenta un gráfico del perfil de las temperaturas para gases y materiales y sus tiempos de residencia habituales en cada etapa de un horno de clinker con precalentador de ciclón (Fabrellas *et al.* 2004).

■ **Figura 3. Perfil de la temperatura y etapas de tiempos de residencia de un horno de clinker con precalentador y precalcinador de ciclón**



Fuente: Fabrellas et al. 2004

5.3.2 Estudios sobre emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Se presenta un estudio exhaustivo sobre emisiones de PCDD/PCDF generadas por hornos de cemento en países desarrollados y en vías de desarrollo (Karstensen 2006). Los datos representan más de 2200 mediciones en hornos con y sin combustión de una gran variedad de materiales de desechos, y cubren desde principios de los años noventa hasta la actualidad. La Tabla 1 resume los resultados de las mediciones de PCDD/PCDF. Luego se analizarán algunos ejemplos en más detalle.

■ **Tabla 1. Resumen de los datos de las mediciones de PCDD/PCDF**

País o empresa	¿Uso de combustible y materia prima alternativos?	Concentración de PCDD/PCDF^a en ng EQT-l/m³	Número de mediciones	Factor de emisión µg EQT-l /ton de cemento^a
Australia	Sí	0.001–0.07	55	0.0032–0.216
Alemania 1989–1996	Sí	0.02	>150	
Alemania 2001	Sí	<0.065	106	
Bélgica	Sí	<0.1	23	
Canadá	Sí	0.0054–0.057	30	
Cemex España	Sí	0.0013–0.016	5	
Chile	Sí	0.0030–0.0194	5	
Cimpor España	Sí	0.00039–0.039	8	
Colombia	Sí	0.00023–0.0031	3	
Dinamarca	Sí	<0.0006–0.0027	?	
Egipto	Sí	<0.001	3	
España	Sí	0.00695	89	0.014464
Estados Unidos ^b	Sí	0.004– ~ 50	~ 750	<0.216–16.7
Europa	Sí	<0.001–0.163	230	<0.001–5
Filipinas	Sí	0.0059–0.013	5	
Heidelberg	Sí	0.0003–0.44	>170	
Holcim 2001	Sí	0.0001–0.2395	71	0.104 (clinker)
Holcim 2002	Sí	0.0001–0.292	82	0.073 (clinker)
Holcim 2003	Sí	0.0003–0.169	91	0.058 (clinker)
Japón	Sí	0–0.126	164	
Lafarge	Sí	0.003–0.231	64	
México	Sí	0.0005–0.024	3	
Noruega	Sí	0.02–0.13	>20	0.04–0.40
Polonia	Sí	0.009–0.0819	7	
Portugal		0.0006–0.0009	4	
Reino Unido	Sí	0.012–0.423	14	<0.025–1.2
RMC	Sí	0.0014–0.0688	13	
Siam Cement Co.	Sí	0.0006–0.022	4	
Sudáfrica	(Sí)	0.00053–0.001	2	
Taiheiyō	Sí	0.011	67	
Tailandia	Sí	0.0001–0.018	12	0.00024–0.0045
Uniland		0.002–0.006	2	0.005–0.011
Venezuela	Sí	0.0001–0.007	5	
Vietnam		0.0095–0.014	3	

a. Las cifras corresponden a una escala o al valor medio, y se refieren al 10% u 11% de O₂, según la reglamentación nacional.

b. Las altas cifras de los Estados Unidos corresponden a mediciones obtenidas en los años 1990; el número de mediciones es aproximado.

Fuente: Karstensen 2006b.

En un investigación reciente realizada por Cembureau se presentaron las mediciones de PCDD y PCDF de 110 hornos de cemento en 10 países. El estudio cubría los siguientes países: Alemania, Dinamarca, España, Francia, Hungría, Italia, Noruega, los Países Bajos, el Reino Unido y la República Checa. La concentración promedio, tomando en consideración toda la información de este conjunto de datos, fue de 0.016 ng EQT-l/m³. La escala de concentraciones, de la más baja a la más alta fue de <0.001 hasta 0.163 ng EQT-l/m³ (Karstensen 2006b). Todas las mediciones se expresaron corregidas en función de condiciones estándar (gas seco, 273 K, 101.3 kPa y 10% de O₂).

La Holcim Cement Company opera hornos de cemento en todo el mundo. Un informe reciente de Holcim arroja valores de PCDD/PCDF promedio para 2001 y 2002 de 0.041 ng EQT/Nm³ (en 71 hornos) y de 0.030 ng EQT/Nm³ (en 82 hornos), respectivamente. De estas mediciones, se realizaron 120 en países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y dieron un valor promedio de 0.0307 ng EQT/Nm³; el valor mínimo y el máximo obtenidos fueron de 0.0001 y 0.292 ng EQT/Nm³ respectivamente, con nueve hornos largos de proceso húmedo por encima de 0.1 ng EQT/Nm³. En el caso de las 29 mediciones en países que no pertenecen a la OCDE, el valor promedio fue de 0.0146 ng EQT/Nm³; el valor mínimo y el máximo obtenidos fueron de 0.0002 y 0.074 ng EQT/Nm³ respectivamente, con ninguna medición por encima de 0.1 ng EQT/Nm³ (Karstensen 2006b). En la Tabla 1 se resumen los resultados de las mediciones de PCDD/PCDF.

La experiencia ha demostrado que, con temperaturas relativamente altas en el precipitador electrostático y usando una materia prima con alto contenido orgánico, hay posibilidad de altos niveles de emisiones de sustancias del Anexo C.

En 2004, las emisiones de PCDD/PCDF de un horno largo de proceso seco en el Reino Unido alcanzaron 136 ng EQT/m³, el promedio anual fue de más de 50 ng EQT/m³, y las emisiones totales por encima de 40 g EQT. El horno, actualmente cerrado, funcionaba con temperaturas relativamente altas en el precipitador electrostático y usaba materias primas con un alto contenido orgánico junto con cenizas pulverizadas de combustible de desecho⁴.

Los datos provenientes de varios hornos en los Estados Unidos muestran emisiones de PCDD/PCDF de 1.76 ng EQT-l/m³ cuando operan dispositivos para el control de la contaminación del aire en el rango de 200°C - 230°C⁵. Los resultados de pruebas en los Estados Unidos también indicaron mayores emisiones en algunos hornos donde se quemaban desechos peligrosos.

En estudios hechos en los Estados Unidos y Alemania, se estableció una correlación positiva entre la concentración de emisiones de PCDD y la temperatura del precipitador electrostático/chimenea. En las pruebas realizadas en los Estados Unidos, en una planta la temperatura del precipitador electrostático estaba entre 255°C y 400°C. Las emisiones

más altas de PCDD se producían a 400°C, y disminuían a la mitad a 255°C. En general, este comportamiento se observó en todo el conjunto de instalaciones analizadas. Con temperaturas menores a 250°C en el precipitador electrostático/ entrada de la chimenea no había correlación entre temperatura y emisiones de PCDD, lo que concuerda con los mecanismos de formación de PCDD conocidos dentro de sistemas incineradores de desechos urbanos (Karstensen 2006b).

Algunos estudios más detallados han sugerido que, siempre que haya una buena combustión, el principal factor controlador del nivel de sustancias del Anexo C en los gases de chimenea es la temperatura de funcionamiento del dispositivo de recolección de polvo en el sistema de depuración de gases. Las plantas equipadas con precipitadores electrostáticos que operan a temperaturas inferiores (200°C o menos) parecen tener concentraciones de emisiones más bajas, usen o no desechos (UNEP 2003).

El efecto posible de alimentar con distintos desechos el precalentador/precalcinador, que funciona con temperaturas más bajas, fue investigado por Lafarge, y los resultados se presentan en la Tabla 2. Los desechos inyectados a mitad o al final del horno no sufren las altas temperaturas ni los largos tiempos de residencia que experimentan los desechos introducidos en el extremo caliente. El nivel de concentración de PCDD/PCDF observado fue bajo en todas las mediciones (Karstensen 2006b).

■ Tabla 2. Alimentación de desechos al precalentador/precalcinador e influencia en las emisiones de PCDD/PCDF

Planta	Año	Tipo de combustible alternativo	Emisiones de PCDD/PCDF en ng EQT-I/Nm ³
1	2002	Harinas cárnicas, plásticos y textiles	0.0025
2	2002	Harinas cárnicas y aserrín impregnado	0.0033
3	2002	Carbón, plásticos y neumáticos	0.0021 & 0.0041
4	2002	Neumáticos	0.002 & 0.006
5	2002	Coque de petróleo, plástico y aceite residual	0.001
6	2002	Coque de petróleo, cáscara de semilla de girasol y aceite residual	0.012
7	2002	Restos de neumáticos	0.004 & 0.021
8	2002	Solventes	0.07
9	2002	Aserrín impregnado y solventes	0.00003 & 0.00145
10	2002	Solventes	0.00029 & 0.00057
11	2002	Lodos	<0.011
12	2002	Desechos y lodos de automóvil	0.0036 & 0.07 & 0.0032

Los datos registrados indican que los hornos de cemento pueden cumplir con un nivel de emisiones de 0.1 ng EQT-I/Nm³, que corresponde al valor límite establecido en las legislaciones de varios países de Europa occidental para plantas de incineración de desechos peligrosos.

5.3.3 Estudio sobre las liberaciones de PCDD/PCDF a partir de sólidos

Ya que los datos sobre emisiones de chimeneas de hornos de cemento indican que cuando las instalaciones están bien construidas y operadas se pueden lograr concentraciones muy bajas de PCDD/PCDF en gases de combustión, también cabe esperar que estas instalaciones tengan niveles bajos en los polvos de horno de cemento recuperado del sistema de control de contaminación del aire. Los mismos factores que contribuyen a que las emisiones en el escape hacia la atmósfera tengan niveles bajos inciden en las bajas concentraciones en el material sólido recolectado. Los dos materiales sólidos más importantes que genera la producción de cemento son el clinker de

cemento del enfriador y el material pulverulento captado por los dispositivos de control de la contaminación del aire.

Se han reunido nuevos análisis de materiales sólidos de las compañías de cemento que participan en la Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento (CSI) (Karstensen 2006b). En 2005, ocho empresas de la CSI registraron concentraciones de PCDD/PCDF en polvo de clinker de cemento. Noventa muestras arrojaron un valor promedio de 6.7 ng EQT-l/kg, dato aparentemente muy sesgado por unas cuantas muestras cuyos valores eran altos. La mayor concentración registrada fue de 96 ng EQT-l/kg.

En 2005, ocho empresas de la CSI registraron la concentración de PCDD/PCDF en 57 muestras de clinker. El valor promedio de todas las muestras fue de 1.24 ng EQT-l/kg. Las muestras de clinker venían de hornos de proceso húmedo y seco con precalentador de suspensión. La mayor concentración registrada fue de 13 ng EQT-l/kg.

En 2005, dos empresas de la CSI registraron la concentración de PCDD/PCDF en 11 muestras de combustible para horno, consistente en crudo, gránulos, pasta y componentes de materias primas. El valor promedio de estas muestras fue de 1.4 ng EQT-l/kg. Las muestras de alimento para horno provenían de hornos de proceso húmedo y seco con precalentador. La mayor concentración registrada fue de 7.1 ng EQT-l/kg.

5.4 Liberaciones de PCB y HCB

Hasta la fecha, el hexaclorobenceno (HCB) y los PCB no han sido materia de vigilancia reglamentaria en plantas de cemento. La mayor parte de las mediciones que se han realizado no han detectado emisiones de HCB. En cuanto a las emisiones de PCB₆, 40 mediciones efectuadas en 13 hornos de Alemania en 2001 arrojaron una concentración máxima de 0.4 µg PCB /Nm³; en nueve de las 40 mediciones no se detectaron PCB. La co-incineración de plaguicidas en Vietnam ha dado emisiones de PCB similares a las dioxinas de 0.001 ng EQT/m³ y emisiones de HCB menores al límite de detección de 31 ng/m³ (Karstensen 2006b).

6. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

En los siguientes párrafos se resumen las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para hornos de cemento que incineran desechos peligrosos.

6.1 Medidas generales de gestión

6.1.1 Aspectos jurídicos

Debe existir un marco legislativo y regulador apropiado que asegure la aplicación efectiva y que garantice un alto nivel de protección ambiental.

Además, debería establecerse un régimen de gestión de desechos que refuerce la jerarquía de gestión de desechos que figura en la sección III C (ii) previa o paralelamente a la designación formal de los hornos de cemento como receptores autorizados de

desechos peligrosos, sea como combustibles derivados de desechos o como desechos que se vayan a eliminar. Todas las autoridades correspondientes deben participar en el proceso de expedición de autorizaciones y, a este respecto, entre otras medidas, los operadores de plantas cementeras deberían:

- Establecer y mantener su credibilidad mediante la comunicación abierta, consecuente, receptiva y regular con las autoridades y la ciudadanía
- Proporcionar toda la información necesaria para que las autoridades puedan evaluar la seguridad y los efectos ambientales del procesamiento de desechos peligrosos
- Establecer consejos asesores comunitarios desde el principio del proceso de planificación
- Las directrices de Holcim y de la CSI representan una buena orientación sobre MPA en esta materia.

6.1.2 Aspectos ambientales

La co-incineración de desechos peligrosos sólo debería realizarse si el horno de cemento opera de acuerdo a las mejores técnicas disponibles descritas en estas directrices. Si se cumplen ciertas condiciones en cuanto a calidad y alimentación de los desechos, el co-procesamiento de desechos no cambiará significativamente las emisiones provenientes de la chimenea de un horno de cemento. No obstante, algunos combustibles pueden contener metales con una alta volatilidad, como el mercurio, cuyo coeficiente de captura es bajo. Para controlar las emisiones de mercurio, por lo tanto, puede que sea necesario limitar la entrada de mercurio al sistema del horno. Los combustibles alternativos deben someterse a un riguroso procedimiento de admisión e inspección antes de ser usados.

El monitoreo constante de las emisiones es obligatorio a fin de verificar la conformidad con las leyes, reglamentaciones y acuerdos existentes.

6.1.3 Aspectos operativos

Los operadores deben asegurarse de que sólo se aceptarán desechos peligrosos generados por entidades dignas de confianza, y deben aquilatar la integridad de todos los participantes en la cadena de abastecimiento. Debe garantizarse la trazabilidad de los desechos antes de su recepción en la planta, y si son inadmisibles, serán rechazados.

El transporte, manipulación y almacenamiento de materias primas debe vigilarse de forma efectiva, y debe garantizarse la observancia plena de todos los requisitos reglamentarios, lo que implica el análisis y registro de parámetros como el poder calorífico, contenido de agua, contenido de metales pesados, de cenizas, azufre y cloro. Asimismo, las muestras retenidas deberían conservarse durante cierto tiempo.

6.1.4 Aspectos de salud y seguridad

Debe evaluarse la idoneidad del lugar de producción para evitar riesgos asociados a la ubicación (proximidad de lugares habitados, efecto potencial de las emisiones, logística, transporte) e infraestructura (posibles emisiones de vapores y olores o eventuales

filtraciones de desechos peligrosos u otras sustancias perjudiciales en el entorno que requieran control mediante la aplicación de soluciones técnicas).

Es obligatorio contar con la documentación y la información pertinente acerca de cómo deben manejarse los combustibles derivados de desechos en condiciones de seguridad, y sobre medidas de emergencia y contingencia. La gerencia de la planta debe procurar que los empleados estén debidamente informados, abiertamente y con transparencia, sobre las medidas y normas de salud y seguridad. Es esencial que los empleados, las autoridades reguladoras y los servicios locales de emergencia (ej., bomberos) tengan esta información con mucha anticipación, antes de que comiencen las operaciones de combustión de desechos, incluidos los desechos peligrosos, en una planta cementera.

6.1.5 Comunicación y responsabilidad social

Por razones de transparencia y claridad, el operador de un horno de cemento que prevea el manejo y la co-incineración de desechos, incluidos los desechos peligrosos o combustibles derivados de desechos, debe proporcionar toda la información necesaria para que los interesados comprendan la finalidad del uso de desechos peligrosos en el horno de cemento, y para darles a conocer las medidas que se aplicarán para evitar efectos adversos en la población y el medio ambiente, las funciones de las partes implicadas y los procedimientos de toma de decisiones. En resumen, deberían tomarse en consideración los siguientes aspectos generales de gestión:

- Infraestructura general, pavimentación, ventilación
- Buena gestión interna del sitio y las instalaciones
- Control y monitoreo general de los parámetros básicos de desempeño
- Control y reducción de las emisiones atmosféricas (NO_x, SO₂, partículas, metales)
- Establecer una vigilancia ambiental continua (crear protocolos de monitoreo normalizados)
- Establecer sistemas de auditoría y registro
- Aplicación de sistemas de autorización y auditoría específicos para uso de desechos y combustibles alternativos
- Demostración, mediante la vigilancia de emisiones, de que la planta puede atenerse a un límite de emisiones determinado
- Precauciones de salud y seguridad laborales: Los hornos de cemento que incineran desechos y combustibles alternativos deben contar con prácticas apropiadas para proteger a los trabajadores que manipulan esos materiales durante el proceso de alimentación de los hornos
- Profesionalización y capacitación suficiente del personal

6.2 Medidas específicas

Para plantas nuevas y en caso de modernizaciones importantes, se consideran mejores técnicas disponibles para la producción de clinker de cemento los hornos de proceso

seco con precalentador y precalcinador de varias etapas. Para instalaciones existentes, pueden requerirse diversos grados de reconstrucción.⁶

6.2.1 Medidas principales y optimización del proceso

6.2.1.1 Optimización del proceso

- Asegurarse de que la temperatura de los gases de combustión baje rápidamente a menos de 200°C.
- Caracterizar los parámetros que correspondan a un funcionamiento adecuado y usarlos como base para mejorar otros aspectos del desempeño operativo. Una vez caracterizados los parámetros adecuados para el funcionamiento del horno, establecer datos de referencia agregando dosis controladas de desechos, evaluar los cambios, y determinar los controles y prácticas necesarias para controlar las emisiones.
- Gestionar el proceso de cocción para alcanzar y mantener condiciones estables de operación, es decir, controlar el proceso de la mejor manera (incluso mediante sistemas informatizados de control automático), usando sistemas de alimentación de combustibles sólidos modernos gravimétricos.
- Disminuir el gasto energético mediante el uso de precalentadores y precalcinadores en la medida de lo posible, según la configuración del sistema de horno existente, y mediante el uso de enfriadores de clinker modernos, con lo que se puede lograr un máximo de recuperación energética de los gases de combustión.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar las sustancias del Anexo C son un elemento importante en una estrategia integral para el control de emisiones. Por lo general, estas medidas son aplicables y relativamente fáciles de aplicar en términos técnicos.

6.2.1.2 Preparación de desechos peligrosos

El pretratamiento de desechos, incluidos los desechos peligrosos, con la finalidad de obtener un crudo más homogéneo y, por lo tanto, condiciones de combustión más estables, puede, según la naturaleza del combustible derivado de desechos, implicar el secado, trituración, mezcla o molienda (véase también la sección 3.4). Es importante vigilar cuidadosamente los siguientes aspectos:

- Mantenimiento, gestión interna, y procedimientos adecuados para la recepción, manipulación y almacenamiento sin riesgos de los desechos a medida que ingresan al sitio. Instalaciones transitorias de almacenamiento bien diseñadas, tomando en consideración los peligros y características de cada tipo de desecho.
- Mantenimiento, gestión interna y procedimientos operativos adecuados. Instalaciones de almacenamiento bien diseñadas para los combustibles alternativos.

Estas medidas no son necesariamente exclusivas del control de las sustancias que deben eliminarse y reducirse según el Anexo C, pero son elementos esenciales de una estrategia integral para el control de emisiones.

6.2.1.3 Controles de entrada

- Es preciso un suministro regular y a largo plazo de un determinado tipo de desecho o combustible alternativo (ej., un suministro de un mes o más) para mantener condiciones estables durante el funcionamiento.
- Las sustancias que ingresan al horno deberían seleccionarse y controlarse cuidadosamente, deberían establecerse las especificaciones teniendo presente los factores producto/proceso o las emisiones, y deberían ser monitoreadas.
- Suministro continuo de combustibles alternativos con especificaciones de metales pesados, cloro y azufre.
- Nunca debería usarse combustible derivado de desechos durante el encendido y apagado.
- Debería evitarse la introducción de mezcla cruda que contenga desechos con compuestos orgánicos que pudieran actuar como precursores.
- Los desechos halogenados deberían alimentarse por el quemador principal.
- En general, los desechos debería alimentarse por el quemador principal o el quemador secundario en el caso de hornos con precalentador/precalcinador. En el caso del quemador secundario debería asegurarse que se mantenga una temperatura del área de combustión de $>850^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de residencia suficiente (2 s).
- No deberían alimentarse como parte de la mezcla cruda los desechos que contengan compuestos orgánicos que pudieran actuar como precursores.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante para una estrategia de control integral de emisiones. Estas medidas son generalmente aplicables y no suelen implicar dificultades técnicas.

6.2.1.4 Estabilización de los parámetros del proceso

Es importante para la estabilidad de la combustión y el proceso asegurarse de los siguientes aspectos:

- Uniformidad en las características del combustible (tanto alternativo como fósil).
- Uniformidad en el suministro de combustible o frecuencia de la introducción de materiales cargados por lotes.
- Suministro del exceso de oxígeno necesario para lograr una buena combustión.

- Vigilancia constante de las concentraciones de CO en los gases de combustión, es especial que no rebasen los niveles preestablecidos que son indicativos de malas condiciones de combustión.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante para una estrategia integral de control de emisiones. Estas medidas son generalmente aplicables y ayudan a garantizar condiciones de funcionamiento estables.

6.2.1.5 Modificación del proceso

El polvo de gas emitido (también conocido como polvo de horno de cemento) deber ser manipulado cuidadosamente. En muchos casos puede volver a introducirse en el horno siempre que resulte viable y para evitar emisiones excesivas de metales volátiles y sales de álcalis. Cuando este flujo reciclado pueda aprovecharse al máximo reducirá la problemática de la eliminación del polvo. El polvo que no pueda reciclarse debe ser manipulado en condiciones de seguridad verificadas. Según el nivel de contaminantes peligrosos (ej., metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes), este material puede, en algunos casos, considerarse desecho peligroso, en cuyo caso deberá someterse a las correspondientes precauciones especiales de manipulación y eliminación.

Control de las sustancias del Anexo C: Las medidas indirectas para controlar estas sustancias son un elemento importante de una estrategia integral de control de emisiones.

6.2.1.6 Resumen de medidas principales

En general, las medidas principales que se mencionaron anteriormente son suficientes para lograr un nivel de emisiones por debajo de 0.1 ng EQT-l/Nm³ en gases de combustión para plantas nuevas y existentes. Cuando con todas estas opciones no se logra llegar a 0.1 ng EQT-l/Nm³, se pueden prever medidas secundarias, que se describen a continuación.

6.2.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias que se explican a continuación normalmente se emplean para controlar contaminantes, fuera de los contaminantes orgánicos persistentes que se forman involuntariamente, pero también pueden ayudar a la reducción simultánea de las sustancias del Anexo C.

6.2.2.1 Otras mejoras para la reducción y recirculación de polvo

Con estas medidas no se reducirán de los niveles de las sustancias del Anexo C que se encuentren en la fase gaseosa en el escape. Por lo tanto, la efectividad de esta estrategia disminuirá generalmente con el aumento de la temperatura del sistema de recolección de partículas. Pasar de un sistema de no reintroducción del polvo de horno a un sistema de recirculación completa cambiará su composición química con el tiempo, aumentando el contenido de álcali y generando dificultades de operación; una cierta fracción del polvo recolectado debe eliminarse y cuando existen altas tasas de recirculación es

probable que el polvo se enriquezca con metales pesados semivolátiles y volátiles, lo que exigirá procedimientos de manejo cuidadosos y la eliminación libre de riesgos en instalaciones designadas para tratar o contener desechos peligrosos. Aplicabilidad general: requisitos moderados de construcción técnica, buena captación de las fracciones de sustancias del Anexo C ligadas a partículas.

Los hornos rotatorios están por lo general equipados con precipitadores electrostáticos, debido a las temperaturas relativamente altas de los gases de combustión. También se usan filtros de tela, en particular en hornos con precalentador, donde las temperaturas de los gases de combustión son menores.

Los hornos verticales normalmente vienen equipados con filtros de tela. A veces se utilizan depuradores húmedos. Las plantas de molienda de cal utilizan filtros de tela para recolectar el producto y desempolvar el aire de transporte. Las plantas de hidratación, con gases de combustión saturados de agua a 90°C aproximadamente, están equipadas por lo general con depuradores húmedos, aunque los filtros de tela se usan cada vez más cuando la cal de la alimentación tiene una alta reactividad.

Según información de la Unión Europea (European Commission 2001), el material particulado de fuentes puntuales puede eliminarse efectivamente con la aplicación de estos métodos:

- Precipitadores electrostáticos con equipos de medición y control rápidos para disminuir la cantidad de picos de CO
- Filtros de tela con compartimentos múltiples y detectores de roturas

El nivel de emisiones asociado con estas mejores técnicas disponibles es de 20–30 mg polvo/m³ en un día promedio. Este nivel de emisiones puede lograrse con precipitadores electrostáticos o filtros de tela en los distintos tipos de plantas de la industria cementera.

6.2.2.2 Inyección de carbón activado

Cuando se utilizan filtros de tela para controlar las partículas, se puede inyectar carbón activado en polvo antes del filtro de tela y lograr una eliminación muy satisfactoria los metales y compuestos orgánicos. Los contaminantes se recolectan por adsorción en la superficie de carbón a medida que se dispersa en el flujo de escape y a medida que el escape pasa a través de la torta de filtro que se forma dentro de las bolsas de los filtros. Es esencial una temperatura de operación baja para la aplicación satisfactoria de esta técnica, ya que a temperaturas del rango de síntesis *de novo* (250°C – 400°C) el carbón activado podría servir como fuente de carbono para la formación de PCDD/PCDF. Además, el carbón activado funciona mejor en metales adsorbentes y PCDD/PCDF a temperaturas por debajo de 200°C. Al mismo tiempo, la temperatura debe mantenerse por encima del punto de rocío para los gases de combustión a fin de evitar la condensación y la obstrucción de las bolsas. Por lo general se utiliza una temperatura de operación de 160°C aproximadamente, aunque con un monitoreo a cuidadoso pueden lograrse valores algo menores. Por lo general, el control de temperatura se realiza por enfriamiento evaporativo, y habitualmente el carbón se inyecta en el enfriador evaporativo o inmediatamente después. Hay que señalar que si se va a reciclar el polvo en el horno, esta técnica puede no tener una gran eficacia para el control de

emisiones de mercurio, ya que el mercurio captado será reliberado en el horno, y puede que la corriente de purga de polvo del horno de cemento para eliminación tenga que ser una fracción grande del total para que se pueda lograr un control efectivo.

Esta técnica tiene una aplicabilidad general para el control de las sustancias del Anexo C, con una perspectiva de captura muy buena (>90%) cuando las temperaturas de operación están debidamente optimizadas. Los requisitos de construcción técnica son de bajos a moderados, y es más adecuada para casos de modernización que las dos opciones siguientes.

6.2.2.3 Filtro de carbón activado

Esta medida es de gran eficiencia para la eliminación de ciertos contaminantes (>90% en general; >99% para algunos compuestos). Contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos, metales, amoniaco (NH₃), compuestos de amonio (NH₄⁺), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) y polvo residual (después de un precipitador electrostático o filtro de tela) pueden eliminarse de los gases de escape que han sido tratados en un lecho de carbón activado. El único filtro de carbón activado en una fábrica de cemento europea se encuentra en Siggenthal, Suiza. El horno de Siggenthal es un horno de ciclón con precalentador de cuatro etapas con una capacidad de 2,000 toneladas de clinker al día. Las mediciones arrojan altas eficiencias en la eliminación de SO₂, metales y PCDD/PCDF (European Commission 2001).

Control de las sustancias del Anexo C: Aplicabilidad general; construcción técnica compleja.

6.2.2.4 Reducción catalítica selectiva

En general, se utilizan instalaciones de reducción catalítica selectiva para el control de NO_x. El proceso reduce el NO y NO₂ a N₂ utilizando NH₃ como agente reductor en presencia de un catalizador apropiado a una temperatura del orden de 300°C a 400°C, lo que requeriría calentar los gases de escape de un horno de cemento habitual. Sólo una parte de los catalizadores capaces de reducir los óxidos de nitrógeno sirve también para la destrucción de los contaminantes del Anexo C como los PCDD/PCDF. Hasta la fecha, la reducción catalítica selectiva para el control de NO_x sólo se ha probado en sistemas de horno con precalentador y procesos semisecos (Lepol), pero puede ser aplicable también a otros sistemas de hornos (European Commission 2001). Sus costos de capital relativamente altos, además de los fuertes costos de energía por el recalentamiento de los gases de escape necesario para su uso, hacen de ésta una solución probablemente poco rentable para aplicación general. La primera planta a gran escala (Solnhofer Zementwerke) ha estado funcionando desde fines de 1999 (IPTS 2004).

Control de las sustancias del Anexo C: construcción técnica compleja y costos de capital/operación elevados; se espera un excelente control de las sustancias del Anexo C gracias a catalizadores seleccionados apropiadamente.

6.2.2.5 La inyección de carbón activado, una tecnología incipiente

Se puede inyectar carbón activado en polvo antes del filtro recolector, con lo que se puede lograr la eliminación eficiente de metales y compuestos orgánicos. No obstante, cabe hacer las siguientes observaciones:

- Una temperatura de funcionamiento de menos de 160°C es esencial para la aplicación satisfactoria de esta técnica.
- Al mismo tiempo, la temperatura debe mantenerse por encima del punto de rocío ácido para evitar condensación o corrosión.
- Si se va a reciclar el polvo del horno de cemento en el horno, como suele suceder, esta técnica no será efectiva para el control de emisiones de mercurio, ya que el mercurio recolectado volverá a liberarse dentro del horno.
- No se ha demostrado que esta tecnología de inyección de carbón sirva para el control de emisiones de PCDD/PCDF de hornos de cemento y sólo se ha aplicado en incineradores de desechos urbanos.

7. Niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles

Los niveles de desempeño basados en mejores técnicas disponibles para el control de PCDD/PCDF en gases de combustión deberían ser de <0.1 ng EQT-I/Nm³ en condiciones de referencia de 273 K, 101.3 kPa, 11% de O₂ y gas seco.

8. Monitoreo de emisiones contaminantes y parámetros de operación

Para controlar el proceso del horno, se recomienda realizar mediciones de los siguientes parámetros en forma continua (European Commission 2001):

- Presión
- Temperatura
- Contenido de O₂
- NO_x
- CO, y posiblemente cuando la concentración de SO_x sea alta
- SO₂ (se está preparando una técnica para optimizar el CO con NO_x y SO₂)

Además de estos parámetros debería asegurarse el control del mercurio (si el contenido de mercurio en los desechos es alto).

Para cuantificar con exactitud las emisiones, las mediciones continuas constituyen una mejor técnica disponible para los siguientes parámetros (que deberían volver a medirse si sus niveles son susceptibles a cambiar después del momento en que se midieron con fines de control):

- Volumen de emanaciones (se puede calcular pero el proceso es considerado complicado por algunos)
- Humedad
- Temperatura en la entrada del dispositivo de control para material particulado
- Polvo/material particulado
- O₂
- NO_x
- Polvo
- SO₂
- CO

La vigilancia periódica regular constituye una mejor técnica disponible para las siguientes sustancias:

- Metales y sus compuestos
- Carbono orgánico total/compuestos orgánicos
- HCl, HF
- NH₃
- PCDD/PCDF

Ocasionalmente, y en determinadas condiciones de funcionamiento, pueden requerirse estas mediciones:

- Eficiencia de la destrucción y eliminación, en el caso de la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes en hornos de cemento
- Benceno, tolueno, xileno
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos
- Otros contaminantes orgánicos (compuestos orgánicos peligrosos principales, ej., clorobenzenos, PCB, incluidos los congéneres coplanares, cloronaftalenos)

Es de especial importancia realizar mediciones de metales cuando se usen desechos con un alto contenido de metal como materias primas o combustibles.

Referencias

Basel Convention Secretariat. 2005. *General Technical Guidelines for the Environmentally Sound Management of Wastes Consisting of, Containing or Contaminated with Persistent Organic Pollutants (POPs)*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.

Cembureau. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production*. Cembureau, Brussels, Belgium.

CEN (European Committee for Standardization). 1996a. "EN 1948-1: Sampling." Part 1 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN (European Committee for Standardization). 1996b. "EN 1948-2: Extraction and Clean-up." Part 2 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

CEN (European Committee for Standardization). 1996c. "EN 1948-3: Identification and Quantification." Part 3 of *Stationary Source Emissions: Determination of the Mass Concentration of PCDDs/PCDFs*. CEN, Brussels, Belgium.

CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. *Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials*. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.

de Bas P. 2002. *The Economics of Measurement of Emissions into the Air*. European Measurement Project. Pembroke College, Oxford, UK.

DFIU/IFARE (French-German Institute for Environmental Research). 2002. *Cement/Lime Industry*. Draft Background Document in preparation for 5th EGTEI Panel Meeting, 29 November 2002. www.citepa.org/forums/egtei/cement_lime_draft.pdf.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998a. *Technical Background Document on Control of Fugitive Dust at Cement Manufacturing Facilities*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998b. *Technical Background Document on Ground Water Controls at CKD Landfills*. Draft. EPA, Office of Solid Waste, Washington, D.C.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories: Portland Cement Manufacturing Industry: Final Rule*. 40 CFR part 63, 14 June 1999. EPA, Washington, D.C.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. "Combustion Sources of CDD/CDF: Other High Temperature Sources." Chapter 5, *Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds, Part I: Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds*. EPA/600/P-00/001Bb. EPA, Washington, D.C., September 2000.

European Commission. 2001. *Reference Document on the Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.

Fabrellas B., Larrazabal D., Martinez M.A., Sanz P., Ruizl M.L., Abad E. and Rivera J. 2004. "Global Assessment of PCDD/PCDF Emissions from the Spanish Cement Sector: Effect of Conventional/Alternative Fuels." *Organohalogen Compd.* 66:905–911.

Holcim. *Sustainable Development: Environmental Performance*. www.holcim.com.

Holsiepe D., Shenk R. and Keefe B. 2001. *Partners in Progress: A Case Study on Upgrading for the New Millennium, Part 1*. Cement Americas.
cementtour.cementamericas.com/ar/cement_partners_progress_case_2/.

IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). 2004. *Promoting Environmental Technologies: Sectoral Analyses, Barriers and Measures*. Draft Report EUR 21002 EN, European Communities.

Karstensen K.H. 2006a. *Cement Production in Vertical Shaft Kilns in China: Status and Opportunities for Improvement*. Report to the United Nations Industrial Development Organization, 31 January 2006.

Karstensen K.H. 2006b. *Formation and Release of POPs in the Cement Industry*. Second edition, January 2006. World Business Council for Sustainable Development/SINTEF.

Lohse J. and Wulf-Schnabel J. 1996. *Expertise on the Environmental Risks Associated with the Co-Incineration of Wastes in the Cement Kiln "Four E" of CBR Usine de Lixhe, Belgium*. Okopol, Hamburg, Germany. www.oekopol.de/Archiv/Anlagen/CBRBelgien.htm.

Portland Cement Association. *Industry Overview*. www.cement.org/basics/cementindustry.asp.

Sutou K., Harada H. and Ueno N. 2001. *Chlorine Bypass System for Stable Kiln Operation and Recycling of Waste*. Technical Conference on Cement Process Engineering, 21st Plenary Session of the VDZ Process Engineering Committee, Düsseldorf, Germany, 22 February 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf.

WISE (Waste Indicator System for the Environment). 2002. *Volume of Cement Kiln Dust Produced and Reused*. Indicators: Environmental Issue 1, Waste Generation.
www.pepps.fsu.edu/WISE/.

Wulf-Schnabel J. and Lohse J. 1999. *Economic Evaluation of Dust Abatement in the European Cement Industry*. Report prepared for the European Commission DG XI, Contract No. B4-3040/98/000725/MAR/E1. www.oekopol.de/en/Archiv/archiv.htm.

Otras fuentes

Environment Canada. 1999. *Level of Quantification Determination: PCDD/PCDF and Hexachlorobenzene*. Environment Canada, Environmental Technology Centre, Analysis and Air Quality Division. www.ec.gc.ca/envhome.html.

Holcim. 2004. *Guidelines on Co-Processing of Waste Material in Cement Production*. Version 6. Cooperation of Holcim and GTZ, December 2004.

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. 1997. *Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe*. Commissioned by EC DG XI, LUA-Materialien No. 43. European Dioxin Inventory.

Marlowe I. and Mansfield D. 2002. *Toward a Sustainable Cement Industry*. Substudy 10: Environment, Health and Safety Performance Improvement. AEA Technology.
www.wbcscement.org/.

Stieglitz L., Jay K., Hell K., Wilhelm J., Polzer J. and Buekens A. 2003. *Investigation of the Formation of Polychlorodibenzodioxins/Furans and of Other Organochlorine Compounds in Thermal Industrial Processes*. Scientific Report FZKA 6867. Forschungszentrum Karlsruhe.

- ¹ Comunicación de CEMBUREAU (2006).
- ² Este Documento de referencia se encuentra actualmente (2006) en revisión.
- ³ Comunicación del CEMBUREAU a *Cement & Lime BREF Revision Energy Efficiency*, 15 de mayo de 2006
- ⁴ Comunicación de IPEN
- ⁵ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para información sobre las mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de las presentes directrices.
- ⁶ El proceso seco sólo es apropiado si se usa piedra caliza como materia prima de alimentación. Se puede utilizar la tecnología de precalentador/precalcinador para procesar el yeso, secando la lechada de yeso en una secadora instantánea en el extremo frontal del proceso.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/3

Sección VI.M
Sección VII.L
Sección VII.K
Sección VII.J
Sección VII.I
Sección VII.H
Sección VII.G
Sección VII.F
Sección VII.E
Sección VII.D
Sección VII.C
Sección VII.B
Sección VII.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.B
Sección V.A
Secciónes I-IV

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Producción de pasta de papel utilizando
cloro elemental o productos químicos
que generan cloro elemental



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

MAYO DE 2007, GINEBRA, SUIZA

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

V.C. Producción de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que generan cloro elemental	9
1. Introducción	9
1.1 Materias primas	11
1.2 Tecnología y producto final	11
2. Descripción del proceso	12
2.1 Métodos de elaboración de pasta	12
2.2 Blanqueo	16
3. Mejores técnicas disponibles para la producción de pasta con cloro elemental	19
3.1 Medidas principales	19
3.2 Medidas secundarias	20
4. Alternativas	21
4.1 Blanqueo totalmente libre de cloro para pasta kraft	21
4.2 Blanqueo TCF de pasta no maderera	22
5. Niveles de desempeño alcanzables con mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	22
5.1 Informes de desempeño	23
5.2 Normas de ejecución	23
Referencias	25
Otras fuentes	25

Tablas

Tabla 1. Tratamientos químicos de blanqueo comunes	16
Tabla 2. Resumen de las normas de ejecución vigentes para fábricas de pasta de papel	23

Ilustraciones

Figura 1. Eliminación de 2,3,7,8-TCDF con un aumento de la sustitución de dióxido de cloro por cloro	11
Figura 2. Esquema de flujo habitual de un proceso moderno para fabricación de pasta kraft con blanqueo ECF	13
Figura 3. Esquema de flujo habitual para la elaboración de pasta con paja de trigo utilizando el sistema de digestor continuo Pandia	13

Figura 4.	Efecto del nivel de múltiplo de cloro activo y del nivel de sustitución del dióxido de cloro en la formación de 2,3,7,8-TCDD	18
Figura 5.	Tendencias en la producción de pasta con blanqueo químico: Mundial, salvo China y la India.....	22

■ Resumen

Los procesos principales de la fabricación de productos de papel y pasta de papel son el manejo y la preparación de materias primas, almacenamiento (y la conservación de materiales no madereros), descortezado de madera, astillado y limpieza de residuos agrícolas, eliminación de nudos, elaboración de pasta, procesamiento y blanqueo de la pasta, si es necesario y, finalmente, la fabricación de papel o cartón.

Se ha determinado que, de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, sólo se generan PCDD y PCDF durante la producción de pasta de papel a base de cloro elemental. De los 17 congéneres de PCDD/PCDF con cloro en las posiciones 2,3,7 y 8, sólo dos congéneres, a saber 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF, se han identificado como posiblemente producidos durante el blanqueo químico de pasta de papel a base de cloro. La mayor parte de la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF ocurre en la etapa C del blanqueo por la reacción del cloro con precursores de TCDD y TCDF. No se forman HCB ni PCB durante el blanqueo de la pasta de papel.

En resumen, pueden tomarse las siguientes medidas primarias para disminuir o eliminar la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF durante los procesos de blanqueo de materiales madereros y no madereros: eliminar el cloro elemental reemplazándolo por dióxido de cloro (blanqueo libre de cloro elemental) o, en algunos casos, por procesos totalmente libres de cloro, reducir la utilización de cloro elemental disminuyendo el múltiplo de cloro o aumentando la sustitución de dióxido de cloro por cloro molecular, disminuir los precursores como dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos que ingresan en la planta de blanqueo usando aditivos libres de precursores y un lavado intensivo, aumentar la eliminación de nudos, y eliminar la elaboración de pulpa con materiales contaminados con fenoles policlorados.

1. Introducción

El siguiente proyecto de directrices proporciona orientación sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el blanqueo químico de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que generan cloro elemental. En una planta de blanqueo de pasta pueden liberarse PCDD/PCDF en varias etapas del proceso: en los efluentes vertidos en agua o tierra, por las emisiones al aire provenientes de las calderas de recuperación (véase sección VI.E.), y por los residuos enviados a vertederos (véase sección III.C. (ii) de estas directrices).

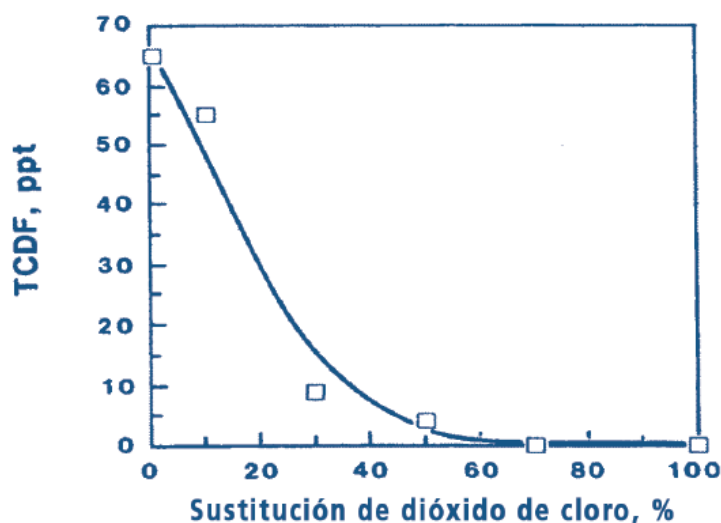
Entre las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo figuran las dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), hexaclorobenceno (HCB) y bifenilos policlorados (PCB), de los cuales, ni el HCB ni los

PCB se producen o se han producido intencionalmente durante el blanqueo químico de pasta de papel. Además, de los 17 congéneres de PCDD/PCDF con cloro en las posiciones 2,3,7 y 8 y que se considera que expresan una toxicidad similar a las dioxinas, se ha determinado que sólo dos: 2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina (2,3,7,8-TCDD) y 2,3,7,8-tetraclorodibenzofurano (2,3,7,8-TCDF), tienen probabilidades de generarse durante el blanqueo químico de pasta de papel. Por lo tanto, cualquiera de las mejores técnicas disponibles y de las mejores prácticas ambientales en el contexto del blanqueo químico de pasta de papel utilizando cloro elemental o productos químicos que generan cloro elemental deberían apuntar a la reducción y eliminación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF. Los compuestos orgánicos halogenados (AOX) no muestran correlación con las dioxinas o los furanos, y por consiguiente, no se analizan en esta sección.

A mediados de la década de 1980, el descubrimiento de dioxinas y furanos en efluentes de fábricas de papel que empleaban cloro e hipoclorito en sus secuencias de blanqueo impulsó muchas investigaciones sobre formas de reducir o eliminar su formación. La intensa investigación a nivel internacional demostró que el mecanismo principal para la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF es la cloración de los compuestos precursores de dibenzodioxinas (DBD) y dibenzofuranos (DBF) presentes en la pasta sin blanquear a través de la sustitución electrofílica aromática. Se disminuirá la formación de 2,3,7,8-TCDF aumentando la sustitución de dióxido de cloro, como se muestra en la Figura 1. El uso de cloro molecular en el blanqueo se ha reemplazado generalmente por dióxido de cloro (LCE, libre de cloro elemental) y otras sustancias oxigenadas como óxido molecular, peróxido y ozono (TLC, totalmente libre de cloro).

Más del 80% del total de la pasta química proviene del proceso kraft (Gullichsen and Fogelholm 2000). Sin embargo, más del 10% de la producción mundial de pasta se elabora con fibras no madereras y en algunos países, por ejemplo China y la India, son la fuente predominante de fibra. En China, más del 24 % de la pasta utilizada en la industria del papel se produce con paja de trigo, junco, bambú y otras fuentes no madereras, mientras que en los países occidentales, el uso de fuentes no madereras es, en la actualidad, muy bajo. En promedio, la quinta parte de la producción mundial corresponde a materias primas no madereras. En 1998, 107 fábricas de papel y cartón de Escandinavia elaboraron 25 millones de toneladas de productos, mientras que aproximadamente 6,000 fábricas chinas generaron 28 millones de toneladas (Edelmann *et al.* 2000). En 2005 cerca de 3600 fábricas de China produjeron 56 millones de toneladas de papel y cartón (informe anual de la industria china del papel, 2005).

■ **Figura 1. Eliminación de 2,3,7,8-TCDF con un aumento de la sustitución de dióxido de cloro por cloro**



1.1 Materias primas

La pasta y el papel se fabrican con materiales derivados de la madera y con muchos tipos de materiales no madereros, como paja, bagazo, bambú, junco y kenaf. En la actualidad, la madera cubre más del 90% de la demanda de fibra virgen mundial, mientras que las fuentes no madereras suministran el resto. En 2005, la producción de pastas químicas madereras fue de aproximadamente 126 millones de toneladas, y la de pastas no madereras, de 17 millones de toneladas (estadísticas de *FAOSTAT*). Las pastas no madereras se elaboran principalmente en países en vías de desarrollo, pero por muchas razones las fibras de pasta de papel no madereras han suscitado un renovado interés en Europa oriental y occidental, así como en Norteamérica (Paavilainen 1998).

La madera y los principales materiales no madereros usados en la fabricación de papel representan una compleja mezcla de las mismas sustancias: celulosa (40%–45%), hemicelulosas (25%–35%), lignina (20%–30%) y extractos (2%–15%). La mayoría de los materiales lignocelulósicos y celulósicos de estructura fibrosa pueden procesarse para obtener diversos grados de papel y cartón. No obstante, las fibras de las distintas materias primas no son iguales, sino que se distinguen considerablemente por sus características morfológicas y químicas, que las hacen adecuadas para distintas clases de grados de productos finales (Paavilainen 1998). La paja de trigo o arroz es la materia prima no maderera más común. La paja produce una pasta de fibra corta, parecida a la pasta de maderas duras. El alto contenido de sílice es típico de los materiales no madereros (Myréen 2000).

1.2 Tecnología y producto final

La tecnología para elaborar y blanquear pasta de papel debe corresponder a la calidad y características de los grados de pasta y de papel que se va a fabricar. No existe un único proceso de elaboración o blanqueo que pueda producir una pasta adecuada para todos los usos. Por ejemplo, el papel de periódico es un producto de alto volumen, de resistencia, opacidad y capacidad para impresión moderadas, y tiene una vida

relativamente corta. Por consiguiente, puede fabricarse pasta en grandes cantidades a expensas de una máxima resistencia y brillo, y el brillo natural de las pastas determinará la mayor o menor necesidad de blanqueo. Por su parte, los papeles de embalaje deben ser resistentes: en este caso hay que conformarse con una producción menor, por medios de fabricación distintos, a fin de obtener esta resistencia, pero es posible que la necesidad de blanqueo sea poca. El nivel de deslignificación y blanqueo aplicado debe ser alto en el caso de papeles para escribir e imprimir, así como para la capa exterior de cartones de embalaje — cuyo brillo y durabilidad debe conservarse durante años sin amarillamiento. Por lo tanto, el esfuerzo requerido por el blanqueo es muy variable.

2. Descripción del proceso

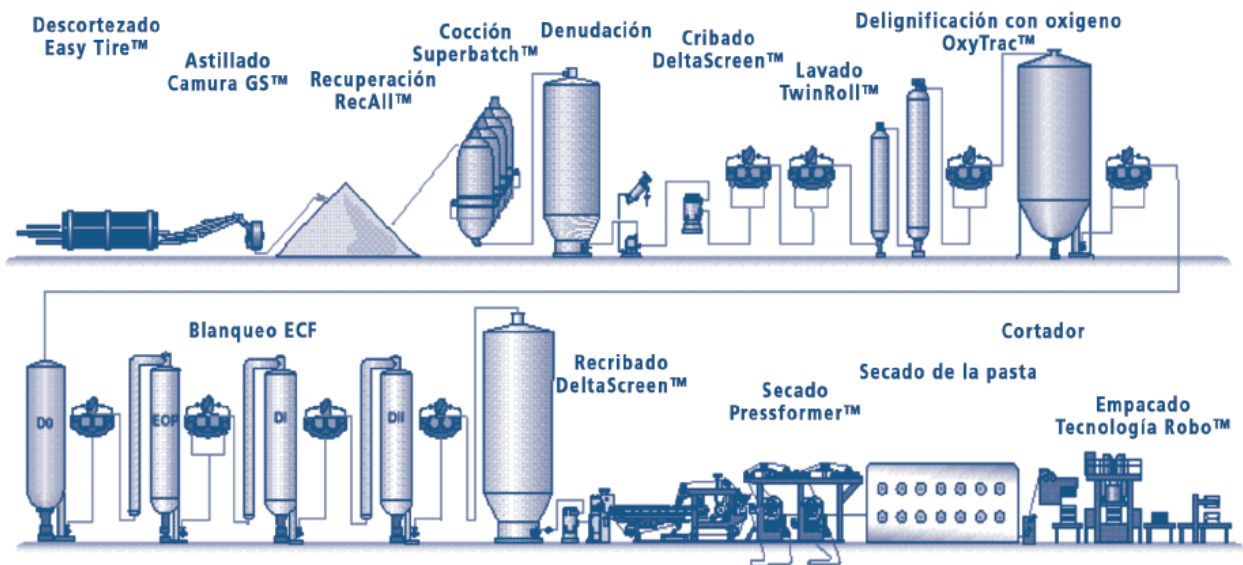
2.1 Métodos de elaboración de pasta

Los procesos principales de la fabricación de productos de papel y pasta de papel son el manejo y la preparación de materias primas, almacenamiento (y la conservación de materiales no madereros), descortezado de madera, astillado y limpieza de residuos agrícolas, eliminación de nudos, elaboración de pasta, procesamiento y blanqueo de la pasta, si es necesario y, finalmente, la fabricación de papel o cartón.

La fabricación de pasta utiliza métodos mecánicos, termomecánicos, mecánico-químicos y químicos. En los procesos de elaboración mecánicos se trituran los troncos y se usan refinadores de disco para las astillas. En estos procesos, se utilizan fuerzas mecánicas de corte para separar las fibras, y la mayor parte de la lignina permanece en las fibras, aunque se dé una disolución significativa de material orgánico. El paso siguiente es la refinación secundaria con disco y traspaso directo a una máquina de papel. Con frecuencia, las pastas mecánicas pueden usarse sin blanquear, pero cuando se aplica abrillantado se deben utilizar compuestos como ditionita o peróxidos (Gullichsen and Fogelholm 2000).

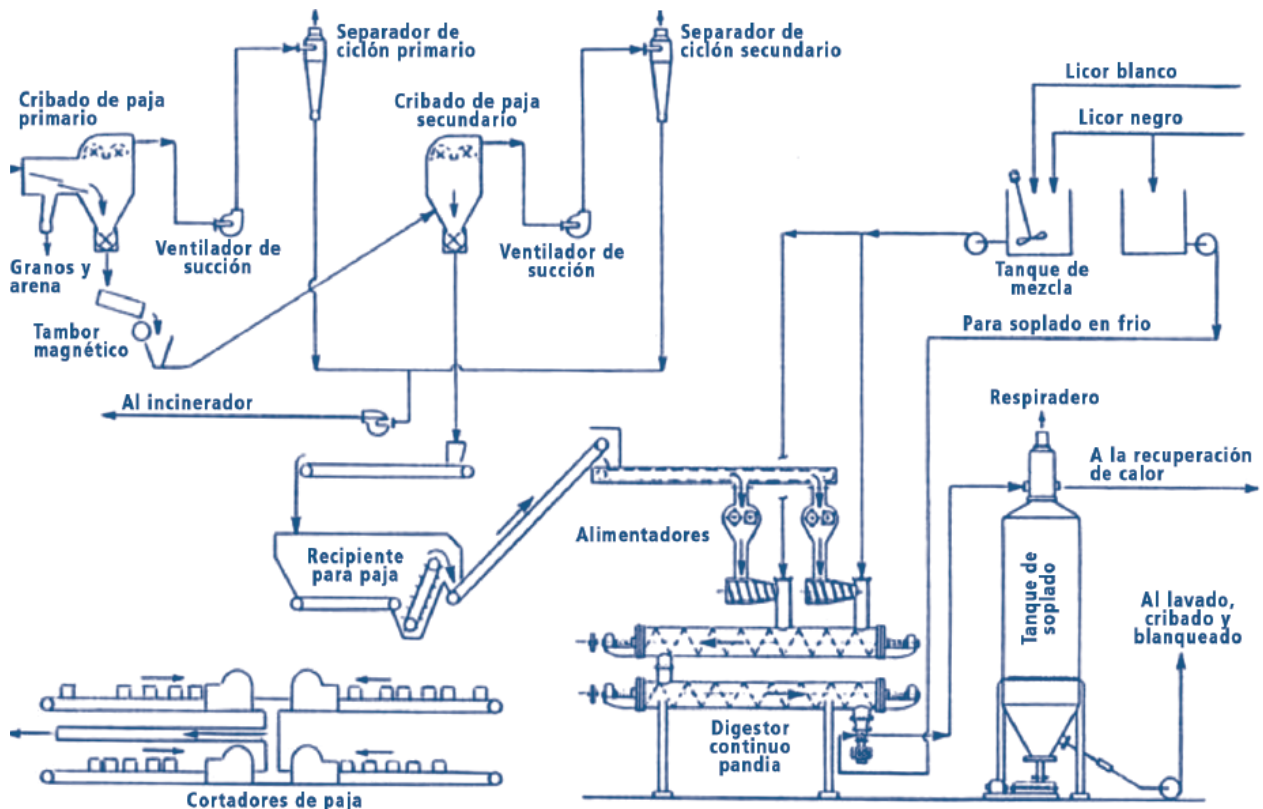
La lignina une las fibras de la estructura de la madera. En la fabricación química de pasta, la liberación de las fibras se ve facilitada por las sustancias que disuelven la lignina. De esta forma, la lignina y muchas otras sustancias orgánicas se ponen en solución en recipientes a presión, llamados digestores, que son como ollas a presión estacionarias verticales, para materia prima maderera. Se emplean digestores cilíndricos esféricos giratorios o digestores cilíndricos agitadores en los sistemas para elaboración de pasta por lotes en diversos procesos químicos para material no maderero. En las Figuras 2 y 3 se ilustran esquemas de flujo típicos de procesos madereros y no madereros. La lignina residual de las fibras se elimina por blanqueo con agentes reactivos. Se han realizado algunos intentos de usar enzimas para mejorar el efecto de las sustancias químicas. El uso de enzimas se ha visto limitado porque genera menor rendimiento, repercute en las propiedades de la fibra e implica mayores costos.

■ **Figura 2. Esquema de flujo habitual de un proceso moderno para fabricación de pasta kraft con blanqueo ECF**



Fuente: Metso Automation Inc.

■ **Figura 3. Esquema de flujo habitual para la elaboración de pasta con paja de trigo utilizando el sistema de digestor continuo Pandia**



Fuente: Kocurek 1983.

Las principales técnicas químicas, semiquímicas y mecánico-químicas para la elaboración de pasta de papel son las siguientes:

- Sulfato (kraft): Utiliza una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio en condiciones alcalinas para disolver la lignina de las fibras madereras y de la mayor parte de las no madereras (método químico).
- Sulfito: Métodos de ácido bisulfito, bisulfito, alcalino y sulfito neutro (Ca, Mg, NH₄, Na); distintas bases, en particular antraquinona, a diferentes pH, para disolver la lignina; para la mayor parte de fibras madereras (métodos químico y semiquímico).
- Cal, cal-sosa: En particular, fibras no madereras.
- El método de sosa en frío, utiliza un pretratamiento de hidróxido de sodio a temperatura ambiente, con o sin carbonato sódico: en particular, fibras de maderas duras y no madereras (semiquímico).
- Sosa y antraquinona (AQ): Hidróxido de sodio solo o con carbonato sódico y antraquinona como catalizador; fibras de maderas duras y no madereras (método químico, similar al kraft pero sin azufre), pocos olores.
- Métodos organosolv: Aplicaciones madereras y no madereras, algunas probadas en planta, pero sólo un proceso está disponible en el comercio.

El proceso kraft o de sulfato es el método de elaboración de pasta predominante a nivel mundial; constituye el 84% de la producción mundial química de pasta y el 63% de la producción total química y mecánica de pasta.

Las pastas no madereras se elaboran casi exclusivamente con procesos químicos y semiquímicos. De los métodos químicos para fabricación de pasta con materiales no madereros, el proceso de sosa es el más importante, seguido del proceso kraft y del proceso de sulfito neutro. Todavía están en funcionamiento fábricas que utilizan procesos tradicionales de cal y cal-sosa (Edelman *et al.* 2000; *Proceedings* 1992). Se están investigando muchos procesos nuevos para fabricar pasta no maderera.

2.1.1 El proceso kraft (sulfato) para elaboración de pasta de papel

El proceso kraft usa una solución alcalina para fabricar pasta de base sódica compuesta de sulfuro de sodio (Na₂S) e hidróxido de sodio (NaOH). Las fibras se liberan en la planta de cocción mediante la disolución de la lignina y parte de la hemicelulosa en la solución química de cocción (licor blanco). El licor de cocción usado (licor negro) se recupera para generar licor blanco para el primer paso de fabricación de papel. En fábricas con recuperación química se quema la mayor parte de las sustancias madereras disueltas, y el agua residual contiene principalmente los materiales orgánicos en forma de condensados; en plantas de blanqueo contiene las sustancias disueltas durante el blanqueo y los residuos de las sustancias para blanqueo. Muchas fábricas pequeñas no recuperan el licor.

La recuperación de licores de fibra no maderera es problemática por el alto contenido de sílice en los materiales de fibra y el rápido aumento de la viscosidad del licor durante la evaporación. Asimismo, resulta difícil alcanzar un alto contenido de sólidos en el licor concentrado que se introduce en el sistema de recuperación. Sin embargo, este área de

la tecnología de recuperación está recibiendo actualmente mucha atención y se han propuesto algunos procesos como viables.

2.1.2 Procesos de cal y sosa

Estos procesos utilizan licores alcalinos simples para cocción en un proceso parecido al proceso kraft pero sin utilizar compuestos de azufre. En fábricas sin recuperación química, todas las sustancias madereras disueltas y las sustancias químicas de la fabricación y blanqueo de pasta quedan en las aguas residuales, aparte de las sustancias volátiles que se liberan accidentalmente a la atmósfera. La capacidad de deslignificación es insuficiente para producir pastas madereras con bajo rendimiento y gran brillo. Su aplicación en pastas no madereras es extendida, y también se utiliza junto con oxígeno para fabricar pasta de paja. En el proceso de sosa el procedimiento químico es más simple, ya que no se agrega azufre y por lo tanto, no se forman subproductos no deseados, y el hidróxido puede recuperarse mediante caustificación con cal del carbonato de sodio fundido. Después de la cocción, se refinan las pastas que no se blanquearán para separar las fibras.

2.1.3 Procesos de sulfito

El proceso de sulfito se realiza con dióxido de azufre acuoso y una base: calcio, sodio, magnesio o amoníaco. Este método está perdiendo su importancia y sólo se utiliza en el 10% de la pasta que se produce a nivel mundial. Las fábricas de sulfito alcalino para fibras no madereras suelen operar con procesos por lotes, y generalmente no se efectúa la recuperación química en estas fábricas debido a su pequeño tamaño y a la complejidad de la recuperación química de lo que normalmente es un proceso en base a sodio. Comparado a las pastas kraft, las pastas de sulfito son relativamente brillantes y además, son relativamente fáciles de blanquear con sustancias oxigenadas, como los peróxidos.

2.1.4 Procesos con solventes

Los procesos de fabricación de pasta por medio de solventes pueden utilizarse con materiales madereros y no madereros. Estos procesos organosolv usan, entre otros, los siguientes solventes: ácido fórmico, ácido peroxifórmico, ácido acético, etanol, metanol y acetona (Rousu and Antila 2002; Laxén and Halttunen 1992; Stern 2003; Edelman *et al.* 2000). La mayor parte de los métodos de cocción con alcohol y ácido no contienen azufre y producen una pasta de fácil blanqueo. Algunos métodos de cocción con solventes son más adecuados para maderas duras (ej., Alcell) y otros para materia prima de maderas duras y maderas blandas (ej., NAEM, Organocell, Acetocell, Formacell y ASAM). Sin embargo, ninguna de estas técnicas sugeridas ha resultado viable en funcionamiento comercial, y se han cerrado las líneas de producción piloto. Se ha estudiado la aplicabilidad de la fabricación de pasta en base a solventes para material no maderero (ej., Alcell, Milox, Chempolis). En comparación con la fabricación kraft tradicional, a base de material no maderero, algunos experimentos en laboratorio muestran que el rendimiento de las pastas organosolv no madereras es mayor con procesos de etanol-sosa, ASAM y Organocell (Shatalov and Pereira 2005). Los procesos a escala experimental de Milox, Formacell, y ASAM generan pastas con mejores condiciones para el blanqueo (Gullichsen and Fogelholm 2000).

2.2 Blanqueo

El blanqueo después de elaborar la pasta es un proceso químico aplicado a las pastas para aumentar su brillo. Para obtener el nivel de brillo deseado, el blanqueo debería realizarse eliminando la lignina residual de las pastas químicas (blanqueo por deslignificación o eliminación de lignina). No se puede eliminar toda la lignina de forma suficientemente selectiva en una sola etapa de blanqueo; lo habitual es emplear de tres a seis etapas. Las dos primeras fases se encargan sobre todo de liberar y extraer la lignina, y en las siguientes se eliminan los residuos de lignina y se termina el producto. Estas secuencias de blanqueo se aplican para potenciar el efecto blanqueador de cada componente. Se usa agua para realizar lavados intermedios a fin de eliminar desechos extraídos de la pasta (Gullichsen and Fogelholm 2000; Stenius 2000). En la Tabla 1 figuran los tratamientos químicos que se suelen aplicar en el blanqueo.

■ **Tabla 1. Tratamientos químicos de blanqueo comunes**

Tratamiento	Abreviatura	Descripción
Cloración	C	Reacción con cloro elemental en un medio ácido
Extracción alcalina	E	Disolución de productos de la reacción con NaOH
Hipoclorito	H	Reacción con hipoclorito en un medio alcalino
Dióxido de cloro	D	Reacción con dióxido de cloro (ClO ₂)
Cloro y dióxido de cloro	CD	El dióxido de cloro se agrega en la etapa de cloración
Oxígeno	O	Reacción con oxígeno molecular a alta presión en un medio alcalino
Extracción con oxígeno	EO	Extracción alcalina con oxígeno
Peróxido	P	Reacción con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) en un medio alcalino
Quelación	Q	Reacción con un agente EDTA o DTPA quelante en un medio ácido para eliminar metales
Ozono	Z	Con ozono usando ozono gaseoso (O ₃)

Si se excluyen el cloro molecular y el hipoclorito, el término usado para la secuencia de blanqueo es blanqueo con dióxido de cloro o blanqueo libre de cloro elemental (ECF). Si la secuencia sólo utiliza sustancias químicas oxigenadas, sea oxígeno, ozono, peróxido alcalino o ácido, pueden usarse los términos blanqueo químico con oxígeno o blanqueo totalmente libre de cloro (TCF)

Para pastas kraft de maderas blandas, se aplica una cantidad de secuencias de blanqueo que utilizan de cuatro a seis etapas para lograr un brillo de blanqueo total (nivel de 89%–91%). Las secuencias de blanqueo (brillo total) como CEHDED y CEDED se utilizaban en los años sesenta y setenta. Algunas secuencias más comunes en fábricas modernas son OD(EOP)D, OD(EOP)DP, Q(PO)DD, Q(PO)(DQ)(PO) y (Z(EO))DD (brillo total).

Con una etapa de deslignificación con oxígeno o etapa de extracción reforzada, las secuencias de blanqueo podrían ser las siguientes: O(D+C)(EO)D; O(CD)EDED; y O(D)(EO)DED.

Las maderas duras son más fáciles de blanquear por su bajo contenido de lignina. Además, se requiere menos esfuerzo para blanquear pastas de sulfito debido a su mayor brillo previo al blanqueo.

Trátase de materias primas madereras o no madereras, el proceso de fabricación de pasta elimina parte de la lignina. Después de la elaboración pueden usarse diversas sustancias y catalizadores para eliminar la lignina. Normalmente estas sustancias contienen cloro gaseoso y dióxido de cloro. Para pastas no madereras, todavía es muy común aplicar una etapa de blanqueo con hipoclorito o el blanqueo convencional de cuatro etapas (CEHH, CEHD), según las exigencias de brillo final (Zheng *et al.* 1997). Más recientemente, se ha utilizado oxígeno presurizado, ozono y peróxido de hidrógeno (Stern 2003).

2.2.1 Blanqueo con cloro elemental y ácido hipocloroso

El cloro elemental y el ácido hipocloroso son agentes químicos del blanqueo electrofílico que reaccionan con todas las estructuras no saturadas, particularmente estructuras de lignina, con productos de la degradación de polisacáridos, como el ácido hexenurónico, y con estructuras extractivas que contienen enlaces dobles carbono-carbono. Estos agentes de blanqueo electrofílico pueden reaccionar con distintos átomos de carbono aromático no sustituido en lignina para:

- a. Clorar (cuando el carbono no está unido a un átomo de oxígeno), o
- b. Clorar y despolimerizar (por desplazamiento de un grupo de - hidróxilo), o
- c. Despolimerizar simplemente sin clorar (mediante hidroxilación)

Estas reacciones de cloración o a la despolimerización hacen a la lignina soluble en álcali, y puede eliminarse de la pasta en las fases de blanqueo alcalinas de la secuencia de blanqueo.

2.2.2 Formación de 2,3,7,8-TCDD/TCDF

La mayor parte de la formación de 2,3,7,8- tetraclorodibenzoparadioxina (2,3,7,8-TCDD) y 2,3,7,8- tetraclorodibenzofurano (2,3,7,8-TCDF) se produce en la etapa C por la reacción del cloro con el precursor de TCDD, a saber, la dibenzoparadioxina (DBD), y con el precursor de TCDF, que es el dibenzofurano no clorado (DBF). Cuando estos precursores son clorados, la reacción clave es la sustitución electrofílica aromática. La tasa de esta reacción dependerá de la concentración del precursor y de la concentración

del cloro. Los niveles de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF no están determinados por el contenido de lignina en la pasta (Berry *et al.* 1989).

La cloración de estructuras no aromáticas, como el ácido hexenurónico, no induce la formación de productos de la degradación aromáticos policlorados.

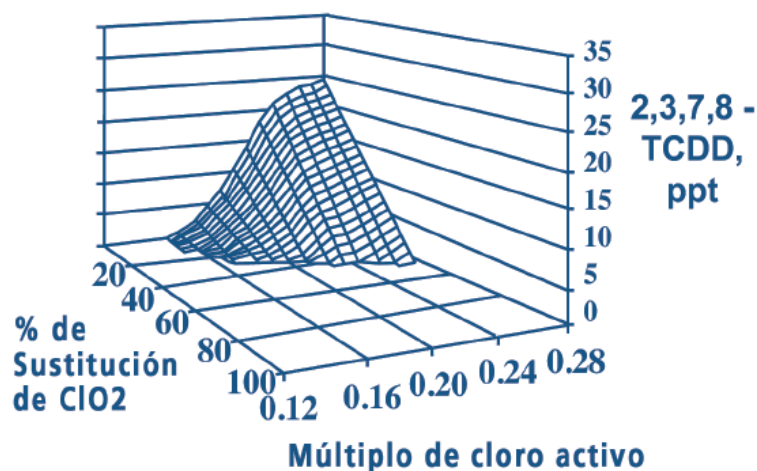
Los precursores no clorados de las dioxinas son frecuentes en ciertos aceites minerales, que forman parte de preparaciones antiespumantes usadas en la industria de pasta y papel y son la fuente principal de precursores. La propia madera puede actuar como fuente de precursores de dioxinas. En particular, la madera de compresión contiene concentraciones más altas de precursores que la madera normal. Asimismo, la compresión de madera conlleva niveles más altos de lignina del tipo coumaril, que puede ser una fuente de precursores similares a DBD y a DBF.

2.2.3 Mecanismos de eliminación para 2,3,7,8-TCDD/TCDF

La forma principal de evitar la formación de 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF en el blanqueo es usar un método de blanqueo totalmente libre de cloro, y puede lograrse una eliminación efectiva disminuyendo la cantidad de cloro utilizado en la primera etapa de blanqueo. Para ello, se reduce el múltiplo de cloro atómico mejorando el lavado previo a la cloración con una etapa de extracción de oxígeno y peróxido reforzada, y aumentando la sustitución del ClO_2 (Rappe *et al.* 1989; Tana and Lehtinen 1996). La formación de 2,3,7,8-TCDF y 2,3,7,8-TCDD se reducirá aumentando la sustitución de ClO_2 , como se demuestra en las Figuras 1 y 4. Cuando el nivel de sustitución de ClO_2 es mayor al 85%, el 2,3,7,8-TCDF y 2,3,7,8-TCDD pueden eliminarse efectivamente.

El efecto resumido del múltiplo de cloro activo¹ y del nivel de sustitución de ClO_2 puede apreciarse en la Figura 4. El nivel de formación de dioxinas en estas condiciones, es decir, múltiplo alto de cloro activo y baja sustitución de ClO_2 , se prevé que varíe según el contenido de DBD en la pasta cruda.

■ **Figura 4. Efecto del nivel de múltiplo de cloro activo y del nivel de sustitución del dióxido de cloro en la formación de 2,3,7,8-TCDD**



El cloro elemental puede reemplazarse íntegramente por ClO_2 (blanqueo libre de cloro elemental). Por lo general, en este proceso el ClO_2 es el agente blanqueador principal. El cloro elemental puede reemplazarse por ClO_2 en la primera etapa de blanqueo porque

el ClO_2 por átomo de cloro tiene un poder de oxidación cinco veces mayor en comparación con el cloro y prácticamente tiene las mismas propiedades para eliminación selectiva de la lignina. Reforzar las etapas de extracción alcalinas en el blanqueo con oxígeno y/o peróxido de hidrógeno produce un aumento en el efecto oxidante del blanqueo, que reduce el contenido de lignina residual de la pasta antes de las etapas finales de blanqueo con ClO_2 . Aumentar el grado de sustitución de ClO_2 disminuye la formación de sustancias orgánicas cloradas y elimina la formación de dioxinas y furanos. Este aumento en la sustitución de cloro por ClO_2 generalmente exige modificaciones en el proceso de blanqueo y, también la ampliación de la planta de dióxido de cloro *in situ*.

El proceso de blanqueo libre de cloro elemental es diferente en maderas blandas y maderas duras, y en las fábricas existentes las posibilidades del concepto dependen del proceso de blanqueo que se siga. Por lo general, para lograr cierto nivel de brillo las maderas duras necesitan menos sustancias químicas que las maderas blandas, lo que suele significar que el número de etapas de blanqueo puede reducirse. Con los años la dosis de dióxido de cloro ha disminuido un tercio en el blanqueo de maderas duras ya que se ha sustituido por sustancias oxigenadas. Ejemplos de secuencias de blanqueo ligero libre de cloro elemental son (DZ)(EOP)D, (DQ)(PO) y D(EOP)D(PO), que pueden utilizarse con maderas duras y maderas blandas, según el brillo deseado (European Commission 2000).²

Se forman pequeñas cantidades de cloro como un subproducto en los sistemas de generación de dióxido de cloro. Parte de esta impureza de cloro molecular estará presente cuando se use dióxido de cloro como reactivo de blanqueo. Existen varios procesos de preparación de dióxido de cloro que producen distintas cantidades de cloro elemental como un subproducto. Por lo tanto, una selección cuidadosa del método de generación de dióxido de cloro disminuirá la formación de impurezas de cloro molecular y la formación involuntaria de dioxinas.

La pasta de papel libre de cloro elemental (pasta kraft) blanqueada con ClO_2 ocupa el lugar predominante en la industria, y representa aproximadamente tres cuartos de la producción mundial de pasta blanqueada.

3. Mejores técnicas disponibles para la producción de pasta con cloro elemental

3.1 Medidas principales

Las principales mejores técnicas disponibles para disminuir o evitar la formación de 2,3,7,8-TCDD/TCDF en procesos de blanqueo de material maderero y no maderero son las siguientes:

- Reducción de la utilización de cloro elemental mediante la reducción del múltiplo o del incremento de la sustitución de ClO_2 con cloro molecular.
- Eliminación de cloro elemental reemplazándolo con ClO_2 (blanqueo libre de cloro elemental) o con sustancias libres de cloro.

- Utilización de DBD y DBF libres de antiespumantes.
- Evitar el uso de materias primas no madereras (junco) que estén o puedan estar contaminadas con PCDD/PCDF como impurezas en pentaclorofenolato de sodio (Zheng 1997).
- Lavado efectivo de la pasta cruda para reducir el múltiplo de cloro.
- Mejorar la eliminación de nudos y suciedad para lograr la reducción del múltiplo de cloro.
- Eliminación de la fabricación de pasta con materiales contaminados con fenoles policlorados.

3.2 Medidas secundarias

Se sugieren las siguientes medidas secundarias:

- **Sustitución:** Identificación de sustancias potencialmente peligrosas y sustitución por alternativas menos dañinas. Uso de un inventario detallado de las materias primas utilizadas, composición química, cantidades, destino e impacto ambiental.
- **Planificación/ciclos de inversión:** Coordinar las mejoras en los procesos a fin de reducir los retrasos en la introducción de mejores técnicas debidos a dificultades de orden técnico.
- **Capacitación, educación y motivación del personal:** La capacitación del personal puede ser una manera económica y efectiva de reducir las descargas de sustancias peligrosas.
- **Control, monitoreo y optimización del proceso:** Para poder disminuir los distintos contaminantes en forma simultánea y mantener bajos los niveles de liberaciones, se requiere un mejor control del proceso, en particular la especificación de las materias primas y el monitoreo para detectar la presencia de materiales precursores en las materias primas.
- **Mantenimiento adecuado:** Para mantener la eficiencia del proceso y las técnicas de reducción asociadas a un alto nivel, se debe garantizar un mantenimiento suficiente.
- **Sistema de gestión ambiental:** Un sistema que defina claramente las responsabilidades de los aspectos ambientales en una fábrica. Sirve para crear conciencia, se compone de objetivos y medidas, instrucciones sobre el proceso y las tareas, listas de control y demás documentación pertinente, e incorpora los aspectos ambientales en los controles de cambios en el proceso.
- **Establecimiento de protocolos para la vigilancia ambiental y monitoreo ordinario,** incluido el monitoreo de liberaciones en instalaciones nuevas.

4. Alternativas

4.1 Blanqueo totalmente libre de cloro para pasta kraft

El proceso totalmente libre de cloro (TCF) se desarrolló rápidamente en la década de 1990, pero ha ido perdiendo interés debido a sus deficiencias en cuanto a características de la fibra, menor rendimiento de la pasta y mayor consumo de energía. El proceso libre de cloro elemental (ECF) se ha instaurado como el principal método de blanqueo. Algunos procesos TCF han comenzado a perder su lugar en el mercado y una cantidad de fábricas con proceso TCF están adoptando la producción de pasta ECF. Normalmente, los costos operativos de la fabricación TCF son más altos que los del proceso ECF ya que los costos químicos necesarios para que la pasta alcance el mismo nivel de brillo son más elevados.

El blanqueo TCF es un proceso efectuado sin sustancias con contenido de cloro. En este proceso, el peróxido de hidrógeno junto con ozono o ácido peracético son las sustancias más usadas. El ozono se ha convertido en el complemento más común del peróxido en las secuencias de blanqueo TCF. La finalidad principal del uso de ozono es lograr más poder de deslignificación. Siempre que la pasta tenga un índice kappa lo suficientemente bajo³ después de una cocción prolongada y una deslignificación con oxígeno, y que los metales de transición (ej., Mn_2^+) se hayan eliminado en las etapas quelantes necesarias (Q-etapas), se puede conseguir un brillo comercial total con peróxido como única sustancia química de blanqueo.

He aquí distintos ejemplos de secuencias de blanqueo TCF:

Maderas blandas	Maderas duras
Q(EP)(EP)(EP)	QPZP
Q(OP)(ZQ)(PO)	Q(OP)(ZQ)(PO)
Q(EOP)Q(PO)	Q(EOP)Q(PO)
Q(OP)ZQ(PO)	Q(OP)ZQ(PO)

Notas:

Q = Etapa ácida en la que se ha usado EDTA o DTPA como agente quelante para eliminar metales.

EP = Etapa de extracción con NaOH y posterior adición de una solución de H_2O_2 como agente reforzante.

EOP = Etapa de blanqueo de extracción alcalina que utiliza hidróxido de sodio con posterior adición de una solución de oxígeno y peróxido de hidrógeno como agente reforzante.

EO = Etapa de extracción que utiliza NaOH con posterior adición de oxígeno gaseoso como agente reforzante.

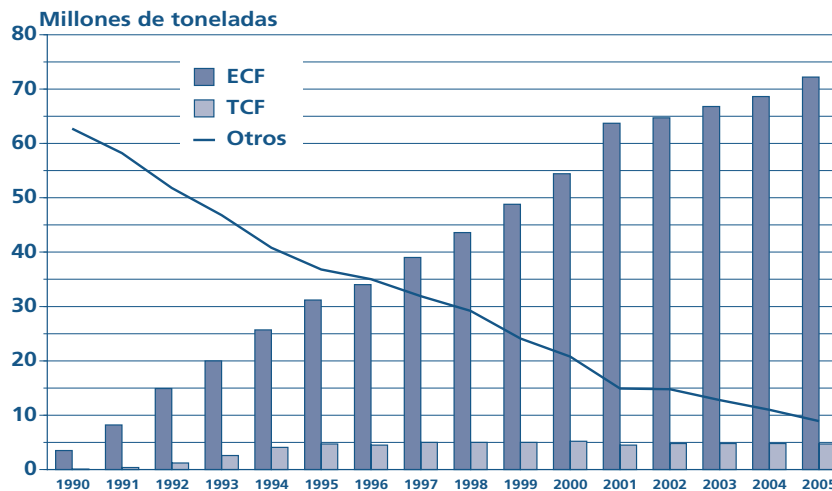
P = Etapa alcalina con H_2O_2 en forma líquida.

Z = Blanqueo con ozono usando O_3 gaseoso.

PO = Blanqueo con peróxido presurizado.

Las tendencias de la producción de pasta totalmente química en el mundo se muestran en la Figura 5. Las pastas kraft y sulfito TCF constituyen menos del 5% de la producción y se producen principalmente en el centro y norte de Europa.

■ **Figura 5. Tendencias en la producción de pasta con blanqueo químico: Mundial, salvo China y la India.**



Nota: "Otros" se refiere a la pasta blanqueada con algún cloro molecular.

4.2 Blanqueo TCF de pasta no maderera

Por su baja capacidad de blanqueo, las pastas no madereras no pueden blanquearse satisfactoriamente sin sustancias cloradas si se utiliza el proceso alcalino no maderero tradicional. Los materiales no madereros también contienen importantes cantidades de iones metálicos, como potasio, calcio, manganeso, cobre y hierro. Cuando se blanquea la pasta sin sustancias de cloro, los elementos de transición forman radicales, que reaccionan de manera no selectiva con la pasta, causando una pérdida de rendimiento y de las propiedades de resistencia. Con frecuencia se agregan quelatos en las primeras etapas de blanqueo para reducir la cantidad de metales en la fibra. Además, el blanqueo se acompaña de la formación de ácido oxálico. El calcio reacciona con ácido oxálico y genera oxalato de calcio, que se deposita fácilmente. Por este hecho, el blanqueo TCF no es viable en procesos alcalinos tradicionales con materiales no madereros. Se está investigando sobre blanqueo TCF en los procesos a base de solventes.

5. Niveles de desempeño alcanzables con mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Cuando el nivel de sustitución de ClO_2 es mayor al 85% en el blanqueo tradicional, o si se utiliza blanqueo ECF o TCF, las emisiones de 2,3,7,8-TCDF y 2,3,7,8-TCDD al agua son menores al límite de cuantificación según el Método EPA 1613 (véase Tabla 2.).

5.1 Informes de desempeño

Se recomiendan elaborar informes de desempeño según se describe en la sección III.C (vi) de estas directrices.

Cuando no se puede hacer pruebas de emisiones (por ejemplo, por falta de capacidad analítica), se sugiere el uso de factores de liberación de PCDD/PCDF de fábricas similares y funcionamiento parecido como requisito provisional para el registro de desempeño hasta que puedan realizarse pruebas y análisis anuales de las emisiones. Los factores de emisión para liberaciones de PCDD/PCDF de fábricas se presentan en la sección 6.7.1 del *Instrumental normalizado para la identificación y cuantificación de liberaciones de dioxinas y furanos* del PNUMA (UNEP 2003).

5.2 Normas de ejecución

En la Tabla 2 se resume las normas de ejecución existentes para las fábricas de pasta de papel.

■ **Tabla 2. Resumen de las normas de ejecución vigentes para fábricas de pasta de papel.**

Planta nueva	2,3,7,8-TCDD/TCDF pg/l en agua	2,3,7,8-TCDD/TCDF ng/kg en lodos	Antiespumantes DBD y DBF mg/kg
Canadá – Federal ^a	Menor al nivel de cuantificación en efluentes finales tratados		DBD <10 DBF <40
EE.UU., kraft y sosa ^b	2,3,7,8-TCDD <10 2,3,7,8-TCDF ≤ 31.9 en efluentes de planta de blanqueo	10/100	
EE.UU., con amoníaco y sulfito especial ^b	2,3,7,8-TCDD <10 2,3,7,8-TCDF <10 en efluentes de planta de blanqueo		
Australia ^c	2,3,7,8-TCDD <15 en efluentes finales tratados		
Tasmania, Australia ^d	2,3,7,8-TCDD <10 en efluentes finales tratados		
Japón ^e	<10 pg EQT/L		

Fuentes:

a. Government of Canada. 1992. *Canadian Pulp and Paper Mill Defoamer and Wood Chip Regulations*. SOR/92-268. Canadian Department of Justice. www.ec.gc.ca/NOPP/DIVISION/EN/detail.cfm?par_docID=99.

b. United States Congress, Office of Technology Assessment. 1989. *Technologies for Reducing Dioxin in the Manufacture of Bleached Wood Pulp*. OTA-BP-O-54. United States Government Printing Office, Washington, D.C.
govinfo.library.unt.edu/ota/Ota_2/DATA/1989/8931.PDF.

c. Government of Australia. 1990. *Bleaching and the Environment*. Industry Commission, Pulp and Paper: Report No. 1. Australian Government Publishing Service, Canberra. www.pc.gov.au/ic/inquiry/01pulp/finalreport/01pulp.pdf.

d. Resource Planning and Development Commission. 2004. *Development of New Environmental Emission Limit Guidelines for Any New Bleached Eucalypt Kraft Pulp Mill in Tasmania*. Government of Tasmania, Australia.
<http://www.rpdc.tas.gov.au/BEKM/pages/bekm.htm>.

e. Miembro del EGB. 2005. Ministry of the Environment of Japan.

Referencias

- Berry R.M., Flemming B.I. *et al.* 1989. "Toward Preventing the Formation of Dioxins during Chemical Pulp Bleaching." *Pulp and Paper Canada* 90:8.
- Edelman K., McKeough P., Sipilä K. *et al.* 2000. "Environment and Economics." *Paper and Timber* 82:3.
- European Commission. 2000. *Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.
- Gullichsen J. and Fogelholm C.-J. 2000. *Papermaking Science and Technology Book 6A: Chemical Pulping*. Fapet Oy.
- Kocurek M.J. 1983. *Pulp and Paper Manufacture Vol. 3: Secondary Fibres and Non-Wood Pulping*.
- Laxén T. and Halttunen J. 1992. "Organosolv Pulping." *Vesi – ja ympäristöhallinnon julkaisu – sarja A* 119 (in Finnish).
- Myrée B. 2000. *Straw's New Horizons*. <http://www.conox.com/literature/ppa-oct.pdf>.
- Paavilainen L. 1998. "European Prospects for Using Nonwood Fibre." *Pulp and Paper International* 40:6.
- Proceedings*. 1992. Second International Non-wood Fibre Pulping and Papermaking Conference, 6–9 April 1992, China.
- Rappe C., Svansson S., Glas B. *et. al.* 1989. "On the Formation of PCDDs and PCDFs in the Bleaching of Pulp." *Pulp and Paper Canada*.
- Rousu P. and Antila J. 2002. "Sustainable Pulp Production from Agricultural Waste." *Resources, Conservation and Recycling* 32.
- Shatalov A.A. and Pereira H. 2005. "Arundo Donax L. Reed: New Perspectives for Pulping and Bleaching. Part 4. Peroxide Bleaching of Organosolv Pulps." *Biosource Technology* 96.
- Stenius P. 2000. *Papermaking Science and Technology Book 3: Forest Products Chemistry*. Fapet Oy.
- Stern, B. 2003. *Making Paper From Montana's Straw*.
http://www.nativeforest.org/pdf/Straw_report.pdf.
- Tana J. and Lehtinen K.J. 1996. *The Aquatic Environmental Impact of Pulping and Bleaching Operations: An Overview*. Finnish Environment Agency (SYKE).
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf.
- Zheng M.-H., Bao Z.-C., Wang K.-O. and Xu X.-B. 1997. "Levels of PCDDs and PCDFs in the Bleached Pulp from Chinese Pulp and Paper Industry." *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 59.

Otras fuentes

- AET (Alliance for Environmental Technology). 2005. *Trends in World Bleached Chemical Pulp Production: 1990–2005*. AET, Washington, D.C.

CBNS (Center for the Biology of Natural Systems). 1996. *Pulp and Paper Production, Zeroing Out the Dioxins in the Great Lakes: Within Our Reach*. CBNS, Queens College, New York. www.cbns.qc.edu/cbns_ch5.pdf.

Chinese association of paper industry. 2005 annual report of China paper industry.

Environment Agency for England and Wales. 2000. *Technical Guidance for the Pulp and Paper Sector*. SEPA and EHS.

www.environmentagency.gov.uk/business/444304/444635/107293/?version=1&lang=_e.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *Effluent Guidelines: Final Pulp and Paper Cluster Rule*. Federal Register: April 15, 1998, Vol. 63:72. EPA, Washington, D.C.

www.epa.gov/waterscience/pulppaper/cluster.html.

FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=381&lang=en>, 22.11.2006

Götttsching L. and Pakarinen H. 2000. *Recycled Fiber and Deinking*. Fapet Oy.

Government of Australia. 1990. *Bleaching and the Environment*. Industry Commission, Pulp and Paper: Report No. 1. Australian Government Publishing Service, Canberra.

www.pc.gov.au/ic/inquiry/01pulp/finalreport/01pulp.pdf.

Government of Canada. 1992. *Canadian Pulp and Paper Mill Defoamer and Wood Chip Regulations*. SOR/92-268. Canadian Department of Justice.

www.ec.gc.ca/NOPP/DIVISION/EN/detail.cfm?par_docID=99.

Gullichsen J. and Paulapuro H. 1999. *Papermaking Science and Technology* series, 19 volumes. Fapet Oy, Jyväskylä.

Ministry of Environment in Finland. 1997. *Finnish Background Report for the EC Documentation of Best Available Techniques for Pulp and Paper Industry*. The Finnish Environment 96. Edita Ltd, Helsinki.

Pryke D.C. and Barden M.T. 2005. "Environmental Performance of Maine's Bleached Kraft Pulp and Paper Mills." In *Proceedings*, International Pulp Bleaching Conference, June 2005.

Resource Planning and Development Commission. 2004. *Development of New Environmental Emission Limit Guidelines for Any New Bleached Eucalypt Kraft Pulp Mill in Tasmania*.

Government of Tasmania, Australia. <http://www.rpdc.tas.gov.au/BEKM/pages/bekm.htm>.

United States Congress, Office of Technology Assessment. 1989. *Technologies for Reducing Dioxin in the Manufacture of Bleached Wood Pulp*. OTA-BP-O-54. United States Government Printing Office, Washington, D.C. govinfo.library.unt.edu/ota/Ota_2/DATA/1989/8931.PDF.

VTT Biotechnology. 2003. *Marcus Wallenberg Prize*. www.mwp.org.

Vu M.T.H., Alén R. and Pakkanen H. 2006. "ECF Bleaching of Bamboo Kraft Pulp." *Paper and Timber* 88:2.

World Bank. 1998. *Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: Toward Cleaner Production*.

www.wds.worldbank.org/servlet/WDS_IBank_Servlet?pcont=details&eid=000094946_

990409050522.

- ¹ El término múltiplo de cloro activo significa la cantidad de cloro activo o equivalente expresada como un porcentaje de la pasta secada en horno sin blanquear dividida por el índice kappa de la pasta sin blanquear.
- ² Véase la Tabla 1 para denominaciones.
- ³ El número kappa es una medición indirecta del contenido de lignina residual en una pasta determinada mediante el consumo de una sustancia oxidante (por ejemplo, permanganato potásico).

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Procesos térmicos en la industria metalúrgica



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

MAYO DE 2007, GINEBRA, SUIZA

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Í N D I C E

V.D	Procesos térmicos en la industria metalúrgica	11
(i)	Producción secundaria de cobre	11
1.	Descripción del proceso	11
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	14
2.1	Información general sobre las emisiones de la fundición de cobre secundario	14
2.2	Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF	14
2.3	Liberaciones a otros medios	15
3.	Procesos recomendados	15
4.	Medidas primarias y secundarias	16
4.1	Medidas primarias	16
4.2	Medidas secundarias	17
5.	Nuevas investigaciones	18
6.	Resumen de medidas	19
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	22
	Referencias	23
	Otras fuentes	23
(ii)	Plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero	24
1.	Descripción del proceso	24
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	26
2.1	Liberaciones atmosféricas	26
2.2	Liberaciones a otros medios	28
3.	Alternativas	28
3.1	Reducción directa	28
3.2	Fundición directa	28

4.	Medidas primarias y secundarias	29
4.1	Medidas primarias.....	30
4.2	Medidas secundarias	33
5.	Nuevas investigaciones	35
6.	Resumen de medidas	36
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	40
	Referencias	40
(iii)	Producción secundaria de aluminio	42
1.	Descripción del proceso	42
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	46
2.1	Información general sobre emisiones de fundidoras secundarias de aluminio.....	46
2.2	Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF	47
2.3	Liberaciones a otros medios	48
3.	Procesos recomendados	49
4.	Medidas primarias y secundarias	49
4.1	Medidas primarias.....	49
4.2	Medidas secundarias	50
4.3	Mejores prácticas ambientales.....	52
5.	Nuevas investigaciones	53
6.	Resumen de medidas	54
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	58
	Referencias	58
	Otras fuentes	58
(iv)	Producción secundaria de zinc	59
1.	Descripción del proceso	59
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	61
2.1	Información general sobre emisiones de fundiciones de zinc secundario	61

2.2	Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF	61
2.3	Liberaciones a otros medios	62
3.	Procesos recomendados	63
4.	Medidas primarias y secundarias	63
4.1	Medidas primarias.....	63
4.2	Medidas secundarias.....	64
5.	Nuevas investigaciones.....	65
6.	Resumen de medidas	66
7.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	69
	Referencias	70
	Otras fuentes.....	70

Tablas

Sección V.D (i)

Tabla 1.	Medidas para procesos recomendados para nuevas fundidoras secundarias de cobre	19
Tabla 2.	Resumen de medidas primarias y secundarias para fundidoras secundarias de cobre	20

Sección V.D (ii)

Tabla 1.	Alternativas y requisitos para nuevas plantas de sinterización de hierro.....	36
Tabla 2.	Resumen de medidas primarias y secundarias para plantas de sinterización de hierro.....	37

Sección V.D (iii)

Tabla 1.	Medidas para procesos recomendados para nuevos fundidores secundarios de aluminio.....	54
Tabla 2.	Resumen de las medidas primarias y secundarias para fundidoras secundarias de aluminio.....	55

Sección V.D (iv)

Tabla 1.	Medidas para los procesos recomendados para nuevos fundidores secundarios de zinc.....	66
Tabla 2.	Resumen de las medidas primarias y secundarias para los fundidoras secundarias de zinc	67

Ilustraciones

Sección V.D (i)

Figura 1. Fundición secundaria de cobre13

Sección V.D (ii)

Figura 1. Diagrama del proceso de una planta de sinterización.....26

Figura 2. Diagrama del proceso de una planta de sinterización que utiliza un sistema de depuración húmedo34

Sección V.D (iii)

Figura 1. Fundición secundaria de aluminio44

Figura 2. Materiales entrantes y salientes en la producción secundaria de aluminio ...47

Sección V.D (iv)

Figura 1. Medidas para los procesos recomendados para nuevos fundidores secundarios de zinc.....60

(i) Producción secundaria de cobre

■ Resumen

La fundición secundaria de cobre consiste en la producción de cobre a partir de fuentes como chatarra de cobre, sedimentos, chatarra de computadores y aparatos electrónicos, y escorias de refinerías. Los procesos que implica la producción de cobre son el pretratamiento del material, fundición, aleación y vaciado. La presencia de metales catalizadores (y el cobre es uno de los más efectivos), los materiales orgánicos que pueden encontrarse en los aceites, plásticos y revestimientos alimentados, la combustión incompleta del combustible y las temperaturas entre 250°C y 500°C son factores que pueden generar las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Son mejores técnicas disponibles la clasificación previa, limpieza de los materiales de alimentación, mantener las temperaturas por encima de 850°C, utilización de cámaras de postcombustión con enfriamiento brusco, adsorción por carbón activado y desempolvamiento mediante filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para plantas de fundición secundaria de cobre son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operacionales de oxígeno).

1. Descripción del proceso

La fundición secundaria de cobre implica procesos pirometalúrgicos que dependen del contenido de cobre en el material de alimentación, la distribución por tamaños y otros componentes. Las fuentes de alimentación son la chatarra de cobre, lodos, chatarra de computadores y aparatos electrónicos, escorias de refinerías y productos semiacabados. Estos flujos pueden contener materiales orgánicos como revestimientos o aceites. Las plantas pueden responder a esta eventualidad con métodos para desaceitar y eliminar revestimientos, y diseños apropiados de hornos y sistemas de reducción de emisiones (European Commission 2001, p. 201-202). El cobre puede reciclarse infinitamente sin que pierda sus propiedades intrínsecas.

El material citado a continuación proviene del *Secondary Copper Smelting, Refining and Alloying*, un informe del Organismo de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA 1995).

“La recuperación secundaria de cobre se divide en cuatro operaciones: pretratamiento de la chatarra, fundición, aleación y moldeado. El pretratamiento consiste en la depuración y consolidación de la chatarra como preparación para su fundición. La fundición consiste en calentar y

tratar la chatarra para separar y purificar metales específicos. La aleación implica la adición de uno o más metales al cobre para obtener cualidades deseadas, características de la combinación de metales.

El pretratamiento de la chatarra puede efectuarse por métodos manuales, mecánicos, pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Los métodos manuales y mecánicos son la clasificación, separación, fragmentación, y separación magnética. El pretratamiento pirometalúrgico puede ser por exudación (escalonar lentamente la temperatura del aire del horno a fin de licuar cada metal en forma separada y así separarlos unos de otros), quemar el aislamiento de los cables de cobre, y secarlo en hornos rotatorios para volatilizar el aceite y otros compuestos orgánicos. Los métodos de pretratamiento hidrometalúrgicos consisten en flotación y lixiviación para recuperar el cobre de la escoria. Se aplica la lixiviación con ácido sulfúrico para recuperar el cobre del lodo, un subproducto de la refinación electrolítica.

La fundición de chatarra de cobre de baja ley empieza con su fusión en un alto horno o en un horno rotatorio, de lo que se generan escorias y cobre impuro. Si se usa un horno alto, este cobre se introduce en un convertidor, donde se aumenta su pureza de 80 a 90 por ciento aproximadamente, y luego a un horno de reverbero, donde se obtiene un cobre con una pureza de 99 por ciento aproximadamente. En estos hornos refinadores por fuego, se agrega fundente al cobre y se insufla aire hacia arriba a través de la mezcla para oxidar las impurezas.

Después, estas impurezas se eliminan como escoria. Así, pues, mediante la reducción de la atmósfera del horno, el óxido de cobre (CuO) se convierte en cobre. El cobre refinado por fuego se vacía en ánodos, que se usan en la electrólisis. Los ánodos se sumergen en una solución de ácido sulfúrico que contiene sulfato de cobre. A medida que el cobre se disuelve en los ánodos, se deposita en el cátodo. Entonces el cobre de cátodo, que tiene hasta un 99.99% de pureza, se extrae y vuelve a vaciar. En este proceso puede omitirse el alto horno y el convertidor si el contenido promedio de cobre en la chatarra que se use es de más de 90%.

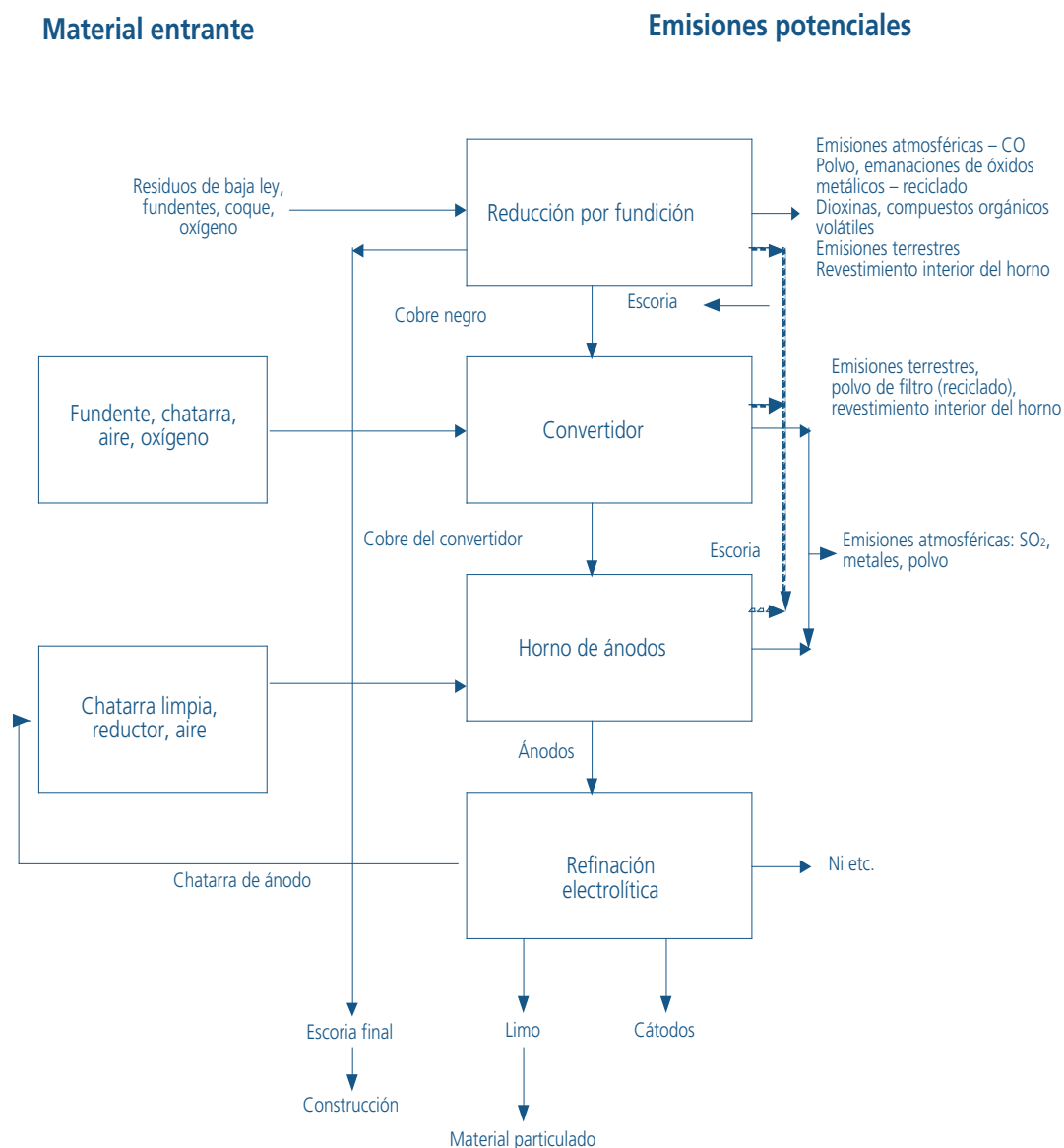
En el proceso de aleación, la chatarra de cobre se introduce en un horno de fundición junto con uno o más metales como estaño, zinc, plata, plomo, aluminio, o níquel. Se agregan los fundentes para eliminar impurezas y evitar la oxidación del fundido con el aire. Puede soplar aire u oxígeno puro a través del fundido para ajustar la composición oxidando el zinc excedente. Los procesos de fundición y refinación descritos anteriormente, que generan un cobre relativamente puro, y el proceso de aleación son, hasta cierto punto, mutuamente excluyentes.

La fase de recuperación final es el vaciado de los productos metálicos aleados o refinados. El metal fundido se vacía en moldes mediante cucharas o pequeños calderos que funcionan como tolva alimentadora

por impulsos o reguladores de flujo. Los productos fabricados son perdigones, barras de alambre, ánodos, cátodos, lingotes y otras piezas moldeadas”.

La Figura 1 presenta el proceso en forma de diagrama.

■ Figura 1. Fundición secundaria de cobre



Fuente: European Commission 2001, p. 217.

Las actividades de recuperación del metal en instalaciones pequeñas o artesanales pueden ser significativas, en particular en países en desarrollo y países con economías en transición. Estas actividades pueden contribuir considerablemente a la contaminación y pueden tener efectos negativos en la salud. Por ejemplo, la fundición artesanal de zinc es una importante fuente de emisiones atmosféricas de mercurio. La técnica empleada para fundir zinc y mercurio es simple: se calientan los minerales en un horno durante unas pocas horas, y se produce metal de zinc y mercurio líquido. En muchos casos, no se utiliza ningún dispositivo para controlar la contaminación durante el proceso de fundición. Otros metales que se sabe se producen en actividades de recuperación de

metales en instalaciones pequeñas y artesanales son el antimonio, hierro, plomo, manganeso, estaño, tungsteno, oro, plata, cobre y aluminio.

Estas técnicas no se consideran mejores técnicas disponibles ni mejores prácticas ambientales. No obstante, como mínimo se deberían reunir condiciones adecuadas de ventilación y manipulación de materiales.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

La formación de dibenzoparadióxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) se debe probablemente a la presencia de carbono, oxígeno, precursores clorados (de materiales de alimentación y combustibles) y a los muy potentes catalizadores de cobre provenientes de plásticos y residuos de aceite en el material de alimentación, en un sistema que puede proporcionar las condiciones ideales para la formación con temperaturas entre 200°C y 450°C, altos niveles de partículas y largos tiempos de residencia. Como el cobre es el metal más eficiente para catalizar la formación de PCDD/PCDF, la fundición de cobre resulta especialmente preocupante.

2.1 Información general sobre las emisiones de la fundición de cobre secundario

Las emisiones contaminantes transportadas por aire contienen óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), polvo y compuestos metálicos, compuestos de carbono orgánico y contaminantes orgánicos persistentes. Si los gases residuales contienen dióxido de azufre (SO₂), suele ser poco, siempre que se evite el material sulfúrico. El tratamiento y la fundición de la chatarra son el principal generador de emisiones atmosféricas. El polvo y los compuestos metálicos se emiten en la mayoría de las etapas del proceso y son más propensos a emisiones fugitivas durante los ciclos de carga y colada. El material particulado puede eliminarse de los gases de combustión recolectados y enfriados mediante precipitadores electrostáticos o filtros de tela. En el proceso por lotes, que impide trabajar en ambiente hermético, se usan campanas para recolección de vapores durante las etapas de conversión y refinación. El NO_x es muy reducido en quemadores con baja emisión de NO_x, mientras que el CO es quemado en aparatos de postcombustión de hidrocarburos. Se vigilan los sistemas de control de combustión para disminuir la generación de CO durante la fundición (European Commission 2001, p. 218–229).

2.2 Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Los PCDD/PCDF se forman durante la fundición de metal base por combustión incompleta o por síntesis *de novo* cuando se presentan compuestos orgánicos, como aceites y plásticos, y una fuente de átomos de cloro en el material de alimentación. La alimentación secundaria suele componerse de chatarra contaminada.

El proceso se describe en European Commission 2001, p. 133:

“Los PCDD/PCDF o sus precursores pueden encontrarse en algunas materias primas y existe la posibilidad de síntesis *de novo* en hornos y en sistemas de reducción. Los PCDD/PCDF se adsorben fácilmente en la materia sólida y pueden ser recogidos por todos los medios ambientales como polvo, sólidos de depuración y filtros de polvo.

La presencia de aceites y otros materiales orgánicos en la chatarra u otras fuentes de carbono (combustibles parcialmente quemados y reductores, como el coque), puede producir partículas finas de carbono que reaccionan con cloruros inorgánicos o cloro orgánicamente ligado en el rango de temperatura de 250 a 500°C para producir PCDD/PCDF. Este proceso se conoce como síntesis *de novo* y se cataliza por la presencia de metales como cobre o hierro.

Los PCDD/PCDF se destruyen a altas temperaturas (por encima de 850°C) en presencia de oxígeno, aun así puede haber síntesis *de novo* al enfriarse los gases en la ‘ventana de reformación’, posibilidad que puede darse en los sistemas de reducción y en partes más frías del horno, ej., el área de alimentación. Un cuidadoso diseño de los sistemas de enfriamiento para disminuir el tiempo de residencia en la ventana permite prevenir la síntesis *de novo*”.

2.3 Liberaciones a otros medios

Las aguas del proceso, superficiales y de enfriamiento pueden contaminarse con sólidos en suspensión, compuestos metálicos y aceites, además de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Se recicla la mayor parte del agua de proceso y de enfriamiento. Los métodos de tratamiento de aguas residuales deberían emplearse antes de la descarga. Los subproductos y residuos suelen reciclarse durante el proceso ya que contienen cantidades recuperables de cobre y otros metales no ferrosos. Por lo general, el material de desecho consiste en limos ácidos, que se eliminan *in situ*. Se deben tomar precauciones para garantizar la eliminación adecuada de limos y residuos del control de contaminación a fin de disminuir la exposición del medio ambiente a cobre y dioxinas. Cualquier transferencia a otro proceso debería evaluarse detenidamente para determinar la necesidad de reducir y controlar las liberaciones de las sustancias del Anexo C.

3. Procesos recomendados

Las variaciones en el material de alimentación y en el control de calidad determinan el diseño y la configuración del proceso. Los procesos considerados mejores técnicas disponibles para fundición y reducción son los altos hornos, el mini horno de fundición (*mini smelter* totalmente cerrado), el horno rotatorio con alimentación de aire por la parte superior, el horno de arco eléctrico sumergido sellado, y la fundición ISA. El horno rotatorio con alimentación de aire por la parte superior (totalmente cerrado) y el convertidor Pierce-Smith son mejores técnicas disponibles para la conversión. El horno

de arco eléctrico sumergido está sellado y es más limpio que otros modelos si el sistema de extracción de gases está correctamente diseñado y dimensionado.

El uso de altos hornos para la fundición de chatarra se está haciendo menos común por lo costoso de prevenir la contaminación, en cambio, cada vez se utilizan más los hornos de cubilote sin alimentación de carbón/coque.

La chatarra de cobre limpia, sin contaminación orgánica, puede procesarse en hornos de reverberación con solera, en hornos de cubilote con solera o proceso Contimelt. Éstas se consideran mejores técnicas disponibles en configuraciones con sistemas adecuados de recolección de gases y reducción.

No hay información sobre otros métodos alternativos para el procesamiento secundario de cobre fuera la fundición.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se analizan medidas primarias y secundarias para reducir y eliminar los PCDD/PCDF.

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas para prevenir la contaminación con el fin de reducir o eliminar la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. He aquí algunas medidas posibles:

4.1.1 Preclasificación del material de alimentación

Debería evitarse la presencia de aceites, plásticos y de compuestos cloro en el material de alimentación para reducir la generación de las sustancias del Anexo C por combustión incompleta o síntesis *de novo*. El material de alimentación debería clasificarse según su composición y posibles contaminantes. Las técnicas de almacenamiento, manejo y pretratamiento serán determinadas por la granulometría y la contaminación del material.

Métodos que deben considerarse (European Commission 2001, p. 232):

- Eliminación del aceite contenido en el alimento (por ejemplo, eliminación térmica de revestimientos y lubricantes seguida de postcombustión para destruir cualquier material orgánico presente en los gases residuales).
- Utilización de técnicas de molienda y trituración con buena extracción y reducción de polvo. Las partículas restantes pueden tratarse para recuperar metales valiosos efectuando una separación por densidad o neumática.
- Eliminación de plásticos por desferramiento de cables (por ejemplo, posibles técnicas criogénicas para hacer friables los plásticos y fáciles de separar).
- Mezclado suficiente del material para obtener un alimento homogéneo y para que las condiciones sean estables.

Otras técnicas para eliminar el aceite son el uso de solventes y la depuración cáustica. Para eliminar los revestimientos de cables puede usarse el desforramiento criogénico.

El lavado con una solución acuosa de detergentes es una posible técnica adicional para eliminar el aceite. De esta manera, además puede recuperarse el aceite contaminado.

4.1.2 Control efectivo del proceso

Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere según parámetros que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF, por ejemplo, mantener la temperatura del horno por encima de 850°C a fin de destruir los PCDD/PCDF. Lo ideal sería monitorear constantemente las emisiones de PCDD/PCDF a fin de garantizar menos liberaciones. Para algunos sectores (ej., la incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación a otras fuentes aún se está investigando. A falta de un monitoreo constante de PCDD/PCDF, otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y los reguladores de tiro para captación de vapores, deberían ser monitoreadas y mantenidas a fin de establecer las condiciones de funcionamiento óptimas para disminuir las emisiones de PCDD/PCDF.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas para control de la contaminación. Estos métodos no eliminan la generación de contaminantes sino que son un medio de contener, prevenir o reducir las emisiones.

4.2.1 Captación de vapores y gases

Las emisiones atmosféricas deberían controlarse en todas las etapas del proceso: manipulación del material, fundición y transferencia de un punto a otro, con el objeto de limitar las emisiones potenciales de las sustancias del Anexo C. Es esencial que los hornos estén sellados para contener emisiones fugitivas y, al mismo tiempo, permitir recuperar el calor y capturar los gases residuales para reciclarlos en el mismo proceso. Es esencial una buena configuración de las campanas y de la red de tuberías para capturar vapores. Puede ser necesario que el horno o reactor estén en recintos cerrados. Si no se pueden extraer y contener los vapores, el horno debería estar encerrado de forma que el aire de la ventilación se pueda extraer, tratar y descargar. Por su elevado gasto energético, conviene evitar la captura de vapores en la línea del techo. El uso de reguladores de tiro inteligentes puede mejorar la captura de vapores, reduciendo el tamaño de los ventiladores y los correspondientes costos. El uso de carros o contenedores de carga sellados con hornos de reverbero puede reducir significativamente las emisiones fugitivas atmosféricas al mantener encerradas las emisiones durante la carga (European Commission 2001, p. 187–188).

4.2.2 Eliminación de polvo de alta eficiencia

El proceso de fundición genera grandes cantidades de material particulado con una alta área superficial en la que pueden formarse y adsorberse las sustancias del Anexo C. Estos polvos junto con sus compuestos metálicos deberían eliminarse para reducir las

emisiones de las sustancias del Anexo C. Los filtros de tela son la técnica más eficaz, aunque también pueden considerarse los depuradores húmedos o secos y los filtros de cerámica. El polvo capturado debe tratarse en hornos de alta temperatura para destruir PCDD/PCDF y recuperar los metales.

El funcionamiento de los filtros de tela debe vigilarse constantemente mediante dispositivos que detecten roturas en las mangas. Otros adelantos tecnológicos pertinentes son los métodos de limpieza en curso de producción y el uso de revestimientos catalíticos para destruir PCDD/PCDF (European Commission 2001, p. 139–140).

4.2.3 Postcombustión y enfriamiento rápido

Los postquemadores (cámaras de postcombustión) deberían funcionar con una temperatura mínima de 950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos (Hübner *et al.* 2000). Después de esta etapa, los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos de 250°C. La inyección de oxígeno en la parte superior del horno favorecerá la combustión completa (European Commission 2001, p. 189). En la sección I se encuentra más información sobre temperaturas óptimas.

Se ha observado que los PCDD/PCDF se forman en el rango de temperaturas de 250°C – 500°C, y se destruyen por encima de 850°C en presencia de oxígeno. Sin embargo, todavía puede producirse síntesis *de novo* cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación que se produce en los sistemas de reducción y en las áreas más frías del horno. Los sistemas de enfriamiento deberían operar adecuadamente a fin de disminuir el periodo de reformación (European Commission 2001, p. 133).

4.2.4 Adsorción por carbón activado

Debería considerarse el tratamiento por carbón activado para eliminar sustancias del Anexo C de los gases residuales de fundición. El carbón activado posee una gran área superficial en la que se pueden adsorber los PCDD/PCDF. Los gases residuales pueden tratarse con carbón activado usando reactores de lecho fijo o móvil, o mediante la inyección de partículas de carbono en la corriente de gas para luego eliminarlas como polvo de filtro con sistemas de eliminación de polvo de alta eficiencia como los filtros de tela.

5. Nuevas investigaciones

La oxidación catalítica es una tecnología incipiente utilizada en incineradoras de desechos para reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Este proceso debería considerarse para fundidoras secundarias de metales comunes ya que ha resultado efectivo para la destrucción de PCDD/PCDF en incineradoras de desechos. No obstante, la oxidación catalítica puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros contaminantes de los gases de escape. Se precisaría un trabajo de validación antes de poner en práctica este proceso.

La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO₂) y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso para que la tasa de reacción suba hasta situarse entre 370°C y 450°C. Por su parte, la incineración típica se produce a 980°C. Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF con tiempos de residencia más cortos, con un menor consumo de energía y >99% de eficiencia. El material particulado debería eliminarse de los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima. Este método es efectivo para los contaminantes en fase vapor. El ácido clorhídrico resultante es tratado en un depurador mientras que el agua y el CO₂ son liberados al aire después del enfriamiento (Parvesse 2001).

Los filtros de tela empleados para eliminar el polvo también pueden ser tratados con un revestimiento catalítico para promover la oxidación de los compuestos orgánicos a altas temperaturas.

6. Resumen de medidas

Las tablas 1 y 2 presentan un resumen de las medidas analizadas anteriormente.

■ **Tabla 1. Medidas para procesos recomendados para nuevas fundidoras secundarias de cobre**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Para nuevas plantas deberían considerarse los diversos procesos de fundición recomendados.	<p>Procesos recomendados:</p> <ul style="list-style-type: none"> Alto hornos, horno mini-smelter, hornos rotatorios con alimentación de aire por la parte superior, horno de arco eléctrico sumergido sellado, fundición ISA, y el convertidor Pierce-Smith. Horno de reverberación con solera, horno de cubilote con solera y proceso Contimelt para tratar chatarra de cobre limpia, sin contaminación orgánica. 	<p>Son consideradas mejores técnicas disponibles en combinación con sistemas adecuados para recolección de gases y reducción.</p> <p>El horno de arco eléctrico sumergido está sellado y puede ser más limpio que otros modelos si el sistema de extracción de gases está debidamente diseñado y dimensionado.</p>

■ Tabla 2. Resumen de medidas primarias y secundarias para fundidoras secundarias de cobre

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Preclasificación del material de alimentación	Debería evitarse la presencia de aceites, materiales orgánicos y compuestos clorados en el material de alimentación para reducir la generación de PCDD/PCDF durante una combustión incompleta o síntesis <i>de novo</i> .	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Control estricto de las fuentes de materiales. • Eliminación de aceites del material de alimentación. • Uso de técnicas de molienda y trituración con buenos sistemas de extracción y reducción de polvo. • Desforramiento de cables. 	Después de los procesos térmicos para eliminar revestimientos y aceites debería realizarse una postcombustión para destruir cualquier material orgánico de los gases de escape.
Control efectivo del proceso	Buena combustión. Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere a niveles paramétricos que contribuyan a disminuir la generación de las sustancias del Anexo C.	Las emisiones de PCDD/PCDF pueden disminuirse controlando otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y los reguladores de tiro para captación de vapores después de establecer las condiciones óptimas de funcionamiento para la reducción de los PCDD/PCDF.	Para algunos sectores (ej., la incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación a otras fuentes aún se está investigando.
Medidas secundarias			
Captación de vapores y gases	La captación efectiva de vapores y gases residuales debería realizarse en todas las etapas del proceso de fundición para capturar las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Hornos sellados para contener emisiones fugitivas y, al mismo tiempo, permitir recuperar el calor y capturar los gases residuales. Puede ser necesario que el horno o reactor estén en recintos cerrados. • Buena configuración de las campanas y de la red de tuberías para capturar los vapores. 	Por su elevado gasto energético, conviene evitar la captura de vapores en la línea del techo.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Eliminación de polvo de alta eficiencia	Los polvos y compuestos metálicos deberían eliminarse ya que este material tiene una alta área superficial en la que los PCDD/PCDF pueden adsorberse de forma fácil. La eliminación de este polvo contribuiría a reducir las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Filtros de tela (método más eficaz) • Depuradores húmedos/secos y filtros de cerámica 	La eliminación de polvo debe ser seguida de una postcombustión y enfriamiento rápido. El polvo capturado debe tratarse en hornos de alta temperatura para destruir PCDD/PCDF y recuperar metales.
Postcombustión y enfriamiento rápido	Las cámaras de postcombustión deberían operar a temperaturas de >950°C para garantizar la combustión total de los compuestos orgánicos, luego los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta llegar a menos de 250°C.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Formación de PCDD/PCDF a 250°C – 500°C, y destrucción a >850°C con O₂. • Necesidad de suficiente O₂ en el área superior del horno para una combustión completa. • Necesidad de un diseño adecuado de los sistemas de enfriamiento para disminuir el periodo de reformación. 	Siempre se puede producir una síntesis <i>de novo</i> al enfriarse los gases por la ventana de reformación.
Adsorción por carbón activado	Debería considerarse el tratamiento por carbón activado ya que este material posee una gran área superficial en la que se pueden adsorber los PCDD/PCDF de los gases residuales de fundición.	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento con carbón activado usando reactores de lecho fijo o móvil. • También pueden utilizarse combinaciones de cal/carbón. 	Inyección de carbón pulverizado en la corriente de gas para luego eliminarlo como polvo de filtro.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
<i>Nuevas investigaciones</i>			
Oxidación catalítica	La oxidación catalítica es una tecnología incipiente para fuentes en este sector (tecnología comprobada en incineradores) que debería considerarse por su alta eficiencia y bajo consumo energético. La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO ₂) y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Proceso efectivo para los contaminantes en fase vapor. • Tratar el ácido clorhídrico utilizando depuradores, y liberando el agua y el CO₂ al aire después del enfriamiento. • Compleja, sensible a las condiciones del gas de combustión y costos elevado. 	Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF en tiempos de residencia más cortos, con un menor consumo de energía y >99% de eficiencia. El material particulado debería eliminarse de los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima.

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundidoras secundarias de cobre son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1995. *Secondary Copper Smelting, Refining and Alloying*. Background Report AP-42, Section 12.9. www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s09.pdf.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Hübner C., Boos R., Bohlmann J., Burtscher K. and Wiesenberger H. 2000. *State-of-the-Art Measures for Dioxin Reduction in Austria*. Vienna. www.ubavie.gv.at/publikationen/Mono/M116s.htm.

Parvesse T. 2001. "Controlling Emissions from Halogenated Solvents." *Chemical Processing* 64(4):48–51.

Otras fuentes

Gunson A.J. and Jian Y. 2001. *Artisanal Mining in The People's Republic of China*. Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), International Institute for Environment and Development (IIED), September 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme). UNEP News Centre. www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=284&ArticleID=3204&l=en, as read on 20 January 2006.

Xinbin F., Guangle Q., Guanghui L., Ping L. and Shaofeng W. 2005. "Mercury Emissions from Artisanal Zinc and Mercury Smelting in Guizhou, PR China." *Goldschmidt Conference Abstracts 2005: The Geochemistry of Mercury* p. A705.

Xinbin F., Xianwu B., Guangle Q., Guanghui L. and Shunlin T. *Mercury Pollution in Guizhou, China: A Status Report*. pbc.eastwestcenter.org/abstracts2005/abstract2005fengxinbin.htm, as read on 29 December 2005.

(ii) Plantas de sinterización en la industria del hierro y el acero

■ Resumen

Las plantas de sinterización en la industria siderúrgica son un paso de pretratamiento en la producción de hierro en el que se aglomeran por combustión partículas finas de minerales de hierro y, en algunas plantas, desechos de óxido de hierro secundario (polvo capturado, cascarilla de laminación). La sinterización consiste en el calentamiento de mineral de hierro fino con fundente y finos de coque o carbón para producir una masa semifundida que se solidifica en piezas porosas de sinterizado con las características de tamaño y fuerza necesarias para servir de alimento de alto horno.

Las sustancias que figuran en el Anexo C parecen formarse en el proceso de sinterización del hierro principalmente por síntesis *de novo*. Por lo general, son los PCDF los que predominan en los gases residuales de las plantas de sinterización. Al parecer, el mecanismo de formación de PCDD/PCDF comienza en las zonas superiores del lecho de sinterizado poco después del encendido, y luego las dioxinas, furanos y otros compuestos se condensan en la carga subyacente, que es más fría, a medida que la capa de sinter avanza por la banda hacia el punto de penetración por quemado.

Entre las medidas primarias determinadas para prevenir o disminuir la formación de PCDD/PCDF durante la sinterización de hierro se encuentran el funcionamiento estable y uniforme de la planta de sinterización, vigilancia continua de parámetros, recirculación de gases residuales, disminución de los materiales de alimentación que contienen contaminantes orgánicos persistentes o contaminantes que ayudan a su formación, y preparación del material de alimentación.

Las medidas secundarias determinadas para controlar o reducir las liberaciones de PCDD/PCDF de la sinterización de hierro son adsorción/absorción (por ejemplo, inyección de carbón activado), supresión de la formación por medio de adición de urea, desempolvamiento de alta eficiencia, limpieza minuciosa de los gases residuales mediante depuradores húmedos en combinación con tratamiento efectivo de las aguas residuales del depurador, y eliminación de fangos residuales en rellenos sanitarios seguros.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para una planta de sinterización de hierro son $<0.2 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

Las plantas de sinterización de hierro pueden usarse en la fabricación de hierro y acero, con frecuencia en acerías integradas. El proceso de sinterización es una fase de pretratamiento en la producción de hierro en la que partículas finas de minerales de hierro y, en algunas plantas, desechos secundarios de óxido de hierro (polvo capturado,

cascarilla de laminación) se aglomeran por combustión. Los materiales de alimentación y las dosis, así como la cantidad de sinterizado que se emplea en un alto horno, son variables, habitualmente, los altos hornos en Europa emplean más sinterizado que en Norteamérica. Se precisa aglomerar los finos para permitir el paso de los gases calientes durante la posterior operación del alto horno (UNEP 2003, p. 60).

La sinterización consiste en el calentamiento de mineral de hierro fino con fundente y finos de coque o carbón para producir una masa semifundida que se solidifica en piezas porosas de sinterizado con las características de tamaño y fuerza necesarias para servir de alimento de alto horno. La mezcla humectada se deposita como capa sobre una parrilla o cadena en movimiento. La superficie se enciende con quemadores de gas al comienzo de la cadena y se inyecta aire por el lecho móvil, haciendo que se encienda el combustible. La velocidad de la cadena y el flujo de gas se controlan para garantizar que la penetración por quemado (es decir, el punto en que la capa de combustible encendida llega a la base de la cadena) se produzca justo antes de la descarga de sinter. Entonces, el sinter solidificado se despedaza en una quebradora y se enfría con aire. Se criba el producto, el material de mayor tamaño se vuelve a triturar, y el material de tamaño más pequeño se reincorpora al proceso. Las plantas de sinterización situadas en una planta de acero reciclan los finos de mineral de hierro provenientes del almacenamiento y las operaciones de manejo de la materia prima y de los desechos del óxido de hierro derivados de las operaciones de la planta de acero y de los sistemas de control ambiental. El mineral de hierro también puede procesarse en plantas de sinterización *in situ* (Environment Canada 2001, p. 18).

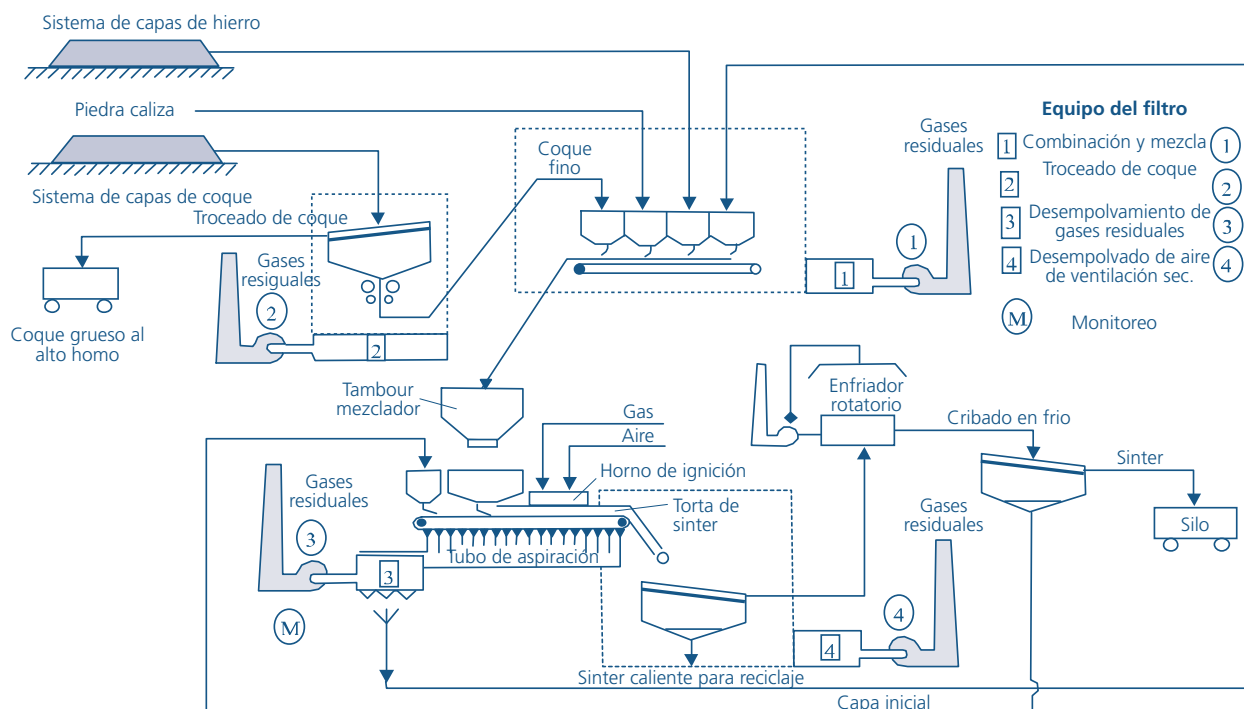
Un alto horno es un horno vertical con toberas que inyectan aire caliente o frío dentro de la carga del horno para fundir su contenido. El sinter se carga en la parte superior del alto horno en capas alternadas con coque.

La flexibilidad del proceso de sinterización permite la conversión de diversos materiales, como finos de mineral de hierro, polvo capturado, concentrados de mineral, y otros materiales ferríferos de tamaño de partícula (ej., cascarillas de laminado) en un aglomerado parecido al clinker (Lankford *et al.* 1985, p. 305–306). Los tipos y cantidades de materiales que se reciclan pueden ser muy variables, lo que puede ser un factor importante para determinar la formación y liberación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Normalmente, los gases residuales son tratados para eliminar el polvo en precipitadores electrostáticos. Una técnica más reciente es el uso de filtros de tela y de (en menor medida) depuradores húmedos. A cualquiera de estos métodos puede anteponerse un ciclón u otro dispositivo inercial de eliminación a fin de reducir la carga del sistema de recolección final de partículas.

La Figura 1 presenta un esquema de una planta de sinterización de hierro.

■ **Figura 1. Diagrama del proceso de una planta de sinterización**



Fuente: United Kingdom Environment Agency, 2001

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

En lo que respecta a las emisiones de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo, se ha identificado a la sinterización de hierro como fuente de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF). Aún no se ha evaluado por completo la formación y liberación de hexaclorobenceno (HCB) y bifenilos policlorados (PCB).

2.1 Liberaciones atmosféricas

2.1.1 Información general sobre emisiones de plantas de sinterización de hierro

La siguiente información es un extracto de Environment Canada 2001, p. 23–25.

“Las emisiones derivadas del proceso de sinterización provienen, sobre todo, de las operaciones de manipulación de materiales, que generan polvo en suspensión, y de la reacción de combustión en la cadena. Los gases de combustión provenientes de la última fuente contienen polvo arrastrado directamente desde la cadena junto con productos de combustión como CO, CO₂, SO_x, NO_x, y material particulado. Las concentraciones de estas sustancias varían según la calidad del combustible y de las materias primas utilizadas y las condiciones de combustión. Las emisiones atmosféricas también contienen compuestos

orgánicos volátiles (VOC) formados con el material volátil en el coque fino, cascarilla con aceite, etc., y dioxinas y furanos, formados a partir de material orgánico en ciertas condiciones de operación. Los metales se volatilizan a partir de las materias primas empleadas, y los vapores ácidos se forman a partir de los haluros contenidos en las materias primas.

Casi siempre los gases de combustión se limpian en precipitadores electrostáticos (ESP), que reducen significativamente las emisiones de polvo pero tienen un efecto mínimo en las emisiones gaseosas. Los depuradores húmedos, que a veces se utilizan en plantas de sinterización, pueden ser menos eficientes en la recolección de partículas que los ESP pero son más eficaces para la captura de emisiones gaseosas. Una cantidad importante de aceite en la materia prima puede crear condiciones explosivas en el ESP. Las emisiones provenientes del troceado y criba de sinter se controlan normalmente con ESP o filtros de tela. Las descargas de aguas residuales, incluidas las escorrentías de las áreas de almacenamiento de materiales, son tratadas en plantas de tratamiento de aguas residuales que también pueden servir para las aguas residuales de altos hornos.

Los desechos sólidos contienen refractarios y fangos generados por el tratamiento del agua del sistema de control de emisiones cuando se usa el sistema en húmedo. El sinter de menor tamaño se reincorpora en la cadena de sinterización”.

2.1.2 Emisiones de PCDD y PCDF

Los procesos por los que se forman los PCDD/PCDF son complejos. Los PCDD/PCDF parecen formarse en el proceso de sinterización de hierro mediante la síntesis *de novo*. Por lo general, son los PCDF los que predominan en el gas residual proveniente de plantas de sinterización (William Lemmon and Associates Ltd. 2004, p. 20–21).

Al parecer, el mecanismo de formación de PCDD/PCDF comienza en las zonas superiores del lecho de sinterizado poco después del encendido, y luego las dioxinas, furanos y otros compuestos se condensan en la carga subyacente, que es más fría, a medida que la capa de sinter avanza por la banda hacia el punto de penetración por quemado. El proceso de volatilización y condensación continúa hasta que la temperatura de la carga más fría se eleva lo suficiente como para evitar la condensación y la salida de PCDD/PCDF con los gases de combustión, proceso que parece incrementarse rápidamente, y llegar al máximo justo antes del punto de penetración y disminuye de manera rápida al mínimo. Varios estudios en los que se compara el perfil dioxina/furano comparado con el perfil de temperatura en la cadena de sinterizado respaldan estas observaciones.

Se ha demostrado que la cantidad de PCDD y PCDF formada aumenta al incrementarse el contenido de carbono y cloro; éstos se encuentran en algunos de los materiales de alimentación que se procesan habitualmente en plantas de sinterización.

2.1.3 Conclusiones de investigación pertinentes

Al parecer, la composición de la mezcla de alimentación incide en la formación de PCDD/PCDF, es decir que el aumento en el contenido de cloro puede generar un aumento en la formación de PCDD/PCDF, y la forma de la fuente de carbono parece ser más significativa que la cantidad de carbono. Usar coque con carbón de antracita como combustible de reemplazo parece reducir la concentración de PCDD/PCDF.

Asimismo, se ha señalado que la forma de combustible sólido (otra fuente potencial de carbono) afecta las emisiones de furanos. La alternancia entre carbón, grafito, y carbón activado redujo las emisiones en un 90% aproximadamente en un programa de investigación en un laboratorio japonés.

Los parámetros operativos del proceso de sinterización parecen incidir en la formación de PCDD/PCDF (William Lemmon and Associates Ltd. 2004).

2.2 Liberaciones a otros medios

No se ha encontrado información sobre liberaciones de las sustancias del Anexo C derivadas de la operación de sinterización de hierro a otros medios, por ejemplo, a través de las aguas residuales o polvos capturados.

3. Alternativas

De conformidad con el Convenio de Estocolmo, al analizar propuestas de construcción de una nueva planta de sinterización de hierro, se deben considerar procesos, técnicas o prácticas alternativas que tengan una utilidad similar pero que no colaboren en la formación y liberación de las sustancias del Anexo C. Con respecto a la sinterización de hierro, se deben considerar detenidamente las ventajas de la sinterización al reciclar los desechos de hierro, y la necesidad de sinterizar en los procesos siderúrgicos tradicionales utilizando coque y altos hornos, y las diversas etapas de la producción de acero y las mezclas de producto existentes. Asimismo, se deben evaluar con detenimiento las ventajas y desventajas ambientales de cualquiera de los procesos alternativos. En Lockheed Martin Energy Systems, 2000 y Augerman, 2004, se proporciona una revisión general de los procesos alternativos para la producción de hierro

Algunos procesos alternativos a la sinterización de hierro:

3.1 Reducción directa

En esta técnica, también conocida como hierro de reducción directa o mineral de hierro briquetado en caliente, se procesa el mineral de hierro para elaborar un producto de hierro de reducción directa que puede utilizarse como material de alimentación en hornos de arco eléctrico para fabricación de acero, altos hornos para elaboración de hierro, o hornos básicos de oxígeno para elaboración de acero. El gas natural se reforma para producir hidrógeno y dióxido de carbono; el hidrógeno es el reductor utilizado para producir el hierro de reducción directa. La disponibilidad y el costo del gas natural influirán en la viabilidad de esta técnica.

Hay dos procesos nuevos de reducción directa para finos de mineral de hierro, Circored® y Circofer®. Estos procesos tienen una configuración de dos fases, combinando un lecho fluidizado circulante con un lecho fluidizado burbujeante. El proceso Circored emplea hidrógeno como reductor. La primera planta de Circored se construyó en Trinidad para producir 500,000 toneladas al año de hierro briquetado en caliente y entró en servicio en 1999. En el proceso Circofer se utiliza carbón como reductor. En algunos sistemas para el proceso de reducción directa (ej., Fastmet®), pueden usarse diversas fuentes de carbono como reductor. Los ejemplos de fuentes de carbono utilizables son carbón, coque fino y desechos de acerías que contengan carbono (polvo de altos hornos, fangos, polvo de hornos básicos de oxígeno, cascarillas de laminación, polvo de hornos de arco eléctrico, polvo de sinterizado). Estos procesos transforman en hierro metálico el alimento de óxido de hierro granulado, finos de óxido, o desechos de acerías, y genera un producto de hierro de reducción directa adecuado para utilizar en un alto horno.

Se ha desarrollado recientemente una innovadora tecnología de fusión directa en base a aire, llamada proceso de elaboración de hierro Hlsmelt. El proceso se lleva a cabo a presión dentro de una unidad vertical para reducción de fundición que tiene una solera revestida refractaria y un espacio superior enfriado con agua. La ventaja principal del proceso para los fabricantes de hierro es que produce metales calientes sin hornos de coque o plantas de sinterización.

Otras tecnologías patentadas como TecnoRed® figuran en Lockheed Martin Energy Systems, 2000.

3.2 Fundición directa

La fundición directa reemplaza la combinación tradicional de planta de sinterización, horno de coque y alto horno para producir hierro líquido. Varios de procesos de fundición directa están evolucionando y se encuentran en distintas etapas de desarrollo y comercialización.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se explican las medidas primarias y secundarias para reducir las emisiones de PCDD y PCDF derivadas de los procesos de sinterización de hierro. Gran parte de este material se ha extraído de William Lemmon and Associates Ltd. 2004.

No se ha determinado totalmente hasta qué punto se pueden reducir las emisiones aplicando sólo medidas primarias y puede que varíe de una planta a otra.

En Nordic Council *et al.*, junio de 2006, se publica una reseña las experiencias de la industria europea en materia de limpieza de gases residuales en plantas de sinterización. Un repaso de las experiencias en instalaciones de los países nórdicos figura en una revisión general de mejores técnicas disponibles de Norden 2006.

4.1 Medidas primarias

Se entiende por medidas primarias aquellas medidas de prevención de la contaminación que evitarán y reducirán la formación y liberación de sustancias del Anexo C. Algunas veces se las denomina medidas de optimización o integración de procesos. La prevención de la contaminación se define como: "Empleo de procesos, prácticas, materiales, productos o energía que impiden o reducen la creación de contaminantes y desechos, y reducen el riesgo general para la salud humana y el medio ambiente" (véase la sección III.B de las presentes directrices).

Se han identificado medidas primarias que pueden ayudar a prevenir y disminuir la formación y liberación de sustancias del Anexo C. No se conocen las reducciones de emisiones asociadas a la aplicación de las siguientes medidas primarias aisladamente en cada planta, y tendrían que ser evaluadas. Se recomienda que las siguientes medidas se ejecuten junto con las medidas secundarias apropiadas para asegurar la máxima disminución posible de emisiones. Las medidas primarias señaladas son:

4.1.1 Funcionamiento estable y uniforme de la cadena de sinterizado

Las investigaciones han demostrado que los PCDD/PCDF se forman en el mismo lecho de sinterizado, probablemente inmediatamente delante del frente de la llama a medida que los gases calientes se aspiran a través del lecho. Se ha demostrado que las alteraciones en el frente de la llama (es decir, condiciones no estabilizadas) generan mayores emisiones de PCDD/PCDF.

Las cadenas de sinterizado deberían operar de forma que el proceso se mantenga en condiciones estables y uniformes (es decir, operaciones estabilizadas, pocas alteraciones en el proceso) a fin de disminuir la formación y liberación de PCDD, PCDF y de otros contaminantes. Las condiciones operativas que requieren una gestión uniforme son la velocidad de la cadena, composición del lecho (mezcla uniforme de los materiales de rechazo, disminución de la entrada de cloro), altura del lecho, el uso de aditivos (por ejemplo, agregar cal quemada puede ayudar a reducir la formación de PCDD/PCDF), disminución del contenido de aceite en la cascarilla, reducción de la infiltración de aire a través de la cadena, sistemas de acondicionamiento para la red de tuberías y gases residuales, y reducción de interrupciones en la cadena. Este método generará asimismo mejoras en el desempeño operativo (ej., productividad, calidad del sinter, eficiencia energética) (European Commission 2000, p. 47; IPPC 2001, p. 39).

4.1.2 Vigilancia continua de los parámetros

Debería emplearse un sistema de vigilancia continua de los parámetros para asegurar un funcionamiento óptimo de la cadena de sinterizado y de los sistemas de acondicionamiento para gases residuales. Se miden varios parámetros durante las pruebas de emisiones para determinar la correspondencia entre el valor del parámetro y las emisiones de chimenea. Luego, los parámetros determinados se monitorean constantemente y se comparan con sus valores óptimos. Las variaciones en los valores de los parámetros pueden notificarse para que se tomen las medidas correctivas a fin de mantener un funcionamiento óptimo de la cadena de sinterizado y del sistema para control de emisiones.

Los parámetros operativos que hay que vigilar pueden referirse a los ajustes del regulador de tiro, caídas de presión, caudal del agua del depurador, opacidad promedio y velocidad de la cadena.

Los operadores de plantas de sinterización deberían preparar un plan de vigilancia especial para el sistema de vigilancia continua de parámetros que abarque la instalación, desempeño, operación y mantenimiento, garantía de calidad y registros, y procedimientos de notificación. Los operadores deberían tener registros que documenten la conformidad con los requisitos de vigilancia determinados y el plan de mantenimiento y operación (EPA 2003).

4.1.3 Recirculación de gases residuales

Se ha comprobado que el reciclaje de los gases residuales disminuye las emisiones de contaminantes, y reduce la cantidad de gases residuales que necesitan tratamiento al final del proceso. La recirculación de parte de los gases residuales derivados de toda la cadena de sinterizado, o bien, la recirculación por secciones de estos gases, pueden disminuir la formación y liberación de contaminantes. Para más información sobre esta técnica, véase ECSC 2003 y European Commission 2000, p. 56–62.

Reciclar los gases residuales de la sinterización de hierro puede reducir las emisiones de PCDD/PCDF, NO_x y SO_2 . No obstante, esta alternativa también puede ayudar a disminuir la producción, afectar la calidad del sinter y puede producir una mayor exposición al polvo en el lugar de trabajo, y por ende, más necesidad de mantenimiento. Cualquiera de estas medidas se debe poner en práctica con precaución tomando en consideración su potencial de afectar otros aspectos del funcionamiento de la planta.

4.1.4 Selección del material de alimentación

Habría que reducir al mínimo las sustancias no deseadas en el alimento para la cadena de sinterizado. Estas sustancias son contaminantes orgánicos persistentes y otros elementos asociados con la formación de PCDD/PCDF, HCB y PCB (ej., cloro/cloruros, carbono, precursores y aceites). Un control deficiente del material entrante también puede perjudicar el funcionamiento del alto horno.

Debería efectuarse un examen de los materiales de alimentación para determinar su composición, estructura y concentración de sustancias que se asocian a contaminantes orgánicos persistentes y su formación. Deberían definirse las opciones para eliminar o reducir las sustancias no deseadas en el material de alimentación. Por ejemplo:

- Eliminar los contaminantes del material (ej., desaceitar la cascarilla de laminación).
- Sustituir el material (ej., reemplazar el coque fino por antracita).
- Evitar el uso de material contaminado (ej., evitar procesar los polvos de sinterizado derivados de los precipitadores electrostáticos que, según se ha demostrado, aumentan la formación y liberación de PCDD/PCDF) (Kasai *et al.* 2001).

- Especificar los límites de las concentraciones admisibles de sustancias no deseadas (ej., el límite de aceite en el alimento debería ser menor a 0.02%) (EPA 2003).
- Se deberían formular y aplicar los procedimientos documentados para efectuar los cambios apropiados.

4.1.5 Preparación del material de alimentación

Los materiales finos de alimentación (por ejemplo, polvos capturados) deberían ser aglomerados adecuadamente antes de ser depositados en la cadena de sinterizado, y los materiales de alimentación deberían estar perfectamente mezclados o combinados. Estas medidas disminuirán la formación y el arrastre de contaminantes en los gases residuales, y además reducirán las emisiones fugitivas.

4.1.6 Inyección de urea

Se han realizado pruebas que utilizan la inyección de urea para suprimir la formación de dioxinas y furanos en una planta de sinterización de hierro en el Reino Unido. Se agregaron cantidades controladas de gránulos de urea a la cadena de sinterizado. Se considera que esta técnica previene o reduce tanto los PCDD/PCDF como las emisiones de dióxido de azufre. Los ensayos indicaron que la formación de PCDD/PCDF se redujo en un 50% aproximadamente. Se estima que una reducción del 50% en los PCDD/PCDF obtendría una concentración de emisiones de 0.5 ng EQT- l/m^3 . Se calculan costos de capital de UK£0.5 millones a £1 millón por planta (aproximadamente de US\$0.9 millones a \$1.8 millones) (Entec UK Ltd. 2003, p. D10–D20).

Varias instalaciones de sinterización europeas han probado la adición de urea y observado que las emisiones PCDD/PCDF podrían reducirse en un 50% con la adición de pequeñas cantidades de urea a la mezcla de sinterizado (Hartig, Steden and Lin, 2005). Sin embargo, también se informó que hubo emisiones adicionales de polvo, NOx y NH₃ en los gases residuales limpios (es de suponer que se utilizaron los sistemas de prevención y control de contaminantes existentes). Además, si bien en algunas instalaciones se hallaron disminuciones significativas de SO₂, en otras se indicó que los compuestos de amoníaco pueden adulterar los resultados de SO₂ utilizando métodos de medición convencionales. No se indicó, sin embargo, si estos ensayos trataban de mejorar y modificar los sistemas de prevención y control de la contaminación atmosférica ocasionada por distintos contaminantes. Se informó que a diciembre de 2005 ningún miembro de la asociación europea del sector estaba utilizando inyección de urea en sus operaciones ordinarias.

En la única planta de sinterizado de Canadá, operada por Stelco Inc. en Hamilton, Ontario, se han completado los ensayos utilizando un nuevo proceso similar para reducir las emisiones de dioxinas. En Stelco se observó que sellar el horno para reducir la cantidad de oxígeno y agregar una pequeña cantidad de urea interfería con la reacción química que genera las dioxinas, con lo que se reducían las emisiones. Esta nueva configuración del proceso, combinada con sistemas de depuración de aire, liberó 177 pg/m³ de dioxinas en una prueba. Este resultado supera el límite nacional canadiense de 2005, que era de 500 pg/Rm³, y se encuentra por debajo del límite de 200 pg/Rm³

para 2010. Representa asimismo una reducción de 93% respecto de los niveles de 1998, de 2,700 pg/Rm³. Está claro que la mejora no depende de la depuración de las dioxinas fuera de los gases de chimenea, pero se considera resultado de una “auténtica prevención de la contaminación”, ya que se necesita cloro para producir dioxinas, y la urea libera amoníaco, que captura los cloruros en el polvo, reduciendo su disponibilidad para la formación de dioxinas (*Hamilton Spectator* 1 March 2006).

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias se conciben como tecnologías o técnicas para controlar la contaminación, a veces descritas tratamientos de final de proceso.

Las medidas primarias establecidas anteriormente deberían ponerse en práctica en conjunto con medidas secundarias adecuadas para asegurar la mayor disminución y reducción de emisiones posible. Las medidas de eficiencia comprobadas para disminuir y reducir las emisiones de PCDD y PCDF son las siguientes:

4.2.1 Técnicas de eliminación

4.2.1.1 Adsorción/absorción y desempolvamiento de alta eficiencia

Esta técnica implica la sorción de PCDD/PCDF en un material como carbón activado, junto con un control efectivo del material particulado (desempolvamiento).

En la tecnología para la regeneración de carbón activado se utiliza un precipitador electrostático para reducir la concentración de polvo en los gases de escape antes de su ingreso en la unidad de carbón activado (William Lemmon and Associates Ltd. 2004). El gas residual pasa a través de un lecho móvil lento, con gránulos de carbón vegetal, que actúa como medio de filtro/adsorción. El carbón usado se descarga y transfiere a un regenerador, donde se lleva a altas temperaturas. Los PCDD/PCDF adsorbidos al carbón se descomponen y destruyen dentro de la atmósfera inerte del regenerador. Se ha demostrado que esta técnica reduce las emisiones de 0.1 a <0.3 ng EQT-I/m³.

Otra técnica de sorción consiste en el uso de la inyección de lignito o de carbón activado, junto con un filtro de tela. Los PCDD/PCDF se sorben en el material inyectado, luego este material es recolectado por el filtro de tela. Junto con un buen funcionamiento de la cadena de sinterizado, esta técnica se asocia a concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF que van de 0.1 a 0.5 ng EQT-I/m³ (IPPC 2001, p. 135).

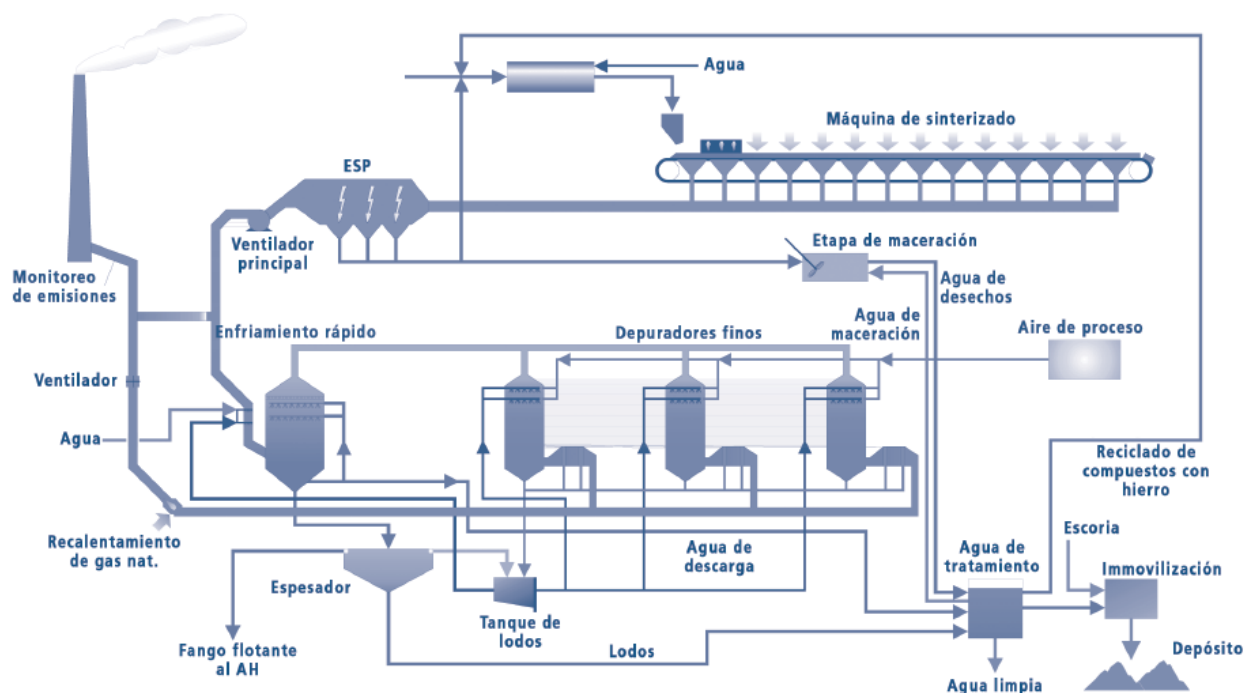
En principio debería ser posible inyectar carbono en la corriente de gas antes de los recolectores de polvo existentes, como los precipitadores electrostáticos y los filtros de tela, de la misma forma en que algunas incineradoras controlan las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes, y en Bélgica se han obtenido buenos resultados con esta técnica para sinterización de hierro. La inversión que representa agregar carbono al equipo existente sería mucho menor que la de agregar un sistema para la regeneración de carbón activado.

4.2.1.2 Sistemas de depuración húmeda para partículas finas

Se ha demostrado que el sistema de depuración Airfine, ilustrado en la Figura 2, de Voest Alpine Industries (Austria), reduce eficazmente las concentraciones de emisiones a 0.2 - 0.4 ng EQT- l/m^3 . El sistema de depuración utiliza un flujo de agua a contracorriente de gas residual en ascenso para depurar las partículas gruesas y los compuestos gaseosos (por ejemplo, dióxido de azufre (SO_2)), y para enfriar rápidamente el gas de desecho. (También puede usarse un precipitador electrostático corriente arriba para el predeempolvamiento). Puede agregarse sosa cáustica para mejorar la absorción del SO_2 . A continuación un depurador fino, la característica principal del sistema, aplica un chorro de niebla a alta presión simultáneamente a la corriente de gas para eliminar impurezas. Unas toberas de doble flujo expulsan agua y aire comprimido (creando gotículas microscópicas) para eliminar partículas finas de polvo, PCDD y PCDF (William Lemmon and Associates Ltd. 2004, p. 29–30; European Commission 2000, p. 72–74).

Esta técnica debería combinarse con un tratamiento efectivo de las aguas residuales del depurador, y los fangos de las aguas residuales deberían eliminarse en rellenos sanitarios seguros (European Commission 2000). Hay ejercer cautela en lo que respecta a la idoneidad de esta técnica para cada caso.

■ Figura 2. Diagrama del proceso de una planta de sinterización que utiliza un sistema de depuración húmedo



Fuente: Hofstadler et al. 2003.

4.2.2 Medidas generales

Las siguientes medidas pueden ayudar a disminuir las emisiones contaminantes, pero deberían combinarse con otras medidas (ej., adsorción/absorción, recirculación de gases de escape) para un control eficaz de la formación y liberación de PCDD/PCDF.

4.2.2.1 Eliminación del material particulado de los gases de la sinterización

Se ha sugerido que una eliminación efectiva del polvo puede ayudar a reducir las emisiones de PCDD y PCDF. Las partículas finas en los gases de escape del sinterizado tienen una superficie sumamente extensa para la adsorción y condensación de contaminantes gaseosos, como PCDD y PCDF (Hofstadler *et al.* 2003). La mejor técnica disponible para eliminar el material particulado es el uso de filtros de tela, que en plantas de sinterización, se asocian a emisiones de material particulado en concentraciones de <10 a <30 mg/m³ (UNECE 1998; IPPC 2001, p. 131).

Otras opciones para el control de particulados de uso común para gases residuales de plantas de sinterización son los precipitadores electrostáticos y, ocasionalmente, depuradores húmedos, aunque sus eficiencias para la eliminación de partículas no son tan altas como las de los filtros de tela. Un buen desempeño de los precipitadores electrostáticos y de los depuradores de gas húmedos de alta eficiencia se asocia a concentraciones de material particulado de <30 a 50 mg/m³ (IPPC 2001; William Lemmon and Associates Ltd. 2004, p. 26; UNECE 1998).

Deberían exigirse y practicarse controles de captura y emisión de partículas de las dimensiones adecuadas.

Los filtros de tela también pueden colocarse después de los precipitadores electrostáticos, lo que permite recolectar y usar los polvos por separado.

4.2.2.2 Recubrimiento de la cadena de sinterizado

El uso de campanas en la cadena de sinterizado reduce las emisiones fugitivas del proceso, y permite aplicar otras técnicas, como la recirculación de gases residuales.

5. Nuevas investigaciones

La reducción catalítica selectiva se ha empleado para controlar las emisiones de NO_x de diversos procesos industriales, incluida la sinterización de hierro. Se ha demostrado que la tecnología de la reducción catalítica selectiva modificada (es decir, con mayor área reactiva) y algunos procesos catalíticos descomponen los PCDD y PCDF contenidos en los gases de escape, probablemente mediante reacciones de oxidación catalítica. Este proceso puede considerarse una técnica incipiente con el potencial de reducir emisiones de contaminantes orgánicos persistentes derivadas de plantas de sinterización y otras aplicaciones.

Un estudio sobre emisiones de chimenea en cuatro plantas de sinterización arrojó concentraciones menores de PCDD/PCDF (0.995–2.06 ng EQT-I/Nm³) en los gases de escape de las plantas de sinterización con reducción catalítica selectiva en comparación con una planta que no empleaba esta técnica (3.10 ng EQT-I/Nm³), y el grado de cloración de los PCDD/PCDF fue menor en plantas con reducción catalítica selectiva. Se concluyó que la reducción catalítica selectiva efectivamente descomponía PCDD/PCDF, pero podía no ser suficiente como tecnología independiente de destrucción de PCDD/PCDF para cumplir límites de emisiones estrictos. Se necesitarían técnicas

complementarias (por ejemplo, la inyección de carbón activado) (Wang *et al.* 2003, p. 1123–1129).

La oxidación catalítica, según la selección del catalizador, puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros contaminantes de los gases de escape. Se requeriría un trabajo de validación antes de usar este proceso. Es preciso seguir investigando el uso de la reducción catalítica selectiva y otras técnicas de oxidación catalítica en aplicaciones de sinterización de hierro para determinar su valor y efectividad para destruir y reducir los PCDD/PCDF liberados por esta fuente.

6. Resumen de medidas

Las Tablas 1 y 2 presentan un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 1. Alternativas y requisitos para nuevas plantas de sinterización de hierro**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos alternativos	Se debería dar prioridad a los procesos alternativos con un menor potencial de efectos ambientales que la sinterización tradicional de hierro.	Ejemplos: <ul style="list-style-type: none"> Plantas de peletización. Reducción directa de hierro (Fastmet®, Circored® y Circofer®). Fundición directa. 	
Requisitos de desempeño	Se debería permitir que las nuevas plantas de sinterización de hierro apliquen estrictos requisitos de desempeño y registro asociados a mejores técnicas disponibles.	Se deben considerar las medidas primarias y secundarias que figuran en la Tabla 2.	Niveles de desempeño asociados a MTD y MPA: <0.2 ng EQT-I/Nm ³ para PCDD/PCDF y puede llegar a <0.1ng EQT-I/Nm ³ .

■ Tabla 2. Resumen de medidas primarias y secundarias para plantas de sinterización de hierro

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Funcionamiento estable y uniforme de la planta de sinterización	La cadena de sinterizado debería operarse de forma que el proceso se mantenga en condiciones estables y uniformes (operaciones estabilizadas, mínimas alteraciones en el proceso) a fin de disminuir la formación y liberación de PCDD, PCDF y de otros contaminantes.	Condiciones para el funcionamiento de la cadena de sinterizado: <ul style="list-style-type: none"> • Interrupciones mínimas • Velocidad regular de la cadena • Composición del lecho • Altura del lecho • Aditivos (ej., cal quemada) • Mínimo contenido de aceite • Mínimas infiltraciones de aire 	Este método tendrá co-beneficios, como un aumento en la producción y en la calidad del sinterizado, además de mejoras en la eficiencia energética. Habría que evaluar los efectos en las sustancias del Anexo C en cada planta por separado.
Vigilancia continua de los parámetros	Debería emplearse un sistema de vigilancia continua de los parámetros para asegurar un funcionamiento óptimo de la cadena de sinterizado y de los sistemas de acondicionamiento para gases residuales. Los operadores deberían preparar un plan de vigilancia particular para el sistema de vigilancia continua de los parámetros y conservar registros que documenten su conformidad con el plan.	Deberían determinarse las correspondencias entre los valores de los parámetros y de las emisiones de chimenea (operación estable). Luego, los parámetros se monitorean constantemente y se comparan con sus valores óptimos. Las variaciones significativas en los valores de los parámetros pueden notificarse para que se tomen las medidas correctivas.	
Recirculación de gases residuales	Los gases residuales pueden devolverse a la cadena de sinterizado para reciclarlos a fin de disminuir las emisiones contaminantes y reducir la cantidad de gases residuales que requieren tratamiento al final del proceso.	La recirculación de los gases residuales puede implicar el reciclaje de parte del gas de escape de toda la cadena de sinterizado, o la recirculación por secciones de este gas.	Esta técnica sólo generará una pequeña reducción de PCDD/PCDF pero puede tener efectos significativos en otros parámetros operativos y debería evaluarse cuidadosamente.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Selección del material de alimentación: Disminución de los materiales de alimentación que contienen contaminantes orgánicos persistentes o que conducen a su formación.	Revisar los materiales de alimentación y determinar materiales y/o procedimientos alternativos para reducir al mínimo la entrada de material no deseado. Se deberían formular y aplicar procedimientos documentados para efectuar los cambios apropiados.	Ejemplos: <ul style="list-style-type: none"> • Eliminar los contaminantes del material (ej., desaceitar la cascarilla de laminación). • Sustituir el material (ej., reemplazar el coque fino por antracita). • Evitar el uso de material contaminado (ej., el polvo del sinterizado capturado por precipitadores electrostáticos). • Especificar los límites de las concentraciones admisibles de sustancias no deseadas (ej., el límite de aceite en el alimento debería ser menor a 0.02%). 	Puede requerirse una evaluación individual de cada planta.
Preparación del material de alimentación	El material fino (ej., polvos capturados) debería ser aglomerado antes ser depositado en la cadena de sinterizado. Los materiales de alimentación deberían estar perfectamente mezclados antes de colocarlos en la cadena de sinterizado.		Estas medidas disminuirán el arrastre de contaminantes en el gas residual, y a disminuir las emisiones fugitivas.
Inyección de urea	Se agregan cantidades controladas de gránulos de urea a la mezcla en la cadena de sinterizado. Se considera que esta técnica previene o reduce tanto los PCDD/PCDF como las emisiones de dióxido de azufre.	Hay que sellar la cadena para reducir la cantidad de oxígeno (el amoníaco actúa como agente reductor, el exceso de oxígeno como oxidante). Se recomienda para usar en combinación con sistemas de depuración de aire para eliminar las emisiones gaseosas de nitrógeno.	

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas secundarias			
Las siguientes medidas secundarias pueden reducir eficazmente las emisiones de PCDD/PCDF y deberían considerarse como ejemplos de mejores técnicas disponibles.			
Adsorción/ absorción y desempolvamiento de alta eficiencia	El uso de esta técnica debería comprender una fase de adsorción junto con un control efectivo del material particulado como componentes esenciales del sistema de acondicionamiento de gases de escape.	Se han demostrado las siguientes técnicas de adsorción: <ul style="list-style-type: none"> • Inyección de carbono con recolección mediante precipitadores electrostáticos. • Tecnología para la regeneración de carbón activado en la que primero se depuran los gases con precipitadores electrostáticos, y pasan por un lecho móvil de adsorción (carbón vegetal) tanto para adsorber los PCDD/PCDF como para filtrar partículas. Luego, el material adsorbente se regenera. • Inyección de carbón activado, lignito u otro material adsorbente parecido en la corriente de gas seguida de un desempolvamiento por filtros de tela. 	Estas técnicas se asocian a los siguientes niveles de concentración de emisiones: <0.3 ng EQT-l/m ³ ; 0.1 a 0.5 ng EQT-l/m ³ . Debe analizarse cuidadosamente la rentabilidad de los distintos sistemas de adsorción con carbón. Es probable que la inyección en la corriente sea mucho menos costosa que los sistemas de regeneración de carbón en el lecho.
Depurador húmedo fino para gases residuales	Esta técnica debería consistir en el uso previo de un depurador húmedo a contracorriente para enfriar rápidamente los gases y eliminar las partículas más gruesas, seguido de un depurador fino con chorro de niebla a alta presión simultáneamente a la corriente de gas para eliminar partículas finas e impurezas.		Se ha demostrado que el sistema de depuración fina en húmedo registrado como Airfine®, de Voest Alpine Industries, reduce las concentraciones de emisiones a 0.2 - 0.4 ng EQT-l/m ³ . Sin embargo, su aplicabilidad debe ser estudiada en cada caso.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Las siguientes medidas secundarias no deberían considerarse mejores técnicas disponibles por sí solas. Para disminuir y reducir efectivamente los PCDD, PCDF y los otros contaminantes orgánicos persistentes, estas medidas deberían aplicarse en coordinación con otras medidas identificadas:			
Eliminación del material particulado de los gases residuales	Los gases residuales deberían tratarse con técnicas de alta eficiencia, ya que este proceso puede disminuir las emisiones de PCDD/PCDF. Una mejor técnica disponible recomendada para el control de partículas es el uso de filtros de tela. Los extremos de alimentación y descarga de la cadena de sinterizado deberían contar con campanas adecuadas para capturar y mitigar las emisiones fugitivas.	Se ha demostrado que los filtros de tela reducen las emisiones particuladas de gases de escape del sinterizado a <10 y <30 mg/m ³ .	Otras opciones para el control de partículas son los precipitadores electrostáticos y los depuradores de alta eficiencia. Un buen funcionamiento de estas tecnologías se asocia a concentraciones de partículas de <30 a 50 mg/m ³ . Pueden obtenerse emisiones menores de partículas, de <5 a 20 mg/m ³ , (y de las dioxinas y furanos asociados) con filtros de tela.
Recubrimiento de la cadena de sinterizado	Se deberían usar campanas en la cadena de sinterizado para disminuir las emisiones fugitivas del proceso.		El recubrimiento de la cadena con campanas permitirá aplicar otras medidas, como la recirculación de gases residuales.

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para una planta de sinterización de hierro son <0.2 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones de oxígeno operativas).

Referencias

Augerman, Mikko, "Alternative Processes for Iron and Steelmaking- Presentation", University of Oulu, Finland, 2004

ECSC (European Coal and Steel Community). 2003. *The Impact of ECSC Steel Research on Steel Production and Sustainability*.

www.stahl-online.de/medien_lounge/medieninformationen/hintergrundmaterial.htm.

Entec UK Ltd. 2003. *Development of UK Cost Curves for Abatement of Dioxins Emissions to Air, Final Report*. Draft for consultation, November 2003.

Environment Canada. 2001. *Environmental Code of Practice for Integrated Steel Mills: CEPA 1999 Code of Practice*. Public Works and Government Services, Canada.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants: Integrated Iron and Steel Manufacturing: Final Rule*. 40 CFR Part 63, Federal Register 68:97. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov.

European Commission. 2000. *Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Hamilton Spectator, Canada, 1 March 2006.

Hartig W., Stedem K.H., Lin R. (AG der Dillinger Huttenwerke), *Sinter plant gas cleaning - State of the art*, presentation at 2005 ATS International Steelmaking Conference (Paris, December 15-16, 2005) *La Revue de Metallurgie-CIT* Juin 2006.

Hofstadler K. et al. 2003. *Dioxin at Sinter Plants and Electric Arc Furnaces: Emission Profiles and Removal Efficiency*. Voest Alpine Industrienlagenbau GmbH, Austria. g5006m.unileoben.ac.at/downloads/Dioxin.doc.

IPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau). 2001. *Guidance for the Coke, Iron and Steel Sector*. Sector Guidance Note IPPC S2.01. UK Environment Agency.

Kasai E. et al. 2001. "Effect of Additives on the Dioxins Emissions in the Iron Ore Sintering Process." *ISIJ International* 41:1.

Lankford W.T., Samways N.L., Craven R.F. and MacGannon H.E. (eds.) 1985. *The Making, Shaping and Treating of Steel*. 10th Edition. Association of Iron and Steel Engineers, USA.

Nils-Olov Lindfors and Pertti Kostamo, *BAT examples from the Nordic iron and steel industry*, Norden Nordic Council of Ministers, Environment, TermNord 2006:509

Lockheed Martin Energy Systems, 2000, "Ironmaking Process Alternatives Screening Study, Volume 1" Summary Report, prepared for USA Department of Energy, LG Job No. 010529.01, October, 2000

United Kingdom Environment Agency. 2001. *Integrated Pollution Prevention and Control: Guidance for the Coke, Iron and Steel Sector*, Sector Guidance Note IPPC S2.01,

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). 1998. "Best Available Techniques for Controlling Emission of Heavy Metals." Annex III, *Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Pollution on Heavy Metals*. UNECE, Geneva. www.unece.org.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Wang L.-C. et al. 2003. "Emission of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans from Stack Flue Gases of Sinter Plants." *Chemosphere* 50:9.

William Lemmon and Associates Ltd. 2004. *Research on Technical Pollution Prevention Options for Iron Sintering*. Prepared for the Canadian Council of Ministers of the Environment, Canada. www.ccme.ca/assets/pdf/df_is_p2_ctxt_p2_strtgy_e.pdf.

(iii) Producción secundaria de aluminio

■ Resumen

La fundición secundaria de aluminio consiste en la producción de aluminio a partir de productos de aluminio usados o de desechos de procesos para recuperar los metales mediante pretratamiento, fundición y refinación.

Se utilizan combustibles, fundentes y aleaciones, mientras que el magnesio se elimina agregando cloro, cloruro de aluminio o sustancias orgánicas cloradas. Las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo se generan probablemente a partir de sustancias añadidas para eliminar el magnesio, por combustión incompleta, sustancias orgánicas en el alimento, compuestos clorados, y por formación en el sistema a temperaturas entre 250°C y 500°C.

Como mejores técnicas disponibles están los hornos avanzados de alta temperatura, alimentación libre de aceite y cloro (si hay opción), cámaras de postcombustión con enfriamiento rápido, adsorción con carbón activado y filtros de tela para desempolvamiento, así como evitar el uso de hexacloroetano para eliminar el magnesio de la fundición y, en general, ejercer un control cuidadoso sobre este proceso.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para las fundidoras secundarias de aluminio son $<0.5 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

Los procesos utilizados en la fundición secundaria de aluminio dependen de material de alimentación. El pretratamiento, tipo de horno y fundentes empleados variarán según la planta. Los procesos de producción comprenden el pretratamiento y la fundición/refinación de la chatarra. Los métodos de pretratamiento consisten en limpieza mecánica, pirometalúrgica e hidrometalúrgica. La fundición se efectúa en hornos rotatorios o de reverbero. También pueden utilizarse hornos de inducción para fundir los materiales de alimentación de aluminio más limpios.

Los hornos de reverbero están compuestos de dos secciones: una cámara de fundición con un quemador de petróleo pesado y un crisol abierto donde se introduce chatarra de aluminio de diversos tamaños. Los hornos rotatorios consisten en un cuerpo horizontal cilíndrico montado sobre rodillos y revestido con material refractario. El horno se enciende en un extremo, normalmente usando gas o petróleo como combustible.

El alimento consiste en chatarra de procesos, latas vacías, láminas, extrusiones, chatarra comercial, viruta y metal viejo laminado o fundido. Las derivadas del proceso de fundición secundaria también se reciclan como alimento. La preclasificación de la chatarra por grupos de aleación puede reducir el tiempo de procesamiento. La chatarra suele venir contaminada con aceites o revestimientos, que deben eliminarse para reducir las emisiones y mejorar la tasa de fundición (European Commission 2001, p. 279). La

escoria de sal es tratada para recuperar la sal, que se reutiliza como fundente en los hornos rotatorios. Los residuos derivados del tratamiento de la escoria de sal poseen un alto contenido de óxido de aluminio (Al_2O_3) y pueden reciclarse mediante el proceso Bayer o usarse como aditivos en la industria cementera.

El siguiente resumen del proceso es un extracto de EPA 1994:

“La mayoría de las plantas de recuperación secundaria de aluminio utilizan un procesamiento por lotes en las operaciones de fundición y refinación. El horno de fundición se utiliza para fundir la chatarra, y para eliminar las impurezas y los gases arrastrados. Luego, el aluminio líquido se bombea a un horno de conservación. Los hornos de conservación son más adecuados para la aleación final, y para hacer cualquier ajuste adicional que se necesite a fin de garantizar que el aluminio cumpla las especificaciones del producto. El vertido se efectúa desde los hornos de conservación, en moldes o como materia prima para máquinas de colada continua.

Las operaciones de fundición y refinación pueden tener las siguientes fases: carga, fundición, adición del fundente, eliminación de magnesio, desgasificación, aleación, eliminación de espumas, y vertido. La carga consiste en colocar la chatarra de aluminio pretratada en un baño de aluminio fundido (fondo) que se mantiene en el horno de fundición. La chatarra, mezclada con el material fundente, se coloca normalmente dentro del crisol de carga del horno, donde el calor del aluminio líquido que rodea la chatarra hace que se funda por conducción. Los materiales fundentes se combinan con los contaminantes y flotan en la superficie del aluminio, atrapando las impurezas y actuando como una barrera (con un grosor hasta de seis pulgadas) que reduce la oxidación del aluminio fundido. Para disminuir la oxidación del aluminio (pérdida de fundente) se utilizan métodos mecánicos para sumergir la chatarra en el baño lo más rápidamente posible.

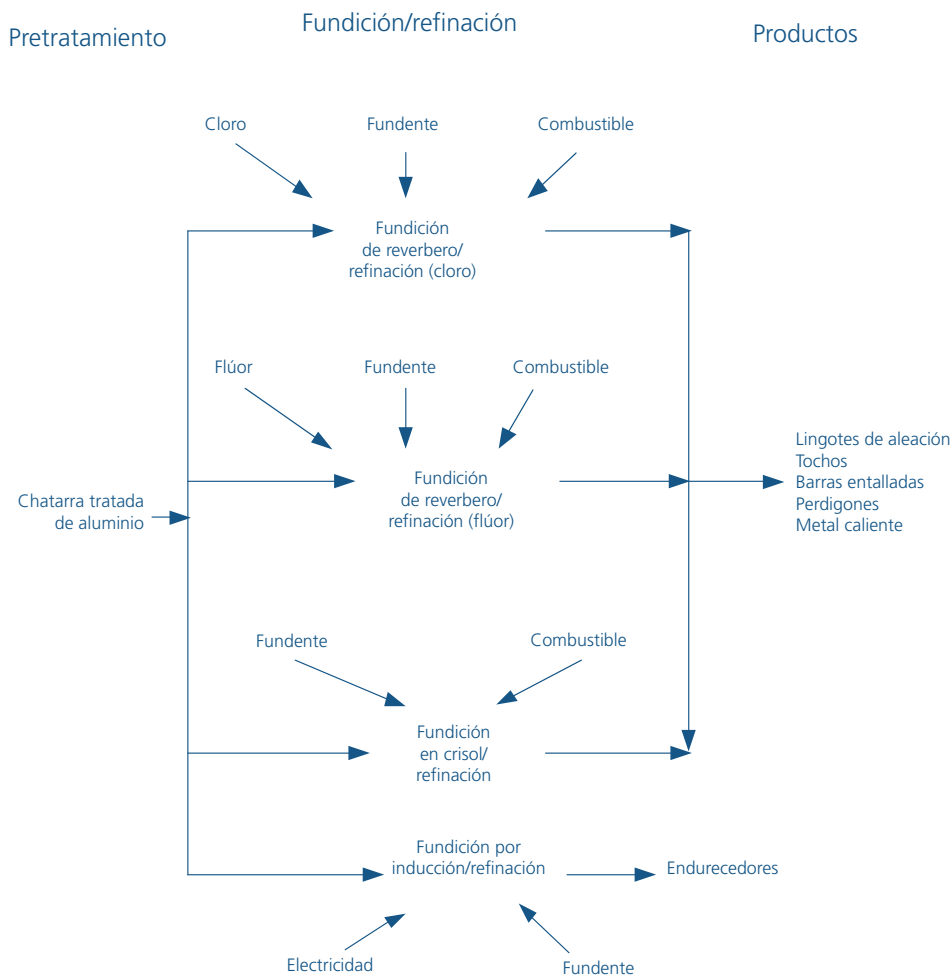
Es preciso reducir el contenido de magnesio en la carga fundida. Anteriormente, al eliminarlo con cloro líquido, el cloro se inyectaba a presión para que reaccionara con el magnesio a medida que el cloro burbujeaba hacia la superficie. El cloro presurizado se introducía por medio de tubos de grafito directamente en el baño, lo que generaba altas emisiones de cloro. Este procedimiento ha sido reemplazado recientemente por otra técnica para eliminar el magnesio del aluminio por medio de cloro. Se dosifica el gas clorado en el ducto de descarga de la bomba de circulación. Se prevé que en un tiempo más se registren reducciones de emisiones de cloro (en forma de compuestos clorados). En operaciones de eliminación de magnesio se utilizan otros agentes de cloración o fundentes, como el cloruro de aluminio anhidro o las sustancias orgánicas cloradas.

La desgasificación es un proceso utilizado para eliminar gases arrastrados en el aluminio fundido. Se introducen gases inertes a alta presión en el

fundido para agitarlo energicamente. Esta agitacion hace que los gases arrastrados suban a la superficie para ser absorbidos en el fundente flotante.

En las aleaciones se combina el aluminio con un agente de aleacion para de cambiar su consistencia y ductilidad. La operacion de desespumado sirve para eliminar fisicamente los fundentes semisolidos contaminados (escoria, impurezas o material flotante) recogiendo los de la superficie del fundido”.

■ **Figura 1. Fundición secundaria de aluminio**



Fuente: EPA 1994.

En diversos países se utilizan procesos artesanales, así como de pequeña escala, para recuperar el aluminio. Los límites de desempeño alcanzables no pueden aplicarse a estos procesos artesanales y de pequeña escala ya que los métodos empleados no pueden considerarse mejores técnicas disponibles ni mejores prácticas ambientales, y lo ideal sería que no se practicaran en absoluto. A veces se funde chatarra casi sin clasificar en un pequeño crisol u horno dentro un edificio o espacio techado, casi siempre mal ventilado. Este dispositivo puede encenderse con carbón vegetal, petróleo, desechos de aceite o carbón, según los factores económicos y el suministro local de combustible. En hornos de mayor tamaño, la colada puede ser tratada con fundentes y sustancias desgasificantes para mejorar la calidad del metal líquido. Los procesos artesanales y de

pequeña escala para recuperación de aluminio pueden liberar muchas sustancias al medio ambiente, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes. Convendría desalentar estos procesos en favor del uso de controles para la contaminación atmosférica adecuados en operaciones para la fundición secundaria de aluminio a mayor escala.

Sin embargo, cuando se emplean métodos artesanales y de pequeña escala para la recuperación de aluminio, pueden ponerse en práctica ciertas medidas para reducir la cantidad de contaminantes liberados al medio ambiente. Las medidas para reducir las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes y otros contaminantes, producidas por procesos artesanales consisten en preclasificar la chatarra, seleccionar una mejor fuente de combustible (petróleo o combustibles gaseosos en lugar de carbón), buena ventilación, filtración de gases de escape, gestión apropiada de los desechos y selección adecuada de los desgasificantes. Estas medidas pueden aplicarse con la ayuda de programas educativos y de difusión con la participación de grupos de artesanos y autoridades municipales.

La preclasificación eficaz puede ayudar a reducir de manera significativa las liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes. La clasificación manual, en vez de mecánica, de la chatarra, es factible en algunas economías, según la relación entre el costo de la mano de obra y la disponibilidad de capital. Una capacitación y supervisión adecuadas pueden lograr que la clasificación manual de la chatarra sea muy eficaz, y tienen la posibilidad de mejorar el consumo de energía y la calidad del producto, y reducir la cantidad de escoria por eliminar. El secado de los materiales de alimentación y el precalentamiento de los refractarios, aunque emplea más combustible, reduce la producción de hidrógeno en la colada y, de así, puede mejorar la calidad del producto sin usar sustancias químicas.

Una ventilación apropiada del lugar de trabajo reducirá la exposición laboral. La extracción de vapores y de gases residuales por medio de una chimenea y un cierre con campana sobre el crisol, proporciona un tiro natural, facilita a la ventilación y permite una cierta dispersión pero no reduce las emisiones, salvo en la medida en que mejora la calidad de la combustión. El uso petróleo o gas como combustibles disminuye la cantidad de contaminantes orgánicos persistentes formados.

En instalaciones de más grandes se pueden entubar los gases de escape y colocar controles de contaminación. Los filtros, depuradores secos o húmedos para la reducción de partículas pueden servir para controlar la contaminación pero necesitan un suministro de electricidad fiable para impulsar los ventiladores. Los depuradores húmedos requieren ajustes apropiados para recolectar, tratar y eliminar los efluentes en forma segura. Para todos los sistemas de control de contaminación se precisan disposiciones adecuadas para el manejo de residuos y se requiere que las vías de eliminación estén establecidas antes que su instalación. Si no existe tratamiento de efluentes son preferibles los dispositivos de control de contaminación atmosférica secos. Sin embargo, en muchos entornos, el almacenamiento del material particulado fino exige una atención especial y hay que tomar disposiciones en material de desechos y almacenamiento para el material capturado hasta que se defina una vía de eliminación segura. Sería conveniente el co-emplazamiento de instalaciones y la cooperación regional para gestionar y eliminar los desechos.

Se ha pensado que el uso del hexacloroetano como desgasificante para reducción de fundidos genera liberaciones importantes de contaminantes orgánicos persistentes. Se ha comprobado que el empleo de fluoruro potásico o fluoruro de aluminio y potasio como agente desgasificante es eficaz en plantas de gran tamaño; en otras se ha empleado cloro como desgasificante con resultados satisfactorios. Estas instalaciones cuentan con las medidas adecuadas de manejo y seguridad, así como con personal debidamente capacitado.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

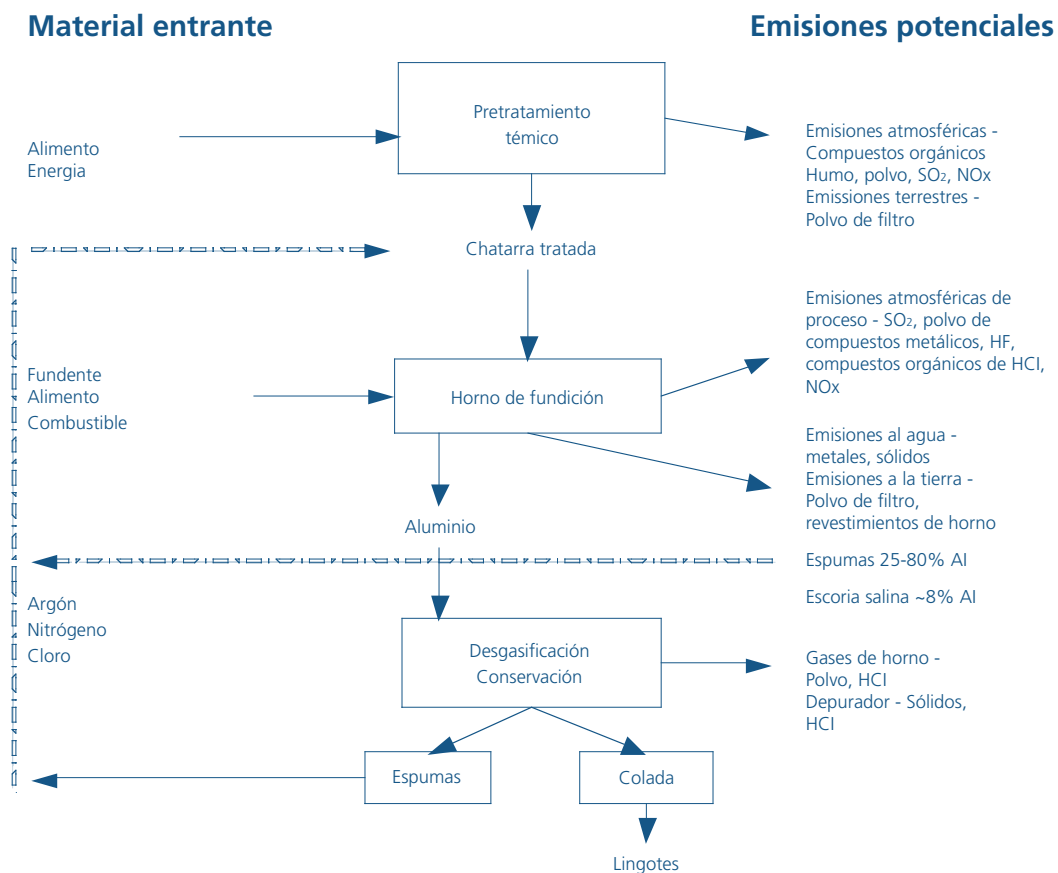
Es probable que la generación de las sustancias del Anexo C se deba a la combustión incompleta y a los materiales contaminantes presentes en el alimento, así como a la incorporación de sustancias para eliminar el magnesio además de la prevalencia de condiciones favorables para la formación de contaminantes orgánicos persistentes en el proceso.

2.1 Información general sobre emisiones de fundidoras secundarias de aluminio

Las emisiones atmosféricas potenciales son de polvo, compuestos metálicos, cloruros, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), y compuestos orgánicos como dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF) y monóxido de carbono (CO). Asimismo, puede generarse amoníaco por el almacenamiento, tratamiento y transporte inadecuado de espumas. Los compuestos clorados pueden eliminarse con depuradores húmedos o secos, y se puede disminuir su formación con un buen control y el uso de combinaciones de cloro y gases inertes. Pueden utilizarse quemadores con baja emisión de NO_x y combustibles con bajo contenido de azufre para disminuir las liberaciones de NO_x y SO_2 (European Commission 2001, p. 294–300).

“La postcombustión se emplea para destruir materiales orgánicos que salen del zona de combustión, y por otra parte, se inyectan materiales de tratamiento como cal, bicarbonato de sodio y carbono. Luego, la mayoría de las plantas utiliza filtros de manga o de cerámica (de alta eficiencia) para eliminar el polvo, y las emisiones pueden ser de 0,6 a 20 mg/ Nm³. A menudo, se encuentra un protector de chispa o una cámara de enfriamiento antes de los filtros, como protección. Se puede efectuar la recuperación de energía, y se usan con más frecuencia quemadores recuperativos (European Commission 2001).

■ **Figura 2. Materiales entrantes y salientes en la producción secundaria de aluminio**



Nota: El vapor y el polvo pueden asociarse con compuestos orgánicos volátiles y dioxinas (European Commission 2001).

2.2 Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Los PCDD/PCDF se forman durante la fundición de aluminio por combustión incompleta o síntesis *de novo* en presencia de compuestos orgánicos y clorados, como los fundentes, hexacloroetano, cloro, combustibles sin quemar, aceites o plásticos, en el material de alimentación. La alimentación secundaria suele estar compuesta de escoria contaminada.

“La presencia de aceites y de otros materiales orgánicos en la chatarra u otras fuentes de carbono (combustibles y agentes reductores, como el coque, parcialmente quemados) puede generar partículas de carbono finas que reaccionan con cloruros inorgánicos o cloro orgánicamente ligado a temperaturas que van de 250°C a 500°C para producir PCDD/PCDF. Este proceso se conoce como síntesis *de novo* y es catalizado por la presencia de metales como cobre o hierro.

Los PCDD/PCDF se destruyen a altas temperaturas (por encima de 850°C) en presencia de oxígeno; aun así, puede haber síntesis *de novo* al enfriarse los gases en la ‘ventana de reformación’, posibilidad que puede darse en los sistemas de reducción y en partes más frías del horno, ej., el área de alimentación. Un cuidadoso diseño de los sistemas de

enfriamiento para disminuir el tiempo de residencia en la ventana permite prevenir la síntesis *de novo*” (European Commission 2001, p. 133).

“Una combustión deficiente del combustible o del contenido orgánico en el material de alimentación puede producir la emisión de materiales orgánicos. Los controles efectivos de quemadores y hornos sirven para lograr una combustión óptima. Deben tenerse en cuenta las tasas de combustión máximas de los materiales orgánicos incluidos si se alimentan al horno. Se ha observado que una limpieza previa de la chatarra elimina gran parte del material orgánico y mejora la tasa de fundición. El empleo de mezclas cloradas para desgasificar y eliminar el magnesio y el uso de cloruros (fundente salino), proporcionará una fuente de cloro para la formación potencial de PCDD/PCDF” (European Commission 2001, p. 297).

A partir de la información obtenida de las operaciones secundarias de aluminio en Japón, se ha descubierto que las emisiones varían según el tipo de horno utilizado. El tipo de horno con más emisiones fue el horno de reverbero de pozo abierto. Estas unidades arrojaron promedios de 0.38 ng EQT-I/Nm³. Se cree que estos resultados se relacionan con el hecho de que es el único diseño de horno que permite la introducción de grandes trozos de material de desecho, y este material suele ser el más contaminado con compuestos orgánicos que pueden contribuir a la formación de PCDD/PCDF (Government of Japan 2005).

2.3 Liberaciones a otros medios

(European Commission 2001, p. 294–300)

“La producción de aluminio a partir de materia prima secundaria es, esencialmente, un proceso seco. Por lo general, la descarga de aguas residuales se limita al agua de enfriamiento, que suele recircular, y al agua de escorrentía pluvial de superficies y tejados. Esta última puede estar contaminada por el almacenamiento al descubierto de materias primas, como chatarra con aceite y sólidos depositados.

Las escorias salinas provienen de las mezclas de cloruro de sodio y de potasio empleadas para cubrir el metal líquido a fin de prevenir la oxidación, aumentar su rendimiento y la eficiencia térmica. Generalmente, estas escorias se producen en hornos rotatorios y pueden tener un impacto ambiental si se depositan en los suelos. Las espumas se utilizan como materia prima en otras áreas de la industria secundaria de aluminio y, a veces, son pretratadas por molienda y clasificación por aire para separar el aluminio del óxido de aluminio. Los filtros usados en el tratamiento de metales normalmente se eliminan. En algunos casos en que se usa bicarbonato de sodio para depurar los gases, los residuos sólidos pueden recuperarse con el fundente salino. Una alternativa es tratar térmicamente los polvos de filtro para destruir las dioxinas. Los revestimientos del horno y el polvo pueden recuperarse en los procesos

de tratamiento de escorias salinas o ser eliminados”.

3. Procesos recomendados

Las variaciones en el material de alimentación y en el control de calidad inciden en el diseño y la configuración del proceso. Los procesos considerados mejores técnicas disponibles son el horno de reverbero, los hornos rotatorios y rotatorios basculantes, el horno de inducción y el horno vertical Meltower. Todas las técnicas deben aplicarse junto con sistemas adecuados de recolección de gases y de reducción de emisiones.

No se dispone de información sobre procesos alternativos de fundición para el procesamiento secundario de aluminio.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se analizan las medidas primarias y secundarias para reducir y eliminar los PCDD/PCDF.

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas para prevenir la contaminación a fin de reducir o eliminar la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. Medidas posibles:

4.1.1 Preclasificación del material de alimentación

Debería evitarse la presencia de aceites, materiales orgánicos, como plásticos y compuestos de cloro, en el material de alimentación a fin de reducir la generación de PCDD/PCDF durante una combustión incompleta o síntesis *de novo*. El material de alimentación debería clasificarse antes de la fundición para adaptarlo al tipo de horno y al sistema de reducción, y para permitir el traslado de los materiales que no sean compatibles a otras instalaciones donde puedan ser tratados. De este modo, se evitará o reducirá el uso de fundentes salinos clorados durante la fundición.

Durante el pretratamiento, deberían eliminarse los aceites, pinturas y plásticos de la chatarra. La remoción de compuestos orgánicos y clorados reducirá el potencial de formación de PCDD/PCDF. Algunos métodos utilizados son la centrifugadora de virutas o barros de amolado, el secador de virutas y otras técnicas de eliminación térmica de revestimientos. Los procesos térmicos para eliminar revestimientos y aceites deberían ir seguidos de una postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases de escape (European Commission 2001, p. 310).

La clasificación de chatarra mediante tecnología láser y de corriente parásita está en fase de prueba. Estos métodos podrían proporcionar una selección de materiales más eficiente para el reciclaje y permitirían producir aleaciones en plantas de reciclaje (European Commission 2001, p. 294–300).

4.1.2 Control efectivo del proceso

Deberían utilizarse sistemas para controlar el proceso con el propósito de mantener su estabilidad y operar con niveles paramétricos que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF, como mantener la temperatura del horno sobre los 850°C para destruir los PCDD/PCDF. Lo ideal es que las emisiones de PCDD/PCDF se monitoreen sin interrupción para garantizar que las liberaciones sean mínimas. Se han hecho pruebas de muestreo continuo de emisiones de PCDD/PCDF en algunos sectores (ej., la incineración de desechos), pero en este campo las investigaciones siguen en curso. De no efectuarse una vigilancia continua de PCDD/PCDF, otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y controles de regulación del sistema de captación de vapores, deberían ser monitoreadas y mantenidas ininterrumpidamente a fin de establecer condiciones de funcionamiento óptimas para disminuir las emisiones de PCDD/PCDF.

4.1.3 Eliminación del magnesio

Una medida primordial para controlar las sustancias del Anexo C es la eliminación correcta del magnesio del fundido. Se ha comprobado que el uso de tabletas de hexacloroetano genera altas liberaciones de PCDD/PCDF y, en particular, de hexaclorobenceno (HCB), por lo que esta práctica está prohibida en Europa. Se trata de un aspecto importante del proceso. Optar por un método de eliminación requiere una evaluación cuidadosa de las alternativas ya que intervienen factores prácticos, sanitarios y de seguridad, además de ambientales.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas para control de la contaminación. Estos métodos no eliminan la generación de contaminantes, pero constituyen un medio para contener y prevenir emisiones.

4.2.1 Recolección de vapores y gases

La recolección de vapores y gases debería efectuarse para el control de las emisiones derivadas de todas las etapas del proceso. Deberían emplearse sistemas de alimentación y hornos sellados. Las emisiones fugitivas deberían controlarse manteniendo una presión de aire negativa dentro del horno para evitar las fugas. Si no se dispone de una unidad sellada, deberían instalarse campanas. Puede ser necesario que el horno o reactor estén en recintos cerrados. Cuando no es factible la extracción primaria ni la contención de vapores, el horno debería encerrarse para poder extraer, tratar y descargar el aire de ventilación (European Commission 2001, p. 187–188). Otras ventajas de la recolección de vapores y gases residuales desde el techo son que el personal queda menos expuesto a vapores y metales pesados.

4.2.2 Eliminación de polvo de alta eficiencia

El material particulado que se genera durante el proceso de fundición debe eliminarse ya que este material posee una gran área superficial en la que pueden adsorberse los PCDD/PCDF, bifenilos policlorados (PCB) y HCB. Aislar y eliminar debidamente estos

polvos contribuirá a controlar los PCDD/PCDF. Las partículas capturadas deberían tratarse en hornos a alta temperatura para destruir los PCDD/PCDF y recuperar metales. Como métodos posibles están los filtros de tela, depuradores secos y húmedos, y filtros de cerámica.

Depurar los gases de residuales con bicarbonato de sodio eliminará los cloruros generados por el fundente salino, produciendo cloruros de sodio, que después pueden eliminarse con filtros de tela para devolverlos al horno. Asimismo, un revestimiento catalítico en los filtros de manga podría destruir los PCDD/PCDF por oxidación y al mismo tiempo capturar el material particulado en el que se han adsorbido estos contaminantes (European Commission 2001, p. 294–300). Es importante garantizar un enfriamiento rápido (véase a continuación) para asegurarse de que no se produce formación en el sistema de reducción de polvos.

4.2.3 Postcombustión y enfriamiento rápido

Los postquemadores (cámaras de postcombustión) deberían funcionar con una temperatura mínima de 950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos (Hübner *et al.* 2000). Después de esta etapa, los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos de 250°C. La inyección de oxígeno en la parte superior del horno favorecerá la combustión completa (European Commission 2001, p. 189).

Se ha observado que se forman PCDD/PCDF en el rango de temperaturas de 250°C – 500°C, y se destruyen por encima de 850°C en presencia de oxígeno. Sin embargo, todavía puede producirse síntesis *de novo* cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación que se produce en los sistemas de reducción y en las áreas más frías del horno. Los sistemas de enfriamiento deberían operar adecuadamente a fin de disminuir el periodo de reformación (European Commission 2001, p. 133). El enfriamiento de los gases de combustión antes de su depuración ofrece la ventaja de que reduce su volumen, lo que permite disminuir el tamaño del equipo de reducción, de los ductos, así como las necesidades de energía para el movimiento de los gases.

4.2.4 Adsorción por carbón activado

El tratamiento con carbón activado debería considerarse ya que este material es un medio ideal para la adsorción de los PCDD/PCDF debido a su gran área superficial. Las técnicas de tratamiento de gases residuales emplean reactores de lecho fijo o móvil, o la inyección de carbono en la corriente de gases seguida de sistemas para eliminación de polvo de alta eficiencia como filtros de tela. Asimismo, pueden utilizarse mezclas cal/carbono.

4.2.5 Filtros con revestimiento catalítico

Algunos investigadores japoneses han utilizado filtros con revestimiento catalítico con carácter experimental, y los resultados son alentadores. Este sistema de filtración consiste en dos filtros, uno para recolectar el hollín, y otro revestido con un catalizador para descomponer dioxinas y furanos. El trabajo experimental ha demostrado que el catalizador es eficaz para descomponer dioxinas y furanos a temperaturas de 180°C a 200°C.

4.3 Mejores prácticas ambientales

Las siguientes directrices provienen de la Asociación japonesa de refinadoras de aleaciones de aluminio (marzo de 2004) y pueden considerarse mejores prácticas ambientales:

He aquí algunas orientaciones prácticas. Los siguientes aspectos pueden considerarse en todas estas directrices:

- No adquirir nada que pueda generar humo. Fundir los materiales gradualmente.
- Efectuar la fundición y combustión sin generación de hollín o vapores.
- Quemar completamente el hollín y los vapores generados enseguida.
- Enfriar rápidamente a 170°C o menos los gases de escape que están a temperaturas altas o medias.
- Controlar el CO en los gases de escape ($\text{CO} \leq 50$ ppm, gestión de la relación aire-combustible).

Directrices de operación:

1. Asuntos relacionados con los materiales y chatarra:

- Intensificar la clasificación antes y después de ingresados los materiales.
- Clasificar y eliminar las resinas y aceites.
- Clasificar y eliminar las sustancias y resinas foráneas después del proceso de trituración.
- Devolver los materiales con resinas o aceites pegados. No aceptarlos a precio de ganga.

2. Durante la combustión y fundición en la cámara:

- Evitar, en lo posible, encender y apagar el quemador para reducir la combustión incompleta y la generación de hollín.
- Introducir los materiales cuando el quemador esté encendido, e inflamar los vapores y hollín para una combustión secundaria.

3. Durante la combustión y fundición en crisol abierto:

- Ajustar la relación aire-combustible midiendo la concentración de CO y O₂ en las emisiones de gases de combustión.
- Calentar y quemar en la llama del quemador el humo y hollín derivados de los materiales depositados en el crisol abierto.
- Ajustar el suministro de materiales para fundición conforme a la generación de humo y llama (hollín):
 - Igualar el suministro de material combustible (en forma repetitiva y gradual).
 - Procurar que no haya combustión incompleta en el espacio de combustión.

- No permitir escapes de humo de la campana.
 - Mantenimiento regular del recolector de polvo (inspecciones periódicas y reemplazo de las mangas).
4. Durante el proceso de eliminación de magnesio:
- Dejar un intervalo de 5 a 10 minutos entre la extinción del quemador y el comienzo de la cloruración, y entre el término de ésta y el encendido del quemador, mientras se realiza la succión de aire (descarga de gas residual).
 - Mejorar la eficiencia aumentando la temperatura inicial del proceso de fundición.
 - Clasificar los materiales mezclados según la cantidad de Mg.
 - Normalizar las cantidades de cloro y fundente empleadas.
5. Durante el secado de virutas:
- Exigir mejoras en los residuos de corte que tienen exceso de aceite de corte (aceites de corte con alto contenido de cloro).
 - Recalentar a altas temperaturas, mantener los gases de escape del horno de secado, y enfriarlos rápidamente (es decir, tener un buen control de la temperatura).
 - Medir regularmente la concentración de CO en los gases de escape.
6. Durante la eliminación de pintura y la cocción de chatarra de lata (latas vacías):
- Eliminar las sustancias extrañas, como la resina y las bolsas de resina.
 - Mantener la estabilidad de la operación del horno de precalentamiento, con circulación y temperaturas de los gases de escape constantes.
7. Generalidades:
- Mantenimiento e inspección de la capacidad del recolector de polvo, reemplazo de mangas, ciclo de agitación, y presión de la succión.
 - Realizar periódicamente actividades internas de educación ambiental para los trabajadores de la fundición.
 - Fijar el objetivo para la concentración de dioxinas y furanos en los gases de escape ($<1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$) para plantas existentes.

5. Nuevas investigaciones

La oxidación catalítica es una nueva tecnología usada en incineradoras de desechos para eliminar las emisiones de PCDD/PCDF. Este proceso debería considerarse para la fundición secundaria de metales base ya que ha resultado efectiva en la destrucción de PCDD/PCDF en incineradoras de desechos. La oxidación catalítica, según la selección del catalizador, puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros

contaminantes de los gases de escape. Se requeriría un trabajo de validación antes de usar este proceso.

La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO₂) y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso para que la tasa de reacción suba hasta situarse entre 370°C y 450°C. Por su parte, la incineración típica se produce a 980°C. Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF en tiempos de residencia más cortos, con un menor consumo de energía y un >99% de eficiencia y, por lo tanto, debería ser considerada. El material particulado debería eliminarse de los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima. Este método es efectivo para los contaminantes en fase vapor. El ácido clorhídrico resultante es tratado en un depurador mientras que el agua y el CO₂ son liberados al aire después del enfriamiento (Parvesse 2001).

6. Resumen de medidas

La Tabla 1 y 2 presenta un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 1. Medidas para procesos recomendados para nuevos fundidores secundarios de aluminio**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Deberían considerarse diversos procesos de fundición recomendados en nuevas plantas.	Los procesos por considerar son: hornos de reverbero, hornos rotatorios y hornos rotatorios basculantes, hornos de inducción, y el horno de cubilote Meltower.	Todas las técnicas deben aplicarse junto con sistemas adecuados de recolección de gases y reducción.

■ **Tabla 2. Resumen de las medidas primarias y secundarias para fundidoras secundarias de aluminio**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Preclasificación del material de alimentación	Debería evitarse la presencia de aceites, plásticos y compuestos de cloro en el material de alimentación a fin de reducir la generación de PCDD/PCDF durante una combustión incompleta o por síntesis <i>de novo</i> .	<p>Procesos por considerar son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar o reducir el uso de sales cloradas, de ser posible. • Eliminar aceites, pinturas y plásticos de la chatarra durante el pretratamiento. • Utilizar técnicas térmicas para eliminar revestimientos, como la centrífuga o el secador de barros de amolado. 	<p>El material de alimentación debería clasificarse antes de la fundición para adaptarlo al tipo de horno y al sistema de reducción, y para permitir el traslado de los materiales que no sean compatibles a otras instalaciones donde puedan ser tratados.</p> <p>Los procesos térmicos para eliminar revestimientos y aceites deberían ir seguidos de una postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases de escape.</p>
Control efectivo del proceso	Deberían utilizarse sistemas para controlar el proceso con el propósito de mantener su estabilidad y operar a niveles paramétricos que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF.	Las emisiones de PCDD/PCDF pueden disminuirse con el control de otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y controles de regulación del sistema de captación de vapores después de establecer las condiciones óptimas de funcionamiento para reducir los PCDD/PCDF.	Se han hecho pruebas de muestreo continuo de emisiones de PCDD/PCDF en algunos sectores (ej., la incineración de desechos), pero en este campo las investigaciones siguen en curso.
Sustancias para eliminar el magnesio	Considerar detenidamente las opciones de sustancias y procesos de control para asegurar el tratamiento de los gases de escape.	El uso de hexacloroetano en la eliminación de magnesio puede generar altas liberaciones de PCDD/PCDF y HCB (no hay información sobre PCB) pero tiene ventajas importantes para el proceso.	

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas secundarias			
Recolección de vapores y gases	La recolección de vapores y gases debería efectuarse para el control de las emisiones derivadas de todas las etapas del proceso.	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Usar sistemas de alimentación y hornos sellados • Controlar las emisiones fugitivas manteniendo una presión de aire negativa dentro del horno para evitar fugas. • Usar campanas si no se dispone de una unidad sellada. • Horno o reactor encerrado. 	Cuando no es factible la extracción primaria ni la contención de vapores, el horno debería cerrarse para poder extraer, tratar y descargar el aire de ventilación.
Eliminación de polvos de alta eficiencia	El material particulado que se genera durante el proceso de fundición debe eliminarse ya que posee una gran área superficial en la que pueden adsorberse los PCDD/PCDF. Aislar y eliminar debidamente estos polvos contribuirá a controlar los PCDD/PCDF.	Procesos recomendados: <ul style="list-style-type: none"> • Filtros de tela, depuradores secos/húmedos y filtros de cerámica. • Revestimiento catalítico en los filtros de manga para destruir los PCDD/PCDF por oxidación y, al mismo tiempo, capturar el material particulado en el que se han adsorbido estos contaminantes. 	Las partículas capturadas deberían tratarse en hornos a alta temperatura para destruir los PCDD/PCDF y recuperar metales.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Postcombustión y enfriamiento rápido	Los postquemadores deberían funcionar a temperaturas >950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos, luego los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos 250°C.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Formación de PCDD/PCDF de 250°C a 500°C, y su destrucción a >850°C con O₂. • Necesidad de suficiente O₂ en el área superior del horno para una combustión completa. • Necesidad de un diseño adecuado de los sistemas de enfriamiento para disminuir el periodo de reformación. 	Todavía puede producirse síntesis <i>de novo</i> cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación.
Adsorción por carbón activado	El tratamiento con carbón activado debería considerarse ya que este material es un medio ideal para la adsorción de los PCDD/PCDF debido a su gran área superficial.	Procesos por considerar: <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento con carbón activado con reactores de lecho fijo o móvil. • Inyección de carbono en la corriente de gas seguida de métodos de desempolvamiento de alta eficiencia como los filtros de tela. 	También pueden utilizarse mezclas cal/carbono.

Nuevas investigaciones

Oxidación catalítica	La oxidación catalítica es una nueva tecnología que debería considerarse por su alta eficiencia y su bajo consumo de energía. La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO ₂) y ácido clorhídrico mediante un catalizador de metal precioso.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia del proceso para la fase gaseosa de los contaminantes. • Tratamiento con ácido clorhídrico con depuradores mientras que el agua y el CO₂ se liberan al aire después del enfriamiento. 	Se ha demostrado que reduce los PCDD/PCDF en tiempos de residencia más cortos, con un menor consumo de energía y 99% de eficiencia. Deberían desempolvarse los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima.
----------------------	---	---	--

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para la fundición secundaria de aluminio son $<0.5 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1994. *Secondary Aluminium Operations*. Background Report AP-42, Section 12.8. www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s08.pdf.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Government of Japan. 2005. *Technical Information on Measures for Dioxins Discharge Control at Secondary Aluminum Refineries*. Government of Japan, Ministry of Economy, Trade and Industry.

Hübner C., Boos R., Bohlmann J., Burtscher K. and Wiesenberger H. 2000. *State-of-the-Art Measures for Dioxin Reduction in Austria*. Vienna. www.ubavie.gv.at/publikationen/Mono/M116s.htm.

Japan Aluminium Alloy Refiners Association. 2004. *New Operation Guidelines to Suppress DXNs Emissions Exhaust Gas*.

Parvesse T. 2001. "Controlling Emissions from Halogenated Solvents." *Chemical Processing* 64(4):48–51.

Otras fuentes

Brodie D.J. and Schmidt H.W. 1999. "Custom-Designed Fluid Bed Calciner for Nabalco Pty Ltd." In: *Proceedings of 5th International Alumina Quality Workshop*, 21–26 March 1999, Bunbury, Australia.

Gunson A.J. and Jian Y. 2001. *Artisanal Mining in The People's Republic of China*. Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), International Institute for Environment and Development (IIED), September 2001.

Schmidt H.W. and Stockhausen W. 2002. "Latest Developments in Circulating Fluid Bed Calcination Based on Operating Experience of Large Calciners." In: *Proceedings of 6th International Alumina Quality Workshop*, 8–13 September 2002, Brisbane, Australia.

Schmidt H.W., Stockhausen W. and Silberberg A.N. 1996. "Alumina Calcination with the Advanced Circulating Fluid Bed Technology." In: *Light Metals* (ed. Hale W.) TMS, Pennsylvania, United States.

UNEP (United Nations Environment Programme). UNEP News Centre. www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=284&ArticleID=3204&l=en, as read on 20 January 2006.

Xinbin F., Guangle Q., Guanghui L., Ping L. and Shaofeng W. 2005. "Mercury Emissions from Artisanal Zinc and Mercury Smelting in Guizhou, PR China." *Goldschmidt Conference Abstracts 2005: The Geochemistry of Mercury* p. A705.

Xinbin F., Xianwu B., Guangle Q., Guanghui L. and Shunlin T. *Mercury Pollution in Guizhou, China: A Status Report*. pbc.eastwestcenter.org/abstracts2005/abstract2005fengxinbin.htm, as read on 29 December 2005.

(iv) Producción secundaria de zinc

■ Resumen

La fundición secundaria de zinc consiste en la producción de zinc a partir de materiales como los polvos provenientes de la producción de aleaciones de cobre y de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, y los residuos derivados de los procesos de fragmentación y galvanizado de la chatarra de acero.

Los procesos de producción son: preclasificación, limpieza de pretratamiento, y trituración del alimento, exudación en hornos a 364°C, fundición, refinación, destilación y aleación. Los contaminantes presentes en el alimento (incluidos aceites y plásticos), una combustión deficiente y temperaturas entre 250°C y 500°C pueden dar origen a las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Las mejores técnicas disponibles son: limpieza del alimento, conservación de temperaturas por encima de 850°C, captura de vapores y gases, cámaras de postcombustión con enfriamiento rápido, adsorción con carbón activado, y desempolvamiento con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundidoras secundarias de zinc son $<0.5 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

La fundición secundaria de zinc consiste en el procesamiento de chatarra de zinc procedente de varias fuentes. El material de alimentación contiene polvos de la producción de aleaciones de cobre y de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico (que pueden estar contaminados con las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo), residuos de la fragmentación de chatarra de acero, y chatarra de procesos de galvanizado. El método del proceso depende de la pureza, forma y grado de contaminación del zinc. La chatarra se procesa como polvo, óxido o planchas de zinc. Las tres fases generales de la producción son el pretratamiento, fundición y refinación (EPA 1981).

En el pretratamiento, la chatarra se clasifica según su contenido de zinc y necesidades de procesamiento, se limpia, tritura y clasifica por tamaños. Se utiliza un horno de exudación para calentar la chatarra a 364°C. A esta temperatura sólo se derrite el zinc, mientras que los otros metales permanecen en estado sólido. El zinc líquido se recolecta en el fondo del horno de exudación y se recupera. La chatarra restante se enfría, recupera y se vende a otros procesadores.

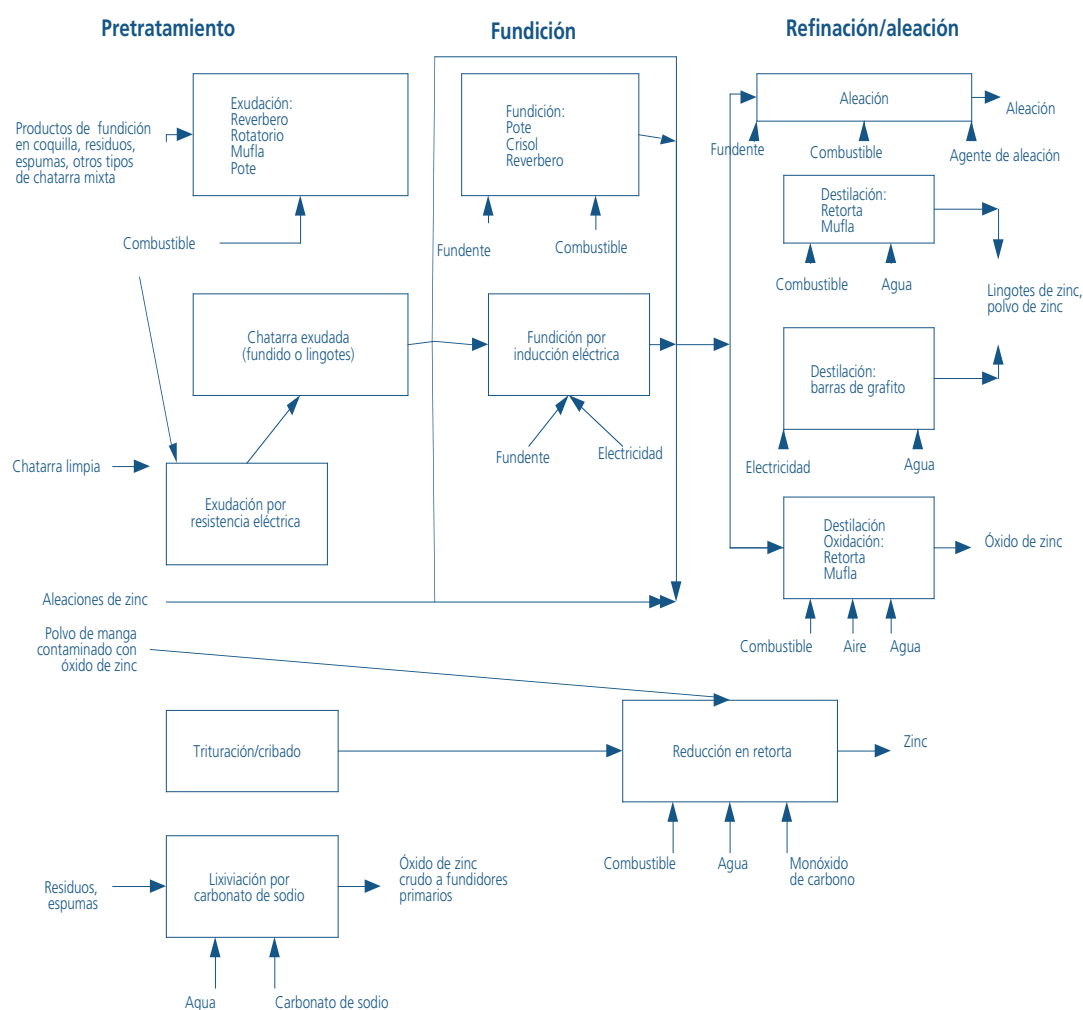
Como pretratamiento se utiliza lixiviado con una solución de carbonato de sodio para convertir la escoria y espumas en óxido de zinc, y luego reducirlo a metal de zinc. Los productos de óxido de zinc se refinan en fundidoras de zinc primario.

Los procesos de fundición emplean hornos de pote, crisol, reverbero, reducción e inducción eléctrica. Las impurezas se separan del zinc líquido mediante materiales fundentes. La agitación permite que los fundentes y las impurezas floten en la superficie como escoria, que se puede retirar con una espumadera. El zinc restante se vierte en moldes o se transfiere derretido para su refinación. Las aleaciones pueden producirse a partir de chatarra pretratada durante la exudación y fundición.

La refinación elimina más impurezas en la chatarra limpia de aleaciones de zinc y en el zinc vaporizado durante la fase de fundición en hornos de retorta. La destilación consiste en vaporizar el zinc a temperaturas de 982°C a 1,249°C en hornos de mufla o de retorta, y condensarlo como polvo de zinc o zinc líquido. Se pueden recuperar diversas formas según la temperatura, tiempo de recuperación, ausencia o presencia de oxígeno y equipos utilizados durante la condensación del vapor de zinc. La fundición en pote es una operación simple de fundición por calor indirecto en la que la aleación que finalmente se cuela en lingotes de aleaciones de zinc está determinada por el tipo de chatarra que ingresa. Es un proceso sin destilación.

Los productos finales de los procesos de refinación son lingotes, polvo, óxido y aleaciones de zinc. La Figura 1 presenta un diagrama del proceso de producción.

■ **Figura 1. Fundición secundaria de zinc**



Fuente: EPA 1981.

Las actividades de recuperación de metal artesanales y de pequeña escala pueden ser significativas a nivel internacional, en especial en países en desarrollo y países con economías en transición. Estas actividades pueden contribuir notablemente a la contaminación y afectar la salud. Por ejemplo, la fundición artesanal de zinc es una importante fuente de emisiones atmosféricas de mercurio. Las técnicas empleadas para fundir tanto el zinc como el mercurio son muy sencillas. Los minerales se calientan unas pocas horas en un horno, y se produce metal de zinc y mercurio líquido. En muchos casos no se emplea ningún dispositivo para controlar la contaminación durante el proceso de fundición. Otros metales que se producen en actividades de recuperación artesanales o de pequeña escala son antimonio, hierro, plomo, manganeso, estaño, tungsteno, oro, plata, cobre y aluminio.

Estos procesos no se consideran mejores técnicas disponibles ni mejores prácticas ambientales. No obstante, como mínimo, debería preverse una ventilación y manejo de materiales adecuados.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

La formación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo (los PCDD/PCDF son los más estudiados) pueden ser producto de la presencia de carbono y cloro en partes del proceso donde las temperaturas están en el rango de 250°C a 450°C. Cabe señalar que el uso de polvos de los hornos de arco eléctrico y de los procesos cupríferos también puede aportar altos niveles de contaminación al proceso.

2.1 Información general sobre emisiones de fundiciones de zinc secundario

Se pueden producir emisiones atmosféricas por la fundición secundaria de zinc en forma de emisiones fugitivas o de chimenea, según la antigüedad o la tecnología de la planta. Los contaminantes principales son el dióxido de azufre (SO₂), otros compuestos de azufre y nieblas ácidas, óxidos de nitrógeno (NO_x), metales (en especial, zinc) y sus componentes, polvos y PCDD/PCDF. El SO₂ se recolecta y convierte en ácido sulfúrico en plantas de ácidos al procesar material secundario con alto contenido de azufre. Las emisiones fugitivas de SO₂ pueden controlarse con una buena extracción y hornos bien sellados. Los NO_x pueden reducirse empleando quemadores con baja emisión de NO_x o de oxcombustible. El material particulado se recolecta con métodos de eliminación de polvo de alta eficiencia, como los filtros de tela, y luego se devuelve al proceso (European Commission 2001, p. 359–368).

2.2 Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Los PCDD/PCDF pueden formarse durante la fundición de metales como resultado del alimento contaminado (ej., polvo de horno de arco eléctrico), por una combustión incompleta, o por síntesis *de novo* producida por sustancias orgánicas inquemadas y los compuestos clorados presentes en las fases posteriores al enfriarse los gases.

“El procesamiento de chatarra impura, como la fracción no metálica procedente del fragmentador, implica probablemente la producción de diversos contaminantes, entre ellos los PCDD/PCDF. Para la recuperación de plomo y zinc se utilizan temperaturas relativamente bajas (340°C y 440°C). La fusión de zinc puede producirse con adición de fundentes que incluyan cloruros de zinc y de magnesio” (UNEP 2003, p. 78).

Las bajas temperaturas utilizadas en la fundición de zinc entran directamente en el rango de 250°C a 500°C, en el que se generan los PCDD/PCDF. La adición de fundentes clorados constituye una fuente de cloro. Pueden formarse contaminantes en la zona de combustión por combustión incompleta de compuestos orgánicos, y por síntesis *de novo* en la sección de enfriamiento del tratamiento de gases de escape. Los PCDD/PCDF se adsorben fácilmente en los materiales particulados como polvos, tortas de filtro y productos de la depuración, y pueden descargarse al medio ambiente a través de las emisiones atmosféricas, las aguas de desecho y la eliminación de residuos.

“Los PCDD/PCDF se destruyen a altas temperaturas (por encima de 850°C) en presencia de oxígeno; aun así, puede haber síntesis *de novo* al enfriarse los gases en la ‘ventana de reformación’, posibilidad que puede darse en los sistemas de reducción y en partes más frías del horno, ej., el área de alimentación. Un cuidadoso diseño de los sistemas de enfriamiento para disminuir el tiempo de residencia en la ventana permite prevenir la síntesis *de novo*” (European Commission 2001, p. 133).

Un informe preparado por el Gobierno de Japón analizó las tecnologías para reducción de dioxinas y sus efectos en las plantas de producción secundaria de zinc en Japón. Se introdujeron diversas tecnologías para los gases de escape junto con directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en cinco plantas existentes. Se determinó que las emisiones de dioxinas variaban según el tipo de horno utilizado. Las concentraciones en las descargas de dioxinas eran de 0.91 a 40 ng EQT-I/Nm³ antes de la introducción de las tecnologías para gases de escape, y de 0.32 a 11.7 ng EQT-I/Nm³ después. Con la introducción, en el horno de reducción de una planta, de un moderno sistema de filtros de manga en dos etapas e inyección de carbón activado en dos etapas, la concentración de dioxinas se redujo de 3.30 ng EQT-I/Nm³ a 0.49 ng EQT-I/Nm³ (Government of Japan 2005).

2.3 Liberaciones a otros medios

Se originan aguas residuales de los efluentes del proceso, del agua de enfriamiento y escorrentías, y se tratan con técnicas de tratamiento para aguas residuales. Los residuos del proceso se reciclan, se tratan con métodos en las etapas finales para recuperar otros metales, o se eliminan en condiciones de seguridad. El uso de la depuración húmeda puede generar efluentes contaminados así como residuos que requieren tratamiento, la captura de partículas en seco produce residuos sólidos que pueden estar contaminados. Estos residuos precisan una gestión adecuada para evitar liberaciones.

3. Procesos recomendados

Las variaciones en el material de alimentación y la calidad del producto deseada influyen en el diseño y configuración del proceso. Estos procesos deberían aplicarse con un buen control del proceso, y sistemas de recolección de gases y de reducción. Los procesos considerados mejores técnicas disponibles son: separación física, fundición y otras técnicas de tratamiento a alta temperatura seguidas de la eliminación de cloruros (European Commission 2001, p.396).

Para el procesamiento secundario de zinc se carece de información sobre procesos alternativos a la fundición.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se analizan las medidas primarias y secundarias para reducir y eliminar los PCDD/PCDF.

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas de prevención para reducir o eliminar la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. He aquí algunas:

4.1.1 Preclasificación del material de alimentación

El alimento contaminado, como polvos del horno de arco eléctrico y del procesamiento cuprífero, puede contener altos niveles de PCDD/PCDF y de otras sustancias que figuran en el Anexo C. Hay que asegurarse de que cualquier sustancia que se haya podido transferir al proceso sea efectivamente destruida o capturada y eliminada.

Se deberían separar del material de alimentación las impurezas, como aceites, pinturas y plásticos de la chatarra de zinc, para reducir la formación de PCDD/PCDF por combustión incompleta de compuestos orgánicos o síntesis *de novo*. No obstante, en muchos casos, el grueso del material orgánico en la carga proviene del combustible agregado. Los métodos para almacenar, manejar y pretratar el alimento depende de la distribución por tamaños, los contaminantes y el contenido de metales en el material.

Para eliminar plásticos pueden utilizarse molienda y trituración, junto con técnicas de separación neumática o por densidad. Pueden aplicarse procesos térmicos de eliminación de revestimientos y de aceites; estos procesos deberían ir seguidos de una postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases residuales (European Commission 2001, p. 232).

4.1.2 Control efectivo del proceso

Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere según parámetros que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF, por ejemplo, mantener la temperatura del horno por encima de 850°C a fin de destruir los PCDD/PCDF. Lo ideal sería monitorear constantemente las emisiones de PCDD/PCDF a fin de garantizar menos liberaciones. Para algunos sectores (ej., la

incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación a otras fuentes aún se está investigando. A falta de un monitoreo constante de PCDD/PCDF, otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y los reguladores de tiro para captación de vapores, deberían ser monitoreadas y mantenidas a fin de establecer las condiciones de funcionamiento óptimas para disminuir las emisiones de PCDD/PCDF.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas de control de la contaminación para contener y prevenir las emisiones. Estos métodos no evitan la formación de contaminantes. Puede usarse enfriamiento rápido para reducir o eliminar prácticamente la formación en la zona de enfriamiento, y constituye una medida primaria, aunque puede aplicarse en combinación con medidas secundarias.

4.2.1 Recolección de vapores y gases

Debería ponerse en práctica una recolección efectiva de vapores y gases de escape en todas las fases del proceso de fundición a fin de capturar las emisiones de PCDD/PCDF.

“Los sistemas para recolección de vapores utilizados pueden aprovechar los sistemas de sellado de hornos y diseñarse de forma que mantengan un [vacío] en el horno para evitar filtraciones y emisiones fugitivas. Pueden usarse sistemas que mantengan sellado el horno o sistemas de campana. Se puede ingresar el material por la campana, por medio de toberas o lanzas, y empleando válvulas rotativas robustas en los sistemas de alimentación. Un sistema de recolección de vapores [efectivo] que pueda extraer los vapores desde su origen, e independientemente de su duración, consumirá menos energía. Las mejores técnicas disponibles para los sistemas de tratamiento de gases y vapores son las que usan el enfriamiento y recuperación de calor, si es factible, antes del filtro de tela”. (European Commission 2001, p. 397).

4.2.2 Eliminación de polvos de alta eficiencia

Deberían eliminarse los polvos y los compuestos metálicos del proceso de fundición ya que este material particulado tiene una gran área superficial en la que los PCDD/PCDF pueden adsorberse fácilmente. Eliminar estos polvos contribuirá a reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Las técnicas que pueden considerarse son el uso de filtros de tela, depuradores secos y húmedos, y filtros de cerámica. El material particulado recolectado se suele reciclar en el horno.

Los filtros de tela hechos con materiales de alto rendimiento son la opción más efectiva. Algunas innovaciones para este método son los sistemas de detección de roturas de mangas, métodos de limpieza en curso de producción, y revestimientos catalíticos para destruir los PCDD/PCDF (European Commission 2001, p. 139–140).

4.2.3 Postcombustión y enfriamiento rápido

Los postquemadores (cámaras de postcombustión) deberían funcionar con una temperatura mínima de 950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos (Hübner *et al.* 2000). Después de esta etapa, los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos de 250°C. La inyección de oxígeno en la parte superior del horno favorecerá la combustión completa (European Commission 2001, p. 189).

Se ha observado que los PCDD/PCDF se forman en el rango de temperaturas de 250°C - 500°C, y se destruyen por encima de 850°C en presencia de oxígeno. Sin embargo, todavía puede producirse síntesis *de novo* cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación que se produce en los sistemas de reducción y en las áreas más frías del horno. Los sistemas de enfriamiento deberían operar adecuadamente a fin de disminuir el periodo de reformación (European Commission 2001, p. 133).

4.2.4 Adsorción por carbón activado

Se debería tomar en consideración el tratamiento con carbón activado para eliminar los PCDD/PCDF de los gases residuales de fundición. El carbón activado posee una gran área superficial en la que pueden adsorberse los PCDD/PCDF. Los gases residuales pueden tratarse con carbón activado en reactores de lecho fijo o móvil, o mediante la inyección de partículas de carbono a la corriente de gases, para luego eliminarlas como polvo de filtro empleando sistemas de eliminación de polvo de alta eficiencia como filtros de tela.

5. Nuevas investigaciones

La oxidación catalítica es una nueva tecnología usada en incineradoras de desechos para eliminar las emisiones de PCDD/PCDF. Este proceso debería considerarse para la fundición secundaria de metales base ya que ha resultado efectiva en la destrucción de PCDD/PCDF en incineradoras de desechos. La oxidación catalítica, según la selección del catalizador, puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros contaminantes de los gases de escape. Se requeriría un trabajo de validación antes de usar este proceso.

La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO₂) y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso para que la tasa de reacción suba hasta situarse entre 370°C y 450°C. Como referencia, la incineración típica se produce a 980°C. Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF con tiempos de residencia más cortos, menor consumo de energía y >99% de eficiencia y, por lo tanto, debería ser considerada. El material particulado debería eliminarse de los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima. Este método es efectivo para los contaminantes en fase vapor. El ácido clorhídrico resultante es tratado en un depurador mientras que el agua y el CO₂ son liberados al aire después del enfriamiento (Parvesse 2001).

6. Resumen de medidas

Las Tablas 1 y 2 presentan un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 1. Medidas para los procesos recomendados para nuevos fundidores secundarios de zinc**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Deberían considerarse diversos procesos de fundición recomendados para nuevas plantas.	<p>Procesos por considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Separación física, fundición y otras técnicas de tratamiento a altas temperaturas seguidas de la eliminación de cloruros. • Uso de hornos Waelz, tipo ciclón, o convertidor para aumentar la temperatura a fin de volatilizar los metales y luego formar los óxidos que se recuperarán de los gases en la etapa de filtración. 	<p>Estos procesos deberían aplicarse con un buen control de proceso, y sistemas de recolección de gases y de reducción.</p> <p>Los hornos Waelz pueden constituir una importante fuente de PCDD/PCDF (y de otras sustancias que figuran en el Anexo C), controlar su uso y funcionamiento es primordial para reducir las liberaciones totales.</p>

■ **Tabla 2. Resumen de las medidas primarias y secundarias para los fundidoras secundarias de zinc**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Preclasificación del material de alimentación	<p>Los polvos de los hornos de arco eléctrico y del procesamiento cuprífero que se emplean como materia prima de zinc pueden contener altos niveles de PCDD/PCDF (y de otras sustancias del Anexo C).</p> <p>Se deberían separar los aceites y plásticos de la chatarra de zinc del alimento del horno para reducir la formación de PCDD/PCDF por combustión incompleta o síntesis <i>de novo</i>.</p>	<p>Procesos por considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Molienda y trituración, junto con técnicas de separación neumática o por densidades, para la eliminación de plásticos. • Eliminación de aceites por medio de procesos térmicos de eliminación de revestimientos y aceites. 	<p>Los procesos térmicos para eliminación de revestimientos y de aceites deberían ser seguidos por una postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases de escape.</p>
Control efectivo del proceso	<p>Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere a niveles paramétricos que contribuyan a reducir la generación de PCDD/PCDF.</p>	<p>Las emisiones de PCDD/PCDF pueden reducirse con el control de otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y reguladores de flujo para captura de vapores, después de haber establecido las condiciones de funcionamiento óptimas para la reducción de PCDD/PCDF.</p>	<p>Para algunos sectores (ej., la incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación en este campo todavía requiere investigación.</p>

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas secundarias			
Recolección de vapores y gases	Debería ponerse en práctica una recolección efectiva de vapores y gases de escape en todas las fases del proceso de fundición a fin de capturar las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos por considerar: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de sellado de hornos para mantener un vacío adecuado en el horno y evitar filtraciones y emisiones fugitivas. • Uso de campanas. • Ingreso del material por la campana, por medio de toberas o lanzas, y empleando válvulas rotativas robustas en los sistemas de alimentación. 	Las mejores técnicas disponibles para los sistemas de tratamiento de gases y vapores son las que usan el enfriamiento y recuperación de calor, si es factible, antes del filtro de tela excepto cuando se llevan a cabo como parte de la producción de ácido sulfúrico.
Eliminación de polvo de alta eficiencia	Deberían eliminarse los polvos y los compuestos metálicos del proceso de fundición ya que este material tiene una gran área superficial en la que los PCDD/PCDF pueden adsorberse fácilmente. Eliminar estos polvos contribuiría a reducir las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos por considerar: <ul style="list-style-type: none"> • Uso de filtros de tela, depuradores secos y húmedos y filtros de cerámica. 	Los filtros de tela hechos con materiales de alto rendimiento son la opción más efectiva. El material particulado recolectado se debería reciclar en el horno.
Postcombustión y enfriamiento rápido	Los postquemadores deberían funcionar a temperaturas >950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos, después, los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos de 250°C.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Formación de PCDD/PCDF entre 250°C y 500°C, y su destrucción a >850°C con O₂. • Necesidad de suficiente O₂ en la parte superior del horno para obtener una combustión completa. • Necesidad de un diseño apropiado de los sistemas de enfriamiento para disminuir el periodo de reformación. 	Todavía puede producirse síntesis <i>de novo</i> cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Adsorción por carbón activado	Debería considerarse el tratamiento con carbón activado ya que este material es un medio ideal para la adsorción de PCDD/PCDF por su gran área superficial.	Procesos por considerar: <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento con carbón activado usando reactores de lecho fijo o móvil. • Inyección de partículas de carbono en la corriente de gas para luego eliminarlas como polvo de filtro. 	También pueden utilizarse mezclas de cal/carbón.

Nuevas investigaciones

Oxidación catalítica	La oxidación catalítica es una nueva tecnología que debería considerarse por su alta eficiencia y bajo consumo de energía. La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, CO ₂ y ácido clorhídrico usando un catalizador de metal precioso.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia del proceso para la fase gaseosa de los contaminantes. • Tratamiento de ácido clorhídrico con depuradores húmedos mientras que el agua y el CO₂ se liberan al aire después del enfriamiento. 	Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF en tiempo de residencia más cortos, con un menor consumo de energía y 99% de eficiencia. Los gases de escape deberían tratarse para eliminar las partículas antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima.
----------------------	---	--	---

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en materia de PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas para las fundidoras de zinc secundario son <0.5 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1981. *Secondary Zinc Processing*. Background Report AP-42, Section 12.14. epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s14.pdf.
- European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.
- Government of Japan. 2005. *Report on Dioxin Reduction Technologies and their Effects in Secondary Zinc Production Facilities of Japan*. Government of Japan, Ministry of Economy, Trade and Industry.
- Hübner C., Boos R., Bohlmann J., Burtscher K. and Wiesenberger H. 2000. *State-of-the-Art Measures for Dioxin Reduction in Austria*. Vienna. www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M116.pdf.
- Parvesse T. 2001. "Controlling Emissions from Halogenated Solvents." *Chemical Processing* 64(4):48–51.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2003.pdf.

Otras fuentes

- Gunson A.J. and Jian Y. 2001. *Artisanal Mining in The People's Republic of China*. Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), International Institute for Environment and Development (IIED), September 2001.
- UNEP (United Nations Environment Programme). UNEP News Centre. www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=284&ArticleID=3204&l=en, as read on 20 January 2006.
- Xinbin F., Guangle Q., Guanghui L., Ping L. and Shaofeng W. 2005. "Mercury Emissions from Artisanal Zinc and Mercury Smelting in Guizhou, PR China." *Goldschmidt Conference Abstracts 2005: The Geochemistry of Mercury* p. A705.
- Xinbin F., Xianwu B., Guangle Q., Guanghui L. and Shunlin T. *Mercury Pollution in Guizhou, China: A Status Report*. pbc.eastwestcenter.org/abstracts2005/abstract2005fengxinbin.htm, as read on 29 December 2005.

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

**Quema a cielo abierto de desechos,
incluida la quema en vertederos**



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.A

**Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C**

**Categoría de fuentes (a) de la Parte III:
Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema
en vertederos**

Í N D I C E

VI.A	Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos	9
1.	Orientación general	9
1.1	Peligros de la quema a cielo abierto para la salud pública	9
1.2	Situación de la quema a cielo abierto	10
1.3	Fundamentos científicos y consideraciones generales	11
2.	Quema intencional de biomasa	14
2.1	Residuos agrícolas o de cultivos y de desmonte	14
3.	Quema a cielo abierto de desechos de consumo mixtos	16
3.1	Desechos domésticos, quemas en rellenos sanitarios/vertederos, desechos industriales no peligrosos	16
3.2	Construcción, demolición y escombros derivados de desastres	21
4.	Quema a cielo abierto de materiales específicos, y materiales varios	23
4.1	Plástico agrícola	23
4.2	Neumáticos	25
4.3	Derrames de petróleo y antorchas de gas	26
	Referencias	27

Lista de ilustraciones

Figura 1.	Animales pastando cerca de una quema a cielo abierto	12
Figura 2.	Forma típica de eliminar desechos mixtos por quema a cielo abierto	13
Figura 3.	Clasificación centralizada de los desechos para su reutilización y reciclaje	18

VI.A Quema a cielo abierto de desechos, incluida la quema en vertederos

■ Resumen

La quema a cielo abierto es un proceso inaceptable en términos ambientales, que genera sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo y varios otros contaminantes, producto de combustión incompleta. De conformidad con el Anexo C, Parte V, sección A, inciso (f) del Convenio de Estocolmo, lo más recomendable es reducir la cantidad de material que se elimina por quema a cielo abierto, con el objetivo de erradicar definitivamente este método.

Otras técnicas que pueden significar avances con respecto a la quema de materiales son: evitar materiales no combustibles, como vidrio y metales en masa, desechos húmedos y materiales de baja combustibilidad, evitar cargas de desechos con alto contenido de cloro, sean cloruros inorgánicos como la sal, sean compuestos orgánicos clorados como el PVC, y evitar materiales que contengan metales catalíticos como cobre, hierro, cromo y aluminio, incluso en cantidades pequeñas. Los materiales por quemar deberían ser secos, homogéneos o bien mezclados, y de baja densidad, como los desechos sin compactar.

Con respecto al proceso de combustión, los objetivos deberían ser: suministrar el aire suficiente, mantener una combustión o tasa de pérdida de masa estable, evitar la combustión lenta, apagando incluso directamente el fuego, y sólo hacer fuegos pequeños, bien ventilados, revolviendo los materiales, en lugar de hacerlos en vertederos grandes, mal ventilados o en contenedores.

1. Orientación general

La quema a cielo abierto abarca gran variedad de prácticas de combustión de desechos incontroladas, como la quema en vertederos, fosas, terrenos planos o en bidones. En muchas partes del mundo la quema a cielo abierto es la forma más barata, fácil y limpia de reducir el volumen de materiales combustibles y eliminarlos, especialmente en poblaciones sin acceso un sistema organizado de manejo de desechos y que no tienen otra forma de deshacerse de estos materiales.

1.1 Peligros de la quema a cielo abierto para la salud pública

Los estudios actuales indican que la quema a cielo abierto constituye para la salud pública y el medio ambiente una amenaza más grave de lo que se creía. La combustión a baja temperatura y las condiciones de fuego lento habituales de la quema a cielo abierto promueven la formación de muchos elementos tóxicos y potencialmente nocivos, como las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Estos compuestos pueden formarse durante la quema a cielo abierto independientemente de la composición del material que se quema. Los residuos generados en fuentes de quema

a cielo abierto pueden recorrer grandes distancias y depositarse en el suelo, plantas y agua.

Las cenizas remanentes de las hogueras también contienen contaminantes, que pueden esparcirse en el suelo y agua. Los animales y peces ingieren los contaminantes y los acumulan en sus tejidos, mientras que las plantas los adsorben a través de la superficie foliar. Al consumir estos alimentos contaminados, los contaminantes se traspasan a los seres humanos. Además, el vapor y las partículas provenientes de las fuentes de quema a cielo abierto pueden ocasionar enfermedades respiratorias, en especial en niños, ancianos y personas con asma u otras afecciones respiratorias, y en quienes padecen enfermedad cardíaca o pulmonar crónica.

1.2 Situación de la quema a cielo abierto

Aunque estas directrices dan orientación para las prácticas de quema a cielo abierto, es indiscutible el daño ambiental derivado de esta práctica, por lo que no debería considerarse como autorización para continuar con esta práctica, que debería disminuir y ser abandonada cuanto antes y donde sea posible. Aún así, la quema a cielo abierto puede ser un último recurso cuando no haya alternativas de eliminación ni métodos de recuperación por falta de la infraestructura necesaria, y también por razón de salud pública, para controlar enfermedades o plagas, o en caso de desastre u otra emergencia (Great Lakes Binational Toxics Strategy 2004). No obstante, los desechos domésticos nunca deberían quemarse en interiores, con aparatos de combustión domésticos como estufas, chimeneas u hornos (véase la sección VI.C de estas directrices).

La quema a cielo abierto, incluida la quema en vertederos para reducir el volumen de los materiales, figura como una fuente involuntaria de contaminantes orgánicos persistentes en el Anexo C, Parte III del Convenio de Estocolmo. Sobre todo, el inciso (f) del Anexo C, Parte V, sección A se manifiesta el anhelo de "...poner fin a la incineración de desechos a cielo abierto y otras formas incontroladas de incineración, incluida la incineración de vertederos".

Aunque el Convenio de Estocolmo trata de los contaminantes orgánicos persistentes, como las dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB), como productos de combustión incompleta, la quema a cielo abierto es responsable de generar muchos más subproductos tóxicos, entre otros, hidrocarburos aromáticos policíclicos, material particulado, benceno y monóxido de carbono. Independientemente de su química específica, el vapor y los olores molestos siempre acompañan a la quema a cielo abierto; en el mejor de los casos son una molestia y, en el peor, un peligro sanitario. Eliminar los contaminantes orgánicos persistentes que figuran en el Convenio de Estocolmo no mejoraría las emisiones lo suficiente como para hacer de la quema a cielo abierto un medio preferido en términos ambientales para la eliminación de desechos. Es imperativo que el objetivo de la aplicación del Convenio de Estocolmo sea establecer alternativas para la quema a cielo abierto en lugar de limitarse a tratar de mejorar una mala práctica. Esta orientación no debería interpretarse como aceptación o justificación.

Deberían promoverse los esfuerzos para reducir la quema a cielo abierto, y estos esfuerzos deberían concentrarse en obtener el apoyo de gobiernos, sector privado y

sociedad civil para opciones de reemplazo para la gestión de desechos y aparatos fuera de uso. Los organismos gubernamentales a cargo de las políticas de salud pública y educación deberían comprometerse tan a fondo como los responsables de la política de desechos. Las Directrices Técnicas del Convenio de Basilea ofrecen orientación básica sobre alternativas para la quema a cielo abierto y formas de ponerlas en práctica (Basel Convention Secretariat 1994).

En cada país se debería trabajar con diligencia para establecer y aplicar prácticas de gestión saludables de desechos, promoviendo la reducción del uso de recursos, la reutilización y reciclado, compostaje, y rellenos sanitarios e incineradores modernos que apliquen mejores técnicas disponibles. Los esfuerzos de aplicación del Convenio y su mecanismo financiero podrían ir en apoyo al establecimiento de sistemas modelo para la gestión de desechos como alternativas a la quema a cielo abierto. Asimismo, los programas y materiales educativos diseñados para instruir a sus destinatarios (ej., ciudadanía, manipuladores de desechos) sobre los peligros para la salud de los seres humanos y el medio ambiente ocasionados por la quema a cielo abierto deberían considerarse como parte de un esfuerzo integral para una disminución continua (Canadian Centre for Pollution Prevention 2006; EPA 2006).

Muchos países han establecido normativas y prohibiciones sobre diversas prácticas de quema a cielo abierto (Government of New Zealand 2006). Varias de ellas contienen orientación específica sobre las categorías mencionadas en esta sección, como los neumáticos y el aceite residual. La aplicación efectiva de estas disposiciones depende de que la población pueda acceder a opciones aceptables de recolección y eliminación de desechos.

En esta sección se analizan varias prácticas específicas de quema a cielo abierto en categorías genéricas, ya que, habitualmente, los medios para reducir las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes son similares en cada categoría (Lemieux, Lutes and Santoianni 2004). No se consideran los incendios accidentales y la incineración intencional de materiales no combustibles, sin embargo, también pueden constituir fuentes de contaminantes orgánicos persistentes. Se insta a las Partes en el Convenio a tomar medidas para reducir la combustión accidental de biomasa de cualquier tipo, así como los incendios accidentales en viviendas, vehículos y lugares de trabajo. Puede que las Partes deseen considerar la aplicación de restricciones al uso de fuegos artificiales u otras prácticas recreativas de combustión al aire libre.

1.3 Fundamentos científicos y consideraciones generales

La composición de los desechos varía según la fuente. Los desechos domésticos pueden contener más material orgánico; los desechos industriales pueden contener más metales y, quizás, sustancias orgánicas. Algunos de los desechos mismos, incluso los domésticos, como ropa o cuero, pueden contener contaminantes orgánicos persistentes (UNEP 2003). Las secciones III.C (i) y (ii) de estas directrices describen los mecanismos de formación de contaminantes orgánicos persistentes y su relación con los materiales que pueden encontrarse en los desechos. La subsección 1.3.1 *infra* presenta orientación general sobre materiales y procesos, los subsecciones 2–4 presentan más información sobre la composición del material de distintos tipos de desechos.

La composición de los desechos también varía con el tiempo, y de un país a otro. El hecho poder contar con datos precisos de la composición de los desechos de cada país facilitará su gestión global, multiplicará la cantidad de materiales disponibles para reciclaje o reutilización, y reducirá la cantidad que se quema a cielo abierto.

■ **Figura 1. Animales pastando cerca de una quema a cielo abierto**



> *Los animales pueden verse afectados por la quema a cielo abierto y pueden ingerir sustancias peligrosas. Foto: Kenya POPs Office.*

Hay pocos datos sobre la generación de contaminantes orgánicos persistentes en la incineración no controlada de desechos. La mayor parte de los estudios se han realizado sobre la quema en tambores, pero son pocos los datos sobre combustión en vertederos, quema a cielo abierto en fosas o incineración de desechos en suelos, si es que los hay.

El *Instrumental normalizado para la identificación y cuantificación de liberaciones de dioxinas y furanos* del PNUMA (UNEP 2003) constituye una base firme para calcular las emisiones de dioxinas y furanos. Varias partes que han completado sus inventarios de dioxinas y furanos usando el Instrumental han descubierto que la quema a cielo abierto de desechos es una de las cuatro fuentes principales de dioxinas y furanos.

1.3.1 Proceso de combustión

A corto plazo, si no hay medios realistas para erradicar toda quema a cielo abierto, lo más recomendable es reducir la cantidad de material que se elimine con este método, ciñéndose al Convenio y a su objetivo de eliminación.

Otras técnicas que pueden significar un avance son las siguientes (Gullett 2003):

Con respecto a los materiales quemados:

- Evitar materiales no combustibles, como vidrio y metales en masa, desechos húmedos y materiales de baja combustibilidad.
- Evitar cargas de desechos con alto contenido de cloro y/o bromo, sea materiales inorgánicos como la sal, u orgánicos halogenados como el PVC (Lemieux *et al.* 2003).¹

- Evitar materiales que contengan metales catalíticos como cobre, hierro, cromo y aluminio, incluso en cantidades pequeñas.
- Los materiales por quemar deberían ser secos, homogéneos o bien mezclados, y de baja densidad (por ejemplo, desechos sin compactar).

Con respecto al proceso de combustión:

- Suministrar aire suficiente.
- Mantener una combustión o tasa de pérdida de masa estable.
- Evitar la combustión lenta, apagando incluso directamente el fuego. La combustión lenta es la fase de la combustión asociada a la mayor producción de contaminantes orgánicos persistentes (Lemieux *et al.* 2003).
- Limitar los métodos de combustión a fuegos pequeños, bien ventilados, revolviendo los materiales, en lugar de hacerlo en vertederos o contenedores grandes con mala ventilación.

■ **Figura 2. Forma típica de eliminar desechos mixtos por quema a cielo abierto**



Deberían retirarse los objetos potencialmente explosivos (ej., envases de aerosoles, envases con líquidos inflamables) y los materiales peligrosos, especialmente los que deberían destruirse mediante las mejores técnicas disponibles descritas en otras secciones de estas directrices (véase la sección V.A (i), subsección 2.2 de estas directrices).

1.3.2 Manipulación después de la quema

Antes de que se pueda manipular o recubrir el desecho quemado, debe extinguirse completamente. De no hacerse así se pueden incendiar grandes extensiones o se puede favorecer una combustión lenta permanente. Las cenizas de la quema de desechos

mixtos deberían mantenerse lejos de las áreas de forraje, y verse en rellenos sanitarios en vez de ser esparcidas en el suelo.

1.3.3 Consideraciones de salud y seguridad

Además de las orientaciones mencionadas, se deberían tomar medidas para disminuir las rutas de exposición a dioxinas y furanos. Como es sabido, la exposición humana se produce mayormente por la cadena alimenticia. Por lo tanto, los sitios de quema necesarios deberían situarse lejos de la producción de vegetales y cría de animales para consumo. Asimismo, constituye una buena práctica emplazar los sitios de combustión lejos de la población o, cuando menos, a sotavento de zonas habitacionales.

Además de aislar a la población de los olores, molestias y la posible exposición a sustancias tóxicas de la quema a cielo abierto, en todos los casos, sea en vertederos sanitarios o en instalaciones retiradas, el personal encargado de la quema debe colocarse a barlovento de los desechos en combustión, y no tener contacto con ellos. En lo posible, es conveniente el uso de vestimenta protectora como guantes, botas y trajes de protección, junto con máscaras para humo y anteojos.

1.3.4 Tecnologías y prácticas de combustión intermedia

Para quemar basura también se venden aparatos de combustión, conocidos como "incineradores". En algunos casos estos dispositivos no son sino tambores o depósitos de acero que contienen los desechos pero no constituyen una mejor técnica disponible para incineración. A efectos de estas directrices, la quema a cielo abierto abarca cualquier forma de combustión para la eliminación de desechos, sea en montones de límites indefinidos, sea en tambores o fogones de metal, que no cumpla con los criterios para incineración (usando mejores técnicas disponibles) de desechos urbanos, médicos o peligrosos, según los defina cada Parte.

La utilidad de estos aparatos de combustión intermedia se encuentra limitada por la falta de datos sobre la generación de contaminantes orgánicos persistentes. Se recomienda encarecidamente que los fabricantes de estos aparatos entreguen estos datos, especificando los desechos para los que están destinados.

2. Quema intencional de biomasa

2.1 Residuos agrícolas o de cultivos y de desmonte

2.1.1 Composición del material

Por lo general, este material se compone de biomasa: madera, hierba y demás vegetación. Dependiendo del lugar, puede contener sisal, cáscara de café, corontas y tallos de maíz, caña de azúcar o cascarilla de arroz. Puede estar compuesto por plantas vivas, árboles caídos o material vegetal que ha sido cortado y secado. La quema intencional no constituye una forma de combustión bien controlada aunque estén bien definidos los límites geográficos del material que se va a quemar.

Habrán variaciones en el contenido de agua de los materiales de biomasa (entre material vivo y cosechado, estación húmeda y seca, con mucha o poca humedad), en la densidad del combustible (masa por hectárea y grado de compactación u otra medición), y en las especies. Hay variaciones naturales en cuanto al contenido de cloro, y pueden haber sido tratados con productos químicos (plaguicidas o fertilizantes clorados), con metales capaces de catalizar la formación de contaminantes orgánicos persistentes (cobre, como por ejemplo, la madera tratada con arseniato de cromo y de cobre), o inhibidores (azufre, materiales que contienen nitrógeno), todos los cuales pueden afectar la generación de contaminantes orgánicos persistentes, en especial dioxinas y furanos, durante una combustión no controlada (véase la subsección 1.3 sobre consideraciones generales del proceso). Se han publicado algunos estudios sobre la quema de biomasa a gran escala (Lobert *et al.* 1999; Nussbaumer and Hasler 1998; Gullett and Touati 2003; Gullett and Touati 2002).

2.1.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminar obstáculos

Los gobiernos pueden permitir quemas por prescripción sea por supuesto beneficio económico (reducción de costos), supuestas ventajas para la agricultura (uso de cenizas como aditivo para suelos), prevención de riesgos (ej., disminución de los incendios de matorrales en Australia), control de termitas, reptiles u otras plagas, sea por conveniencia o con fines recreativos. En cada uno de estos casos, los gobiernos tienen la facultad de retirar los permisos para estas quemas e instruir al público sobre los riesgos de la quema a cielo abierto para la salud, en especial si se realiza a gran escala. En algunos casos, como en el control de termitas, la quema a cielo abierto de biomasa puede ser el método menos perjudicial para el medio ambiente. Una problemática omnipresente puede ser el costo y la disponibilidad de medios alternativos de eliminación o gestión ambiental.

2.1.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar desechos

De ser posible, la cosecha mecanizada, en conjunto con usos alternativos y no destructivos de los materiales cosechados, puede reducir la necesidad de una quema generalizada. En zonas ganaderas, las cosechas se pueden almacenar en silos. Se hace heno de la hierba seca, y otros desechos de la cosecha pueden procesarse para obtener forraje, fermentarse, dejarse descomponer *in situ* o compostarse; si es de calidad suficiente, la madera puede usarse en la industria maderera, los desechos de huerta pueden compostarse y usarse para mejorar los suelos; hay biomasa no tradicional que puede usarse como materia prima para papel. En la mayoría de los casos, estas alternativas también requieren mercados e infraestructura para ser económicamente viables.

Pueden obtenerse resultados benéficos si se compostan los residuos de agrícolas, en especial en zonas de suelos pobres. Deberían aplicarse técnicas de reemplazo de quemas, como lo explica la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático, cuando sea pertinente para la región y los cultivos (ASEAN Secretariat 2003). La reducción y

eliminación de contaminantes orgánicos persistentes provenientes de la quema a cielo abierto puede significar una oportunidad de reformar prácticas agrícolas.

2.1.4 Alternativas, obstáculos para su aplicación, e instrumentos de política para eliminarlos

Las alternativas varían en cada situación. Los obstáculos son la falta de educación, falta de voluntad gubernamental para reducir la dependencia de las quemas a cielo abierto en la consecución de sus objetivos, y falta de maquinaria o procedimientos alternativos en lugares donde la quema a cielo abierto es una parte integral de la agricultura local. A veces el alto costo de cualquiera de las alternativas puede ser un obstáculo y, como sucede con cualquier reforma, es posible que resulte necesarios o convenientes instrumentos económicos para inducir los cambios. Los proyectos de demostración y las investigaciones regionales pueden ayudar a comprender la viabilidad de las alternativas.

2.1.5 Técnicas de combustión y sus características, y medios de perfeccionamiento

Cuando las políticas gubernamentales permitan la quema a cielo abierto de biomasa, deberían ponerse en práctica las mejoras en el proceso sugeridas en la orientación general. Planificar cuidadosamente las quemas prescritas en función de las condiciones climáticas permitirá un mayor control; debería evitarse la exposición potencial de las poblaciones ubicadas en la misma dirección del viento que los contaminantes atmosféricos. Después de las quemas, la gestión de los residuos puede resultar un problema.

Debería disminuirse la aplicación de sustancias químicas en la agricultura y silvicultura, de conformidad con las necesidades locales y con los principios de una buena gestión. Cuando los materiales cosechados puedan retirarse de forma mecánica y tengan usos alternativos, pueden evitarse las quemas ocasionales; sin embargo, en ciertas circunstancias locales las pequeñas quemas prescritas podrían incluirse en un plan general de gestión de suelos, si sirven para prevenir incendios involuntarios que sean más devastadores y que generen emisiones mayores de contaminantes orgánicos persistentes. Reconociendo que puede perderse el control de las quemas prescritas, los procedimientos para extinción de incendios (entrenamiento, equipos, planificación), la infraestructura (accesos, caminos), y la planificación de la gestión serán medidas de apoyo secundarias y pertinentes.

3. Quema a cielo abierto de desechos de consumo mixtos

3.1 Desechos domésticos, quemas en rellenos sanitarios/vertederos, desechos industriales no peligrosos

3.1.1 Composición de material

Los desechos domésticos y la composición de los rellenos sanitarios y vertederos pueden ser muy similares en términos cualitativos. Difieren sobre todo por la existencia de

programas (como de reciclado, rescate de reciclables, compostaje u otra forma de segregación) que eliminan flujos específicos de desechos entre el punto de recolección y el depósito. Los desechos no peligrosos pueden provenir de establecimientos comerciales como tiendas, restaurantes y pequeñas industrias. Es posible que difieran por la fuente comercial de que se derivan, pero pueden contener muchos materiales que también se encuentran en desechos domésticos.

La quema a cielo abierto de desechos ha sido materia de muchos estudios (Lemieux *et al.* 2003). No obstante, parece haber muy pocos datos sobre las quemas en vertederos y contaminantes orgánicos persistentes (Lemieux, Lutes and Santoianni 2004). Los estudios de la composición de desechos muestran variaciones en los desechos de un país a otro y, en particular, entre países desarrollados y países en desarrollo. En países en desarrollo, hasta el 50% de la composición de los desechos puede ser material putrescible, como desechos de cocina. En países desarrollados pueden encontrarse más envoltorios y artículos electrónicos, a menos que hayan sido retirados por otros sistemas de fin de vida útil. Asimismo, puede haber diferencias importantes entre los desechos urbanos y rurales, y entre los desechos provenientes de diferentes regiones, independientemente de su desarrollo. En general, los flujos de desechos domésticos y los desechos de rellenos sanitarios se componen de papel, plástico, materia orgánica como restos de alimentos, vidrio, metal, madera, cuero, y otros materiales diversos. En condiciones poco controladas, los desechos domésticos peligrosos como productos de limpieza, pinturas y solventes pueden terminar en rellenos sanitarios o vertederos para desechos no peligrosos.

Además, una gestión negativa alterará la composición y el desempeño de un relleno sanitario o vertedero. En un relleno sanitario moderno, compartimentado, cada día se cubren los desechos con una capa de tierra o arcilla a fin de reducir no sólo el contenido de humedad del relleno sino también la probabilidad de ignición espontánea. En cambio, un vertedero tradicional rara vez está bien organizado y es más probable que se incendie espontáneamente.

Todos los sitios para eliminación de desechos generarán gas combustible (ej., metano) por la digestión anaeróbica de los materiales orgánicos contenidos. A menos que se controle, este gas constituye un combustible muy inflamable, que puede encenderse sea espontáneamente o por un acto ilícito. Además es un potente gas de invernadero. Se han diseñado y puesto en funcionamiento sistemas de recolección de metano como parte de la tecnología moderna para rellenos sanitarios, por seguridad y con vistas a recuperar su potencial energético.

3.1.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminarlos

3.1.2.1 Desechos domésticos

Los desechos domésticos se quemarán a cielo abierto cuando el costo, la conveniencia o las costumbres locales y la aceptabilidad social hacen que sea una opción atractiva para la gente o grupos de ciudadanos. Cuando la población vive lejos de un régimen municipal, no cabe duda que las opciones para eliminación de desechos serán

improvisadas. Pero si no existen los sistemas adecuados, incluso dentro de un régimen municipal pueden darse opciones de ese tipo.

Para poder eliminar la quema a cielo abierto deben existir alternativas razonables, y se debe informar a la población sobre su existencia, así como sobre las consecuencias de la quema a cielo abierto.

■ **Figura 3. Clasificación centralizada de los desechos para su reutilización y reciclaje**



La recolección en la fuente o centralizada, el reciclaje, transporte u otros medios de eliminación deben ser asequibles, prácticos y efectivos. Los rellenos sanitarios deben diseñarse y operarse según criterios modernos (Hickman and Eldredge 2004). Si se piensa usar la combustión, se recomienda encarecidamente la incineración con recuperación de energía, aplicando mejores técnicas disponibles.

Los gobiernos deben asumir la responsabilidad de crear sistemas de recuperación y eliminación de desechos como servicio público. Por consiguiente, los países y gobiernos municipales deben tener la voluntad de proscribir la quema de desechos y asumir la responsabilidad de ejecutar la legislación correspondiente. Además, cuando los rellenos sanitarios modernos sean una opción, los planes de gestión y las normativas para desechos deben contener disposiciones para establecer nuevos rellenos sanitarios a fin de mantener la capacidad de eliminación.

El simple hecho de asumir la responsabilidad de proporcionar sistemas de gestión de desechos no significa por sí solo el fin de la quema a cielo abierto. Los desechos pueden recolectarse y depositarse en rellenos sanitarios o vertederos, donde se pueden producir quemas a cielo abierto. Deben establecerse y aplicarse políticas y prácticas para estos servicios centralizados. La ignición y combustión espontáneas pueden reducirse mediante la captación de los gases de vertedero, o mediante normativas que exijan

técnicas modernas para la construcción de rellenos sanitarios así como la clausura definitiva de vertederos obsoletos.

3.1.2.2 Combustión antropogénica accidental

Puede reducirse la combustión antropogénica accidental en vertederos prohibiendo el acceso a rellenos sanitarios y vertederos, regulándolo por medio de licencias o limitándolo,. En muchos casos, los fuegos son ocasionados por los propios segregadores que viven y trabajan en estas áreas. Accidental o intencionalmente se pueden incendiar materiales desechados o gases de vertedero. Las autoridades deben asumir su responsabilidad y establecer reglamentos para regular las actividades de segregación, proporcionando condiciones de seguridad para los trabajadores, limitando el acceso a los rellenos sanitarios y la instalación irrestricta de viviendas en los mismos.

3.1.2.3 Combustión antropogénica intencional

La combustión antropogénica intencional, es decir, la quema del contenido de un vertedero para reducir su volumen, debe ser prohibida por la autoridad. A fin de evitar la necesidad de las quemas en vertederos, debe planificarse detenidamente el tamaño, espacio, ubicación y gestión del relleno sanitario, así como los programas de reducción y eliminación de desechos.

La gestión de desechos es un sistema. Cuando el sistema trabaja para hacer de la eliminación final de los desechos netos una responsabilidad colectiva en lugar de una responsabilidad individual, los costos económicos directos puede que sean mayores, pero en general, disminuirán los costos y efectos ambientales.

3.1.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar desechos

3.1.3.1 Reducción en la fuente

Un análisis cuidadoso de la composición de los desechos locales puede dar lugar a programas especializados para reducir flujos de gran volumen. Por ejemplo, en ciertos casos, comprar productos a granel puede reducir la necesidad de envolturas individuales. Ésta y otras estrategias se pueden modular según la densidad de la población.

3.1.3.2 Compostaje

Cuando hay biodegradación de importantes fracciones de desechos domésticos, y la densidad poblacional lo permita, los municipios deberían instruir a la población sobre métodos de compostaje económico en espacios reducidos. Esta estrategia implica también la derivación de desechos orgánicos para elaborar piensos o para otros usos productivos similares, y debe modularse en función del riesgo de transmisión de enfermedades. La instrucción debe abarcar el control de parásitos y vectores de enfermedades. Algunos desechos orgánicos pueden contener contaminantes orgánicos persistentes o materiales que podrían transformarse en contaminantes orgánicos persistentes en condiciones de compostaje, y deberían tratarse por separado para

garantizar una composta de alta calidad con bajo contenido de estos contaminantes (EPA 2005). En algunos casos, el compostaje puede mejorarse sustituyendo ciertos materiales biodegradables por componentes alternativos.

3.1.3.3 Reutilización

Cuando se puedan recuperar, lavar, reparar o rescatar piezas o artefactos completos para usarse como artículos manufacturados, habrá menos necesidad de eliminación. En muchos casos, esta recuperación y creación de valor implica el uso de mano de obra, lo que puede resultar más rentable y benéfico desde el punto de vista económico que la compra de aparatos nuevos.

3.1.3.4 Reciclaje

Muchos flujos de desechos contienen elementos valiosos y recuperables. Los metales, vidrio, papel seco y limpio, cartón corrugado, tela, plástico y madera constituyen flujos reciclables. Según la situación, la recolección centralizada y la infraestructura del reciclaje pueden ser rentables. En otros casos, el simple hecho de proporcionar un área de procesamiento intermedio segura en un sitio de eliminación y de fomentar el desarrollo de mercados para materiales reciclados puede facilitar a los trabajadores de los vertederos la tarea de recuperación. De esta manera, se pueden fomentar la creación de empleos, la conservación de los recursos y las estrategias de reducción de la pobreza.

3.1.3.5 Incineración

En algunas circunstancias, la incineración con uso de mejores técnicas disponibles, especialmente con recuperación de energía, puede coexistir con la quema a cielo abierto. En estos casos, es preferible la incineración a la quema a cielo abierto, pero puede no ser la única alternativa. Las autoridades deben procurar comprender los obstáculos que se opongan a eliminar la quema a cielo abierto en favor de formas de eliminación menos problemáticas para el medio ambiente, como la reducción en la fuente, reutilización, reciclaje e incineración con mejores prácticas disponibles. La recolección y los costos pueden ser uno de esos obstáculos; sin embargo, la incineración con mejores técnicas disponibles, cuando se combina con recuperación energética, puede aminorar ese costo y aportar significantes ventajas energéticas.

3.1.3.6 Rellenos sanitarios modernos

Dadas las diferencias entre los modernos rellenos sanitarios diseñados técnicamente y los vertederos no organizados, en lugar de la quema a cielo abierto es preferible la construcción de rellenos sanitarios modernos con recolección de gases y lixiviados, y que exista la posibilidad de reciclar y reutilizar. Como se señaló anteriormente, las autoridades deberán reconocer que tienen que proporcionar educación y alternativas rentables para poder erradicar la quema a cielo abierto.

Los rellenos modernos se distinguen en muchas formas de los vertederos. Por ser construcciones diseñadas técnicamente, son más seguros, más higiénicos y menos propensos a combustión antropogénica. También requieren la aplicación activa de medidas administrativas y seguridad para excluir a personas no autorizadas (ej.,

segregadores) y pueden ser relativamente más costosos que la quema a cielo abierto o los vertederos de bajo nivel tecnológico.

Las políticas que prohíben la eliminación de desechos industriales peligrosos e infecciosos en los flujos normales de desechos comunes mejorarán la seguridad de los sistemas de eliminación municipales. Los gobiernos pueden fomentar el uso efectivo de los métodos alternativos ya nombrados estableciendo restricciones legales a la quema a cielo abierto, prescribiendo el compostaje, reciclaje o recuperación, imponiendo gravámenes al exceso de desechos enviados a los sistemas de eliminación, o creando sistemas de gestión de recursos de menor costo y más provechosos.

3.1.4 Alternativas, obstáculos para la aplicación e instrumentos de política para eliminarlos

Las estrategias para reducir los desechos y las alternativas existentes a la quema a cielo abierto son, en general, las mismas.

3.1.5 Técnicas de combustión y sus características, y medios de perfeccionamiento

Cuando ninguna de las alternativas antes mencionadas sea viable o cuando no puedan aplicarse oportunamente, tal vez los gobiernos puedan instruir a la población sobre formas de reducir los efectos de la quema a cielo abierto. Estas mejoras del proceso se han explicado en la orientación general.

3.2 Construcción, demolición y escombros derivados de desastres

3.2.1 Composición del material

3.2.1.1 Desechos de construcción

Los desechos de construcción consisten en los materiales de construcción habituales y, posiblemente, los envoltorios de los materiales llevados al sitio (ej., bandejas de carga y sacos). Los materiales de construcción de edificios varían según tamaño, tipo y ubicación geográfica. Los tipos de edificios, sean comerciales, de oficinas o vivienda, varían mucho de países desarrollados a países en desarrollo, y entre regiones. Los materiales de construcción combustibles habituales son de madera, papel y otros materiales celulósicos, asfalto, pinturas y plásticos diversos. No es desconocida la contaminación de combustibles producida por metales.

3.2.1.2 Desechos de demolición

Los desechos de demolición, en particular los escombros post desastre, contendrán pertenencias de los ocupantes de los edificios. Esos materiales también varían según el tipo de edificio, la geografía y el desarrollo de la economía. Los restos parcialmente calcinados de un incendio en instalaciones industriales también pueden considerarse escombros post desastre o desechos peligrosos.

En el caso de demoliciones de viviendas, los desechos serán similares a los desechos domésticos, sobre todo en países en desarrollo; en países desarrollados habrá una mayor proporción de textiles (ropa), espumas (muebles), plásticos rígidos (electrodomésticos) y fibras (alfombras).

El contenido de los edificios comerciales será representativo de la empresa en cuestión, con muebles y fibras, al igual que en las viviendas, además de artículos electrónicos y cantidades de papel (oficinas) o existencias de productos para venta.

3.2.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminarlos

Los desechos derivados de la construcción o demolición se queman intencionalmente por razones de costo y conveniencia en el lugar de la obra. Esta práctica se efectúa por necesidades sanitarias, por el costo de eliminación, porque resulte poco práctico enterrarlos en el lugar, o por falta de alternativas. Aunque es una práctica inadecuada y debería siempre evitarse, salvo en circunstancias extremas, por razones de salud pública, la quema intencional de escombros post desastre se debe sin duda a la falta de opciones, al deseo de no saturar los rellenos sanitarios, o de despejar rápidamente las zonas afectadas por terremotos (Nakao *et al.* 1997). Se trata de una cuestión de costo, sea expresado como costo directo o como el costo de crear o utilizar otros medios de eliminación.

3.2.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar los desechos

Los desechos de la construcción que estén limpios y sin contaminación pueden recolectarse y clasificarse, y los materiales utilizables pueden ser derivados a otra construcción, triturarse para elaborar colchón vegetal y material de reciclaje. Con la demolición, cuando se efectúa por desmantelamiento, se pueden obtener muchas piezas útiles para reventa o reutilización. Los materiales provenientes de demolición que no se pueden reutilizar o reprocesar, pueden separarse y eliminarse, al igual que los desechos de construcción.

Aunque en teoría las estrategias usadas para tratar los desechos de construcción y demolición también pueden usarse para escombros post desastre, la diferencia en escala puede ser enorme. Después de un desastre quizás no haya más opción que trasladar el material a un relleno sanitario, donde será naturalmente segregado o recuperado. El relleno sin segregación o incineración con mejores técnicas disponibles puede ser la mejor alternativa en una emergencia, según las circunstancias particulares.

Los gobiernos pueden prohibir la quema a cielo abierto de escombros de demolición y construcción, y algunos lo hacen. Si la infraestructura para gestión de desechos sea deficiente, muchos de los instrumentos empleados para recuperar desechos domésticos pueden ser útiles para los materiales de construcción y demolición.

3.2.4 Alternativas, obstáculos para la aplicación e instrumentos de política para eliminarlos

Como se explicó anteriormente, las alternativas para eliminar desechos en los sitios de construcción y demolición son la recolección, separación, desmantelamiento, reventa, reutilización y reciclaje. Estos procesos pueden ser económicamente viables, o se pueden modificar las leyes y normas que rigen su eliminación para hacerlos viables. Estos instrumentos consisten en prohibiciones para la quema a cielo abierto, exenciones fiscales y otros incentivos financieros para la eliminación de materiales de construcción y demolición en rellenos sanitarios, así como instrumentos económicos que promuevan el reciclaje y la reutilización. En muchos casos se fomenta y resulta económicamente viable la reventa de elementos de construcción, sobre todo en países en desarrollo.

Además, los contratos de construcción pueden especificar que la eliminación de los escombros es responsabilidad del contratista. Los métodos aceptables de eliminación también pueden definirse por contrato.

3.2.5 Técnicas de combustión y sus características, y medios de perfeccionamiento

En el caso de estos materiales, se mantiene la misma orientación general explicada en las presentes directrices. La quema a cielo abierto debería ser el último recurso y deberían excluirse prontamente los materiales incombustibles o poco combustibles.

4. Quema a cielo abierto de materiales específicos, y materiales varios

4.1 Plástico agrícola

4.1.1 Composición del material

La película de plástico para uso agrícola suele ser de polietileno, por bajo su costo, pero también se emplea el copolímero de acetato de vinil-etileno (EVA). Antes se usaba PVC, pero hoy en día parece ser menos común. Entre otras aplicaciones, este plástico se utiliza para cubrir los campos al principio de la estación para calentar el suelo, envolver fardos, como bolsas para ensilaje, fertilizantes o sustancias químicas agrícolas, y como cubierta de invernaderos. Algunos proveedores especializados ofrecen material calificado de degradable, aunque no es un requisito universal.

También se encuentran envases de plástico rígido para plaguicidas u otras sustancias químicas agrícolas. Por lo general, las bolsas son de polietileno de baja densidad, las botellas, bidones y cubetas son de polietileno de alta densidad, de polietileno multicapa, o son recipientes de polietileno cuya superficie interior se ha tratado para reducir la interacción con el contenido del producto. En un informe se analizan experimentos de quema de bolsas con residuos de plaguicidas, y sólo se registran “niveles muy bajos” de PCDD/PCDF, con ausencia de emisiones atmosféricas y de residuos sólidos (Oberacker *et al.* 1992). Seguir los procedimientos publicados para enjuagar los contenedores y

tratar el agua del enjuague adecuadamente reducirá de manera significativamente esta eventualidad, de suyo mínima.

4.1.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminarlos

Los materiales que se encuentran lejos del sistema de recolección habitual de desechos se eliminarán usando los métodos más prácticos y de menor costo. La quema podría reducirse estableciendo un plan de recolección del material, en particular cuando en la zona hay muchos agricultores que usan el mismo material. Los gobiernos también pueden introducir programas educativos y leyes que prohíban esta quema, apoyando el reciclaje y creando instrumentos económicos para fomentar estas iniciativas.

4.1.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar los desechos

En algunos países es una práctica generalizada el reciclaje de la película de plástico para uso agrícola. Este proceso es más fácil cuando el material se recolecta explícitamente para ello. Cuando no hay oportunidad de reciclar se utilizan otros métodos de eliminación, como los rellenos sanitarios. El uso de aditivos, como los inhibidores de UV, puede prolongar la vida útil de las cubiertas de invernadero y reducir la necesidad eliminarlas. Cuando no existen programas específicos, el material usado para envolver fardos o para envasar la composta se elimina de la misma forma que cualquier otro envoltorio en un área determinada. En algunas áreas, la película puede reciclarse explícitamente, combinarse en compuestos de madera-plástico, o transformarse en combustible derivado de desechos para su combustión en un incinerador que aplique mejores técnicas disponibles. Para botellas de plástico, la Organización Mundial de la Salud recomienda un lavado triple, seguido de perforación y confinamiento bajo tierra (Rosendaal 1997, ch. 10).

4.1.4 Alternativas, obstáculos para la aplicación e instrumentos de política para eliminarlos

Las estrategias para reducir los desechos concuerdan en gran medida con las alternativas para la quema a cielo abierto.

4.1.5 Técnicas de combustión y sus características, y medios de perfeccionamiento

La película de plástico agrícola, aunque es combustible, por la forma en que se fabrica tiende a derretirse y encogerse. Para obtener una buena incineración se podría triturar el material para aumentar la relación superficie a volumen, o introducirlo a velocidad relativamente baja. Se puede lograr una combustión de alta temperatura y con buena ventilación, pero a gran escala puede ser muy difícil si sólo se incinera película agrícola.

Puede que las botellas no ardan bien por su relación superficie a masa aunque estén secas y sean combustibles. Puede requerirse un combustible alternativo, que debería ser compatible con la orientación general.

4.2 Neumáticos

4.2.1 Composición del material

Los neumáticos son un compuesto de copolímero estireno-butadieno o caucho natural, cloropreno, poliamida, hilos de acero, negro de carbón, y muchos otros aditivos orgánicos e inorgánicos. Los neumáticos contienen bajas concentraciones de cloro, y también contienen bastante azufre, similar al del carbón con contenido medio de azufre, como resultado de la vulcanización. El azufre inhibe la formación de contaminantes orgánicos persistentes durante la combustión; la probabilidad de que estos desechos generen contaminantes orgánicos persistentes clorados seguramente es menor que en las mezclas de desechos. Sin embargo, la mala combustión de grandes volúmenes de neumáticos a cielo abierto es una fuente de PCDD/PCDF, y sin duda será una extraordinaria fuente de otros contaminantes peligrosos, en particular SO₂ e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

4.2.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminar obstáculos

La quema de neumáticos puede iniciarse en forma natural (por un rayo) o antropogénica. Los vertederos de neumáticos implican una variedad de peligros, como el cultivo de insectos vectores de enfermedades, y además, ocupan grandes espacios. Para resolver estos problemas, se puede recurrir, y se recurre, a la quema antropogénica de neumáticos.

4.2.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar los desechos

En muchos casos, los neumáticos usados se pueden recauchar y reutilizar. En los últimos treinta años, y gracias a la tecnología moderna, la vida útil de un neumático ordinario es diez veces mayor. Al usar neumáticos con mayor vida útil se reduce la necesidad de eliminarlos. Por otro lado, pueden reciclarse para varios usos, sea enteros o como material triturado. Los neumáticos pueden enviarse a rellenos sanitarios, enteros o, de preferencia, triturados. Sin embargo, los neumáticos enteros y artículos similares como botellas sin pensar tenderán a flotar hacia la superficie de un vertedero. La acumulación de neumáticos en vertederos superficiales constituye una forma de contaminación visual, un peligro para el control de insectos, y puede generar una combustión incontrolada.

4.2.4 Alternativas, obstáculos para la aplicación e instrumentos de política para eliminar los obstáculos

Los neumáticos desechados pueden reutilizarse enteros, triturados o molidos criogénicamente. Una vez procesados pueden usarse como asfalto modificado con caucho para revestimiento de carreteras. También se comprimen neumáticos triturados y molidos para usarlos en materiales de construcción. Los neumáticos triturados se emplean como material de acolchado en parques de recreo. Además, los neumáticos se pueden comprimir y sirven como material para fabricar artículos como cercas, sandalias, topes de puertas y basureros, así como para construcción de arrecifes y control de la

erosión del suelo, sin olvidar que, como compuesto, el procesamiento de caucho reciclado de material termoendurecido está sujeto a ciertas restricciones. Al usar neumáticos enteros al aire libre se debe tomar en consideración su tendencia a acumular agua y propiciar la proliferación de insectos.

Si se incineran neumáticos triturados y enteros en hornos de cemento, debe hacerse en condiciones de combustión adecuadas, y su operación debe corresponder a las mejores técnicas disponibles descritas en la sección V.B de estas directrices. Así, pues, el horno debería cumplir con los niveles de PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas asociados a mejores técnicas disponibles (<0.1 ng EQTI/Nm³). No obstante, se han registrado liberaciones de sustancias del Anexo C a través del polvo del horno de cemento, y probablemente del clinker, que se están investigando.

4.2.5 Técnicas de combustión y sus características, y medios de perfeccionamiento

La quema a cielo abierto de neumáticos genera la formación y liberación de sustancias que figuran en el Anexo C. Sea en pilas o en vertederos, no existe prácticamente forma de mejorar la quema a cielo abierto de neumáticos; además, es casi imposible extinguir quemas a gran escala, que pueden arder durante años.

4.3 Derrames de petróleo y antorchas de gas

4.3.1 Composición del material

El petróleo crudo, gas natural y gas asociado consisten mayormente en carbón e hidrógeno con componentes de oxígeno, azufre y cloro en menor cantidad. En su estado natural, o como resultado de técnicas de recuperación; también pueden contener sal o agua salada. Es motivo de inquietud particular la combustión del petróleo derramado en terrenos que contengan sales u otros materiales clorados, o en el mar, o bien la combustión del petróleo contaminado por intrusión de agua en pozos perforados cerca de una masa de agua salina. Se ha quemado el petróleo derramado de ductos rotos para disminuir la contaminación potencial de un río congelado (Kruglov, Amirova and Loshkina 1996).

En determinadas circunstancias, la quema a cielo abierto de petróleo de instalaciones en alta mar puede ser una fuente importante de emisiones. Los métodos de rehabilitación biológica pueden ser útiles, en algunos casos, para los derrames accidentales de petróleo.

4.3.2 Obstáculos para la eliminación, recursos o políticas para eliminar obstáculos

Los obstáculos para la eliminación son consideraciones que tienen que ver con el costo, conveniencia y seguridad, y con la falta de métodos alternativos de recuperación o eliminación.

4.3.3 Estrategias e instrumentos de política para evitar, reducir o desviar los desechos

La quema de gas en antorchas es habitual. En la medida en que se trate de un problema de manejo de desechos y no de rehabilitación después de un accidente, se puede mejorar el desempeño normal con mejores procedimientos para manejar materiales o recuperarlos para la venta.

Referencias

ASEAN Secretariat. 2003. *Guidelines for the Implementation of the ASEAN Policy on Zero Burning*. www.dec.org/pdf_docs/PNACU609.pdf.

Basel Convention Secretariat. 1994. *Technical Guidelines on Wastes Collected from Households*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, UNEP, Geneva.

Canadian Centre for Pollution Prevention. 2006. *Great Lakes Trash and Open Burning Website*. www.c2p2online.com/main.php3?section=137&doc_id=289.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2005. *The Inventory of Sources and Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the United States: The Year 2000 Update*. EPA/600/P-03/002A, Chapter 9. National Center for Environmental Assessment, Washington, D.C.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2006. *Backyard Burning*.

www.epa.gov/msw/backyard/.

Government of New Zealand. 2006. *National Environmental Standards for Air Quality*. www.mfe.govt.nz/laws/standards/air-quality-standards.html.

Great Lakes Binational Toxics Strategy. 2004. *Strategy/Implementation Plan for Reducing the Prevalence of Household Garbage Burning (Barrel Burning) in Rural Areas of the Great Lakes*. Great Lakes Binational Toxics Strategy, Dioxins/Furans Workgroup, Burn Barrel Subgroup.

Gullett B.K. 2003. *PCDD/F from Uncontrolled Combustion*. First Session, Expert Group on Best Available Techniques and Best Environmental Practices.

Gullett B.K. and Touati A. 2002. "PCDD/F Emissions from Agricultural Field Burning." *Organohalogen Compd.* 56:135–138.

Gullett B.K. and Touati A. 2003. "PCDD/F Emissions from Forest Fire Simulations." *Atmospheric Environment* 37:803–813.

Hickman H.L. and Eldredge R.W. 2004. *A Brief History of Solid Waste Management in the US During the Last 50 Years*. www.forester.net/msw_0001_history.html.

Kruglov E.A., Amirova Z.K. and Loshkina E.A. 1996. "PCDDs and PCDFs in Snow Coat of an Industrial City as a Result of Oil Incineration at Accident Place." *Organohalogen Compd.* 28:228–231.

Lemieux P.M., Gullett B.K., Lutes C.C., Winterrowd C.K. and Winters D. 2003. "Variables Affecting Emissions of PCDD/F from Uncontrolled Combustion of Household Waste in Barrels." *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 53:523–531.

Lemieux P.M., Lutes C.C. and Santoianni D. 2004. "Emissions of Organic Air Toxics from Open Burning: A Comprehensive Review." *Progress in Energy and Combustion Sci.* 30:1–32.

Lobert J., Keene W., Logan J. and Yevich R. 1999. "Global Chlorine Emissions from Biomass Burning: Reactive Chlorine Emissions Inventory." *J. Geophys. Res.* 104:8373–8389.

Nakao T., Aozasa O., Ohta S. and Miyata H. 1997. "Formation of Dioxin Analogues by Open Air Incineration of Waste Wood and Fire of Buildings and Houses Concerning to Hanshin Great Earthquake in Japan." *Organohalogen Compd.* 31:304–309.

Nussbaumer T. and Hasler P. 1998. *Emissions of PCDD/F from Biomass Combustion*. Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition.

Oberacker D.A., Lin P.C., Shaul G.M., Ferguson D.T., Engleman V.S., Jackson T.W., Chapman J.S., Evans J.D. and Martrano R.J. 1992. "Characterization of Emissions from Open Burning of Pesticide Bags." In: *ACS Symposium Series 510: Pesticide Waste Management*.

Rosendaal J.A. 1997. *Vector Control Methods for Use by Individuals and Communities*. World Health Organization, Geneva.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Notas

¹ "No se observan diferencias en entre los registros (EQT) de fuentes de Cl inorgánicas (7% Cl en CaCl₂) y orgánicas (7% Cl en PVC)" (Lemieux *et al.* 2003).



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/6

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

**Procesos térmicos de la industria metalúrgica
no mencionados en el Anexo C, Parte II**



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.B

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

**Categorías de fuentes (b) de la Parte III:
Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados
en el Anexo C, Parte II**

VI. B. Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en el Anexo C, Parte II	11
(i) Producción secundaria de plomo	11
1. Descripción del proceso	11
2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	13
2.1 Información general sobre emisiones de fundiciones de plomo secundario	13
2.2 Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF	14
2.3 Liberaciones a otros medios	14
3. Procesos recomendados	14
4. Medidas primarias y secundarias	15
4.1 Medidas primarias	15
4.2 Medidas secundarias	16
5. Nuevas investigaciones	17
6. Resumen de medidas	18
7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles	21
Referencias	21
(ii) Producción primaria de aluminio	22
1. Descripción del proceso	22
1.1 El proceso Bayer: Refinación de la bauxita en alúmina	22
1.2 El proceso Hall-Héroult: Reducción de la alúmina en aluminio por electrólisis	22
1.3 Producción de aluminio	23
2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	25
2.1 Emisiones de PCDD/PCDF	25
2.2 Liberaciones al suelo	25
2.3 Resultados de investigaciones pertinentes	26
2.4 Información general sobre liberaciones de plantas de aluminio primario	26
3. Procesos alternativos a la fundición primaria de aluminio (nuevas tecnologías)	28

4.	Medidas primarias y secundarias	29
4.1	Medidas primarias.....	29
4.2	Medidas secundarias.....	31
5.	Resumen de medidas	32
6.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles	34
	Referencias	34
(iii)	Producción de magnesio	36
1.	Descripción del proceso	36
1.1	Proceso de producción de magnesio a partir de materiales con óxido de magnesio	36
1.2	El proceso Pidgeon (proceso de reducción térmica).....	38
1.3	Diversos procesos y consideraciones.....	39
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	40
2.1	Emisiones al aire	40
2.2	Liberaciones a otros medios	41
3.	Procesos alternativos para la producción de magnesio.....	43
3.1	Proceso de deshidratación de Norsk Hydro.....	43
3.2	Recuperación del magnesio a partir de residuos de amianto en la planta de Noranda	44
3.3	Procesamiento térmico y recuperación del magnesio a partir de chatarra	45
4.	Medidas primarias y secundarias	45
4.1	Medidas primarias.....	45
4.2	Medidas secundarias	45
5.	Nuevas investigaciones	46
6.	Resumen de medidas	47
7.	Niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones de HCB de la producción de magnesio	48
	Referencias	48
(iv)	Producción secundaria de acero	49
1.	Descripción del proceso	49
1.1	Descripción general del proceso	49
1.2	Alimento de horno.....	50
1.3	El horno de arco eléctrico	51

2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	52
2.1	Emisiones	52
2.2	Liberaciones de PCDD/PCDF en fuentes de desechos sólidos y aguas residuales	59
3.	Mejoras en el proceso de horno de arco eléctrico y procesos alternativos para la fabricación de acero	59
3.1	Mejoras en el proceso	59
3.2	Procesos alternativos	60
4.	Medidas primarias y secundarias	60
4.1	Medidas primarias para emisiones.....	60
4.2	Medidas secundarias para emisiones.....	62
4.3	Medidas primarias y secundarias para desechos sólidos y aguas residuales	64
5.	Resumen de medidas	65
6.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles	71
	Referencias	71
(v)	Fundición primaria de metales comunes.....	72
1.	Descripción del proceso	72
2.	Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	74
2.1	Liberaciones al aire.....	74
2.2	Liberaciones a otros medios	76
3.	Procesos alternativos para la fundición de metales comunes	76
4.	Medidas primarias y secundarias	76
4.1	Medidas primarias.....	77
4.2	Medidas secundarias	78
5.	Nuevas investigaciones	80
6.	Resumen de medidas	81
7.	Niveles de desempeños asociados a mejores técnicas disponibles.....	87
	Referencias	87
	Otras fuentes	87

Tablas

Tabla 1.	Medidas para nuevas fundidoras secundarias de plomo.....	18
Tabla 2.	Resumen de medidas primarias y secundarias para fundiciones de plomo secundario	19
Tabla 3.	Emisiones, efluentes, subproductos y desechos sólidos de la producción primaria de aluminio	28
Tabla 4.	Medidas para plantas nuevas de producción primaria de aluminio	32
Tabla 5.	Resumen de las medidas primarias y secundarias para plantas de producción primaria de aluminio	33
Tabla 6.	Emisiones al aire de PCDD/PCDF de distintos procesos de producción de magnesio.....	41
Tabla 7.	Emisiones de PCDD/PCDF por fuente: Hydro Magnesium Canada	41
Tabla 8.	Liberaciones de PCDD/PCDF al agua de distintos procesos de producción de magnesio	42
Tabla 9.	Factores de emisión en la industria del magnesio: PCDD/PCDF	42
Tabla 10.	Factores de emisión en la industria del magnesio: Hexaclorobenceno (HCB).....	43
Tabla 11.	Resumen de medidas primarias para plantas de magnesio.....	47
Tabla 12.	Resumen de medidas secundarias para plantas de magnesio.....	47
Tabla 13.	Medidas para nuevos hornos de arco eléctrico	65
Tabla 14.	Medidas para hornos de arco eléctrico nuevos y existentes.....	66
Tabla 15.	Medidas para nuevas operaciones de fundición primaria de metales comunes.....	81
Tabla 16.	Resumen de medidas primarias y secundarias para operaciones de fundición de metales comunes	82

Ilustraciones

Figura 1.	Fundición secundaria de plomo	13
Figura 2.	Esquema simplificado de la producción de alúmina	23
Figura 3.	Diagrama general del proceso electrolítico para producción de aluminio....	24
Figura 4.	Esquema del proceso de producción de magnesio a partir de recursos con óxido de magnesio.....	37
Figura 5.	Diagrama del proceso: Planta de magnesio Timminco	38
Figura 6.	Organigrama simplificado: Planta de producción de magnesio Cogburn...46	
Figura 7.	Sistema genérico para control de emisiones en hornos de arco eléctrico...52	
Figura 8.	Diagrama de flujo genérico para la fundición primaria de metales comunes.....	73

VI.B Procesos térmicos de la industria metalúrgica no mencionados en el Anexo C, Parte II

(i) Producción secundaria de plomo

■ Resumen

La fundición secundaria de plomo consiste en producir plomo y aleaciones de plomo, mayormente a partir de baterías de vehículos de chatarra, y también de otras fuentes de plomo usado (cañerías, soldaduras, escoria, revestimientos de plomo). Los procesos de producción consisten en el pretratamiento, fundición y refinación de la chatarra. Factores como la combustión incompleta, altos niveles de aceites, plásticos y otros materiales orgánicos en el alimento, y temperaturas entre 250°C y 500°C, pueden dar origen a las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.

Las mejores técnicas disponibles implican usar un material de alimentación que no contenga plásticos ni aceites, temperaturas por encima de 850°C en el horno, captura efectiva de los gases, cámaras de postcombustión y enfriamiento rápido, adsorción por carbón activado, y desempolvamiento con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones al aire de PCDD/PCDF para fundidoras secundarias de plomo son <0.1 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

El siguiente resumen del proceso es un extracto de EPA 1986. La Figura 1 simplifica el proceso con un esquema.

“Las fundiciones de plomo secundario producen plomo y aleaciones de plomo a partir de material de chatarra plomífera. Más del 60 por ciento de todo el plomo secundario se obtiene de baterías de vehículos de chatarra. Otras materias primas utilizadas en la fundición secundaria de plomo son los contrapesos de llanta, tuberías, soldaduras, escorias, y revestimientos de plomo.

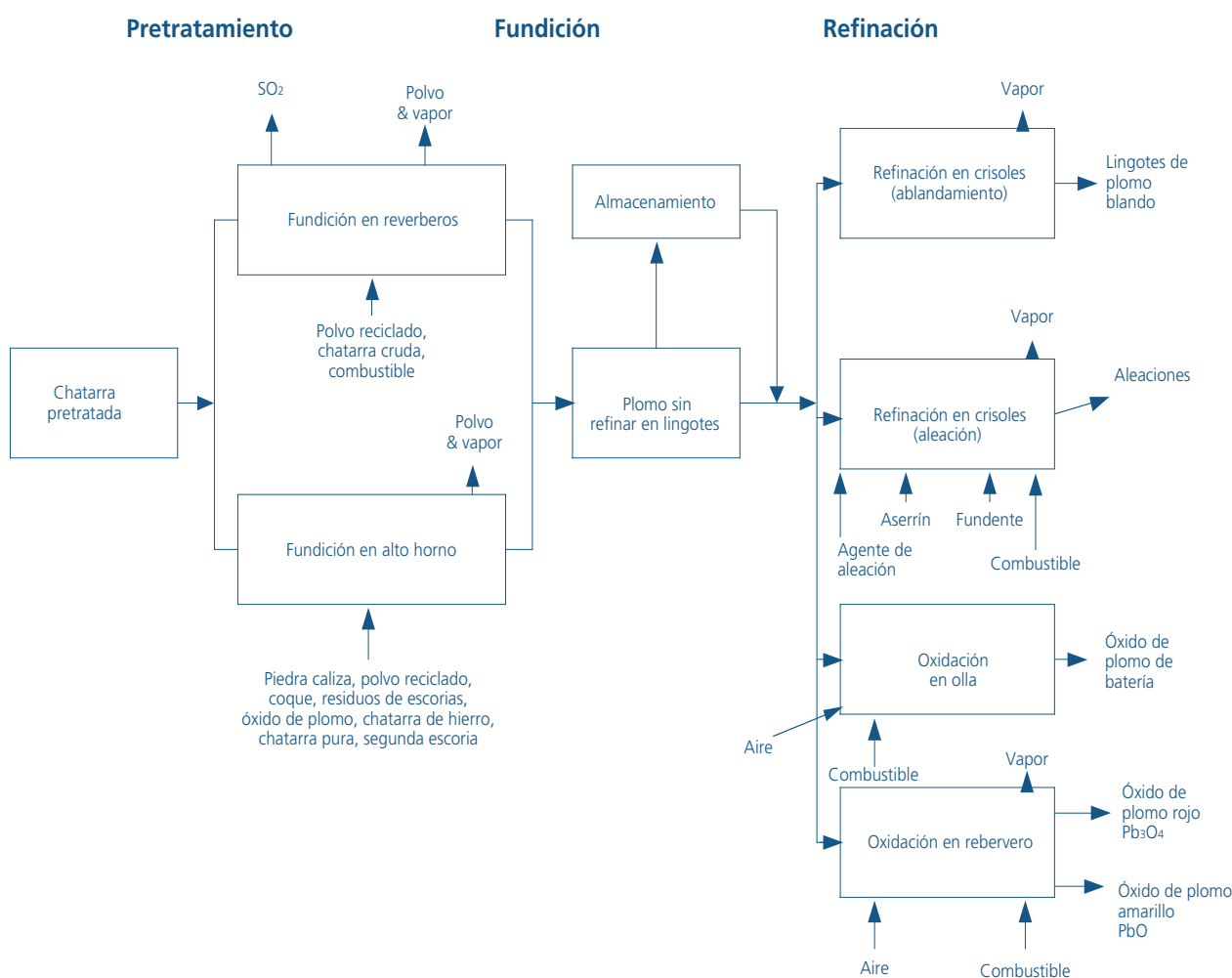
La fundición secundaria de plomo consiste en tres operaciones principales: pretratamiento, fundición, y refinación de la chatarra. El pretratamiento de la chatarra es la eliminación parcial de los contaminantes metálicos y no metálicos contenidos en la chatarra y en los residuos plomíferos. Los procesos usados para pretratar la chatarra son troceado, trituración y exudación de la batería. Se vacían y trituran las baterías, y luego se separa manualmente el plomo de los materiales no metálicos. A continuación, se exuda la chatarra de plomo separada en un horno de reverbero o rotatorio de gas o petróleo para separar el

plomo de metales que tienen puntos de fusión más altos. Por lo general, se usan los hornos rotatorios para procesar chatarra y residuos con bajo contenido de plomo, mientras que los hornos de reverbero procesan la chatarra con alto contenido de plomo. De vez en cuando, el plomo parcialmente purificado se extrae para continuar su procesamiento en hornos de fundición u hornos de crisol.

En la fundición se produce plomo por fusión y separación del plomo de los contaminantes metálicos y no metálicos, y reduciendo los óxidos a plomo elemental. La fundición se efectúa en altos hornos, hornos de reverbero y rotatorios. Los materiales de carga utilizados para los altos hornos son chatarra de metal pretratada, segunda escoria, chatarra de hierro, coque, escoria reciclada, polvo de combustión, y cal. El calor que necesita el proceso para fundir el plomo es producido por la reacción del coque alimentado con el aire inyectado en el horno. En la combustión, parte del coque funde la carga, mientras que el resto reduce los óxidos de plomo a plomo elemental. A medida que la carga de plomo se funde, la cal y el hierro suben a la superficie del baño fundido y forman un fundente que retarda la oxidación del producto de plomo. El plomo fundido fluye desde el horno a un crisol a una velocidad casi continua.

La refinación y colado del plomo crudo proveniente de los hornos de fundición pueden comportar su ablandamiento, aleación, y oxidación, según el grado de pureza o el tipo de aleación deseada. Estas operaciones pueden realizarse en hornos de reverbero; sin embargo, es más común que se utilicen hornos de tipo olla. Los hornos de aleación sólo funden y mezclan lingotes de plomo y materiales de aleación. Los materiales de aleación más comunes son el antimonio, estaño, arsénico, cobre y níquel. Los hornos de oxidación, sean unidades tipo crisol o de reverbero, son usados para oxidar el plomo y arrastrar los óxidos de plomo producido a la corriente de aire de combustión para su posterior recuperación en filtros de manga de alta eficiencia”.

■ **Figura 1. Fundición secundaria de plomo**



Fuente: EPA 1986.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

La formación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo puede ser resultado de la presencia de combustibles sin quemar y componentes orgánicos que reaccionan con compuestos clorados en zona del horno en que las temperaturas están en el rango de 250°C a 450°C.

2.1 Información general sobre emisiones de fundiciones de plomo secundario

Las emisiones atmosféricas generadas por la fundición secundaria de plomo pueden evacuarse en forma de emisiones fugitivas o de chimenea, según la antigüedad de la planta o su tecnología. Los contaminantes principales son dióxido de azufre (SO₂), otros compuestos de azufre y nieblas ácidas, óxidos de nitrógeno (NO_x), metales (en especial plomo) y sus compuestos, polvo y trazas de dibenzoparadióxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF). El SO₂ se recolecta y convierte en ácido sulfúrico en

plantas de ácidos. Las emisiones fugitivas de SO₂ pueden controlarse con una buena extracción y hornos bien sellados. El NO_x puede reducirse usando quemadores de baja emisión de NO_x u oxcombustibles. El material particulado se recolecta con métodos de alta eficiencia para eliminar polvo, como filtros de tela, y luego se devuelve al proceso (European Commission 2001, p. 359–368).

2.2 Emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF

Se forman PCDD/PCDF durante la fundición del metal base por reacción de productos de una combustión incompleta, contaminantes orgánicos y compuestos clorados sin quemar, normalmente por síntesis *de novo* en el área de enfriamiento a temperaturas entre 250°C y 450°C.

El proceso se describe en European Commission 2001, p. 133:

“Los PCDD/PCDF o sus precursores pueden encontrarse en algunas materias primas y existe la posibilidad de síntesis *de novo* en hornos y en sistemas de reducción. Los PCDD/PCDF se adsorben fácilmente en la materia sólida y pueden ser recogidos por todos los medios ambientales como polvo, sólidos de depuración y filtros de polvo.

La presencia de aceites y otros materiales orgánicos en la chatarra u otras fuentes de carbono (combustibles parcialmente quemados y reductores, como el coque), puede producir partículas finas de carbono que reaccionan con cloruros inorgánicos o cloro orgánicamente ligado en el rango de temperatura de 250 a 500°C para producir PCDD/PCDF. Este proceso se conoce como síntesis *de novo* y se cataliza por la presencia de metales como cobre o hierro.

Los PCDD/PCDF se destruyen a altas temperaturas (por encima de 850°C) en presencia de oxígeno; aun así puede haber síntesis *de novo* al enfriarse los gases en la ‘ventana de reformación’, posibilidad que puede darse en los sistemas de reducción y en partes más frías del horno, por ej., el área de alimentación. Un cuidadoso diseño de los sistemas de enfriamiento para disminuir el tiempo de residencia en la ventana permite prevenir la síntesis *de novo*”.

2.3 Liberaciones a otros medios

Los depuradores húmedos pueden generar efluentes líquidos y residuos sólidos susceptibles de contener sustancias del Anexo C. Estas sustancias se encontrarán en las partículas secas capturadas. Todos los residuos deben tratarse o eliminarse de manera adecuada.

3. Procesos recomendados

Las variaciones en el material de alimentación y la calidad del producto deseada influyen en el diseño y configuración del proceso. Estos procesos deberían aplicarse ejerciendo un buen control, y empleando sistemas de captura de gases y de reducción. Los procesos

considerados mejores técnicas disponibles son el alto horno (con un buen control del proceso), horno ISA Smelt/Ausmelt, horno rotatorio con alimentación de aire por la parte superior, horno eléctrico y horno rotatorio (European Commission 2001, p. 379).

El horno de arco eléctrico sumergido consiste en una unidad sellada para materiales mixtos de cobre y plomo. Resulta más limpio que otros procesos si el sistema de extracción de gases está correctamente diseñado y dimensionado (European Commission 2001, p. 395).

“Se ha inyectado material fino a través de las toberas del alto horno de manera satisfactoria, reduciendo así la manipulación de material pulverulento y la energía utilizada para devolver el polvo metálico a la planta de sinterizado” (Comisión Europea, p. 404). Esta técnica disminuye las emisiones de polvo durante la carga y, por ende, reduce las liberaciones de PCDD/PCDF por adsorción en el material particulado.

No se dispone de información sobre procesos alternativos a la fundición para el procesamiento secundario de plomo.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se analizan medidas primarias y secundarias para reducir los PCDD/PCDF.

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas de prevención de la contaminación para reducir o eliminar la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. Algunas medidas posibles son las siguientes:

4.1.1 Preclasificación del material de alimentación

La chatarra debería separarse y pretratarse para eliminar compuestos orgánicos y plásticos a fin de reducir la generación de PCDD/PCDF por combustión incompleta o síntesis *de novo*. Se debería evitar alimentar los hornos con baterías enteras o con chatarra que no se ha separado por completo. Las técnicas para almacenar, manejar y pretratar el alimento serán determinadas por el tamaño y distribución de los materiales así como por los contaminantes y metales que contengan.

Para eliminar plásticos puede utilizarse la molienda y trituración, junto con técnicas de separación neumática o por densidad. Pueden aplicarse procesos térmicos de eliminación de revestimientos y de aceites; estos procesos deberían ir seguidos de una postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases residuales (European Commission 2001, p. 232).

4.1.2 Control efectivo del proceso

Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere según parámetros que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF, por ejemplo, mantener la temperatura del horno por encima de 850°C a

fin de destruir los PCDD/PCDF. Lo ideal sería monitorear constantemente las emisiones de PCDD/PCDF para asegurarse de que se reduzcan las liberaciones. Para algunos sectores (ej., la incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación a este campo aún se está investigando. A falta de un monitoreo constante de PCDD/PCDF, otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases, así como los reguladores de tiro para captación de vapores, deberían ser monitoreados y mantenidos a fin de establecer las condiciones de funcionamiento óptimas para disminuir las emisiones de PCDD/PCDF. Como las instalaciones ser muy distintas, habría que determinar las variables que deben monitorearse en cada caso.

“Se debe prestar atención especial a la medición de la temperatura y controlar hornos y ollas empleados en la fundición de metales en este grupo a fin de evitar o disminuir la formación de vapores” (European Commission 2001, p. 390).

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas para controlar la contaminación a fin de contener y prevenir emisiones. Estos métodos no evitan la formación de contaminantes.

4.2.1 Recolección de vapores y gases

Todas las etapas del proceso de fundición deberían tener sistemas para captura de vapores y gases residuales a fin de controlar las emisiones de PCDD/PCDF.

“Los sistemas para recolección de vapores utilizados pueden aprovechar los sistemas de sellado de hornos y diseñarse de forma que mantengan una depresión en el horno que impida filtraciones y emisiones fugitivas. Pueden usarse sistemas que mantengan sellado el horno o sistemas de campana. Se puede ingresar el material por la campana, por medio de toberas o lanzas, y empleando válvulas rotativas robustas en los sistemas de alimentación. Un sistema de recolección de vapores [eficiente] que pueda extraer los vapores desde su origen, e independientemente de su duración, consumirá menos energía. Las mejores técnicas disponibles para los sistemas de tratamiento de gases y vapores son las que usan el enfriamiento y recuperación de calor, si es factible, antes del filtro de tela, excepto cuando se aplican como parte de la producción de ácido sulfúrico” (European Commission 2001, p. 397).

4.2.2 Eliminación de polvo de alta eficiencia

Deberían eliminarse los polvos y los compuestos metálicos generados durante el proceso de fundición. Este material particulado posee una gran área superficial en la que los PCDD/PCDF pueden adsorberse fácilmente. Eliminar estos polvos contribuiría a reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Las técnicas que pueden considerarse son el uso de filtros de tela, depuradores secos y húmedos, y filtros de cerámica. El material particulado recolectado debería reciclarse en el horno.

Los filtros de tela hechos con materiales de buen rendimiento son la opción más efectiva. Algunas innovaciones para este método son los sistemas de detección de roturas de mangas, métodos de limpieza en curso de producción, y revestimientos catalíticos para destruir los PCDD/PCDF (European Commission 2001, p. 139–140).

4.2.3 Postcombustión y enfriamiento rápido

Los postquemadores (cámaras de postcombustión) deberían funcionar con una temperatura mínima de 950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos (Hübner *et al.* 2000). Después de esta etapa, los gases calientes deben enfriarse rápidamente hasta temperaturas de menos de 250°C. La inyección de oxígeno en la parte superior del horno favorecerá la combustión completa (European Commission 2001, p. 189).

Se ha observado que se forman PCDD/PCDF en el rango de temperatura de 250°C a 500°C, y se destruyen por encima de 850°C, en presencia de oxígeno. Sin embargo, todavía puede producirse síntesis *de novo* cuando los gases se enfrían al pasar por la ventana de reformación que se produce en los sistemas de reducción y en las áreas más frías del horno. Los sistemas de enfriamiento deberían operar adecuadamente a fin de disminuir el periodo de reformación (European Commission 2001, p. 133).

4.2.4 Adsorción por carbón activado

Se debería tomar en consideración el tratamiento con carbón activado para eliminar los PCDD/PCDF de los gases residuales de fundición. El carbón activado posee una gran área superficial en la que pueden adsorberse los PCDD/PCDF. Los gases residuales pueden tratarse con carbón activado en reactores de lecho fijo o móvil, o mediante la inyección de partículas de carbono a la corriente de gases, seguida de su eliminación como polvo de filtro empleando sistemas de desempolvado de alta eficiencia, como los filtros de tela

5. Nuevas investigaciones

La oxidación catalítica es una tecnología incipiente utilizada en incineradoras de desechos para eliminar las emisiones de PCDD/PCDF. Este proceso debería considerarse para la fundición secundaria de metales base ya que ha resultado efectivo para destruir PCDD/PCDF en incineradoras de desechos. La oxidación catalítica, según la selección del catalizador, puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros contaminantes de los gases de escape. Se requeriría un trabajo de validación antes de usar este proceso.

La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, dióxido de carbono (CO₂) y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso para incrementar la tasa de reacción en el rango de temperatura de 370°C a 450°C. Como referencia, una incineración típica se produce a 980°C. Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye los PCDD/PCDF con tiempos de residencia más cortos, menor consumo de energía y 99% de eficiencia, por lo que debería ser considerada. El material particulado debería eliminarse de los gases de escape antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima. Este método es efectivo para los contaminantes en fase vapor. El

ácido clorhídrico resultante es tratado en un depurador mientras que el agua y el CO₂ son liberados al aire después del enfriamiento (Parvesse 2001).

6. Resumen de medidas

Las tablas 1 y 2 presentan un resumen de las medidas analizadas anteriormente.

■ **Tabla 1. Medidas para nuevas fundidoras secundarias de plomo**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Deberían considerarse diversos procesos de fundición recomendados para nuevas instalaciones.	<p>Procesos para consideración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ito horno (con buen control del proceso), horno ISA Smelt/Ausmelt, horno rotatorio con alimentación superior de aire, horno eléctrico y horno rotatorio • Horno de arco eléctrico sumergido (unidad sellada para materiales mixtos de cobre y plomo, más limpio que otros procesos si el sistema de extracción de gases está bien diseñado y dimensionado) • La inyección de material fino por las toberas del alto horno reduce manipulación de material pulverulento 	Estos procesos deberían aplicarse ejerciendo un buen control, y empleando sistemas de captura de gases y de reducción de contaminantes.

■ **Tabla 2. Resumen de medidas primarias y secundarias para fundiciones de plomo secundario**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Preclasificación del material de alimentación	<p>La chatarra debería separarse y pretratarse para eliminar compuestos orgánicos y plásticos a fin de reducir la generación de PCDD/PCDF por combustión incompleta o síntesis <i>de novo</i>.</p> <p>Las baterías deberían romperse antes de cargarse al horno, y deberían eliminarse plásticos y otros materiales no plomíferos.</p>	<p>Procesos para consideración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar introducir baterías enteras o material mal separado • Molturación y molienda, seguidas de técnicas de separación neumáticas o por densidad, para eliminar plásticos • Remover aceites mediante procesos térmicos de eliminación de revestimientos y de aceites 	<p>Los procesos térmicos para eliminación de revestimientos y de aceites deberían ser seguidos de postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases de escape.</p>
Control efectivo del proceso	<p>Los sistemas de control del proceso deberían utilizarse para mantener la estabilidad del proceso y operar a niveles paramétricos a niveles que contribuyan a reducir la generación de PCDD/PCDF.</p>	<p>Las emisiones de PCDD/PCDF pueden disminuirse controlando otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases, y los reguladores de tiro para captación de vapores, habiendo determinado las condiciones de funcionamiento óptimas para la reducción de PCDD/PCDF.</p>	<p>Para algunos sectores (ej., la incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero su aplicación a este campo aún se está investigando.</p> <p>Se debe prestar atención especial a la medición de la temperatura y controlar hornos y ollas empleados en la fundición de metales en este grupo a fin de evitar o disminuir la formación de vapores.</p>

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas secundarias			
Recolección de vapores y gases	Todas las etapas del proceso de fundición deberían tener sistemas para captura de vapores y gases residuales a fin de controlar las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos para consideración: <ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de sellado de hornos para mantener un vacío adecuado en el horno que impida filtraciones y emisiones fugitivas • Uso de campanas • Adición del material por la campana, mediante toberas o lanzas y uso de válvulas rotativas robustas en los sistemas de alimentación 	Las mejores técnicas disponibles para los sistemas de tratamiento de gases y vapores son las que usan el enfriamiento y recuperación de calor, de ser factible, antes del filtro de tela.
Eliminación de polvo de alta eficiencia	Deberían eliminarse los polvos y los compuestos metálicos ya que este material particulado tiene una gran área superficial en la que PCDD/PCDF pueden adsorberse fácilmente. Eliminar estos polvos contribuiría a reducir las emisiones de PCDD/PCDF.	Procesos para consideración: <ul style="list-style-type: none"> • Uso de filtros de tela, depuradores secos y húmedos y filtros de cerámica 	Los filtros de tela hechos con materiales de alto desempeño son la opción más efectiva. El material particulado recolectado debería reciclarse en el horno.
Postcombustión y enfriamiento rápido	Los postquemadores deberían funcionar a temperaturas de >950°C para garantizar la combustión completa de los compuestos orgánicos, seguidos de un enfriamiento rápido de los gases calientes hasta llegar a temperaturas inferiores a 250°C.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Formación de PCDD/PCDF entre 250°C y 500°C, y su destrucción a >850°C con O₂ • Necesidad de suficiente O₂ en la parte superior del horno para combustión completa • Necesidad de un diseño apropiado de los sistemas de enfriamiento para disminuir el periodo de reformación 	Todavía puede producirse síntesis <i>de novo</i> cuando los gases se enfrían en la ventana de reformación.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Adsorción por carbón activado	Debería considerarse el tratamiento con carbón activado ya que este material es un medio ideal para la adsorción de PCDD/PCDF por su gran área superficial.	Procesos para consideración: <ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento con carbón activado usando reactores de lecho fijo o móvil • Inyección de partículas de carbono a la corriente de gas seguida de su eliminación como polvo de filtro 	También pueden utilizarse mezclas de cal/carbono

Nuevas investigaciones

Oxidación catalítica	La oxidación catalítica es una tecnología incipiente que debería considerarse por su alta eficiencia y bajo consumo de energía. La oxidación catalítica convierte los compuestos orgánicos en agua, CO ₂ y ácido clorhídrico con un catalizador de metal precioso.	Consideraciones: <ul style="list-style-type: none"> • Eficiencia del proceso para contaminantes en fase vapor • Tratamiento de ácido clorhídrico con depuradores húmedos, mientras que el agua y CO₂ se liberan al aire después del enfriamiento 	Se ha demostrado que la oxidación catalítica destruye PCDD/PCDF con tiempos de residencia más cortos, menor consumo de energía y 99% de eficiencia. Los gases residuales deberían tratarse para eliminar las partículas antes de la oxidación catalítica para obtener una eficiencia óptima.
----------------------	---	---	---

7. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundidoras secundarias de plomo son <0.1 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1986. *Secondary Lead Processing*. Background Report AP-42, Section 12.11. www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch12/final/c12s11.pdf.
- European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.
- Hübner C., Boos R., Bohlmann J., Burtscher K. and Wiesenberger H. 2000. *State-of-the-Art Measures for Dioxin Reduction in Austria*. Vienna. www.ubavie.gv.at/publikationen/Mono/M116s.htm.
- Parvesse T. 2001. "Controlling Emissions from Halogenated Solvents." *Chemical Processing* 64(4):48–51.

(ii) Producción primaria de aluminio

■ Resumen

El aluminio primario se produce directamente del mineral extraído, la bauxita. La bauxita se refina en alúmina mediante el proceso Bayer. Luego, por el proceso Hall-Héroult, la alúmina se reduce a aluminio metálico por electrólisis (con ánodos de autococción, o ánodos Söderberg, o con ánodos precocidos).

Por lo general, la producción primaria de aluminio no se considera una fuente significativa de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. No obstante, la contaminación por PCDD y PCDF puede ocurrir por los electrodos de grafito empleados en el proceso de fundición electrolítica.

Las técnicas posibles para reducir la producción y liberación de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C provenientes del sector del aluminio primario implican mejoras en la producción y control de los ánodos, y el uso de procesos de fundición avanzados. Los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles para emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF del sector del aluminio primario son $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

La producción primaria de aluminio significa la producción de aluminio a partir del mineral extraído, la bauxita. La bauxita se refina en alúmina mediante el proceso Bayer, y luego se reduce por electrólisis (proceso Hall-Héroult) en aluminio metálico. Esta sección no se refiere al proceso secundario de aluminio, que se explica en la sección V.D (iii) de las presentes directrices.

1.1 El proceso Bayer: Refinación de la bauxita en alúmina

La bauxita se refina en alúmina mediante el proceso Bayer (Figura 2). El mineral de bauxita se seca, tritura y muele para obtener un polvo que se mezcla con una solución de sosa cáustica a fin de extraer la alúmina en digestores a alta temperatura y presión. Se produce una lechada que contiene aluminato sódico disuelto y una mezcla de óxidos metálicos, llamada lodo rojo, que se retira en espesadores. El lodo rojo se lava para recuperar las sustancias químicas y se elimina. La solución de aluminato se enfría y siembra con alúmina para cristalizar la alúmina hidratada en tanques precipitadores. Los cristales se lavan y luego se calcinan en hornos rotatorios o calcinadores de lecho fluidizado o *flash* para producir óxido de aluminio o alúmina, un polvo blanco parecido a la sal de mesa.

1.2 El proceso Hall-Héroult: Reducción de la alúmina en aluminio por electrólisis

El aluminio se produce a partir de alúmina mediante electrólisis en un proceso conocido como Hall-Héroult. La alúmina se disuelve en un baño electrolítico de criolita fundida (fluoruro de aluminio sódico). Se pasa corriente eléctrica por el electrolito que fluye entre

el ánodo y el cátodo. Se obtiene aluminio fundido, que se deposita en el fondo de la celda o cuba electrolítica, se extrae periódicamente con un sifón y se transfiere a un horno de conservación de tipo reverbero. Ahí se alea, se le agrega fundente y se desgasifica para eliminar las impurezas residuales. Finalmente, el aluminio se moldea o transporta a las plantas de fabricación.

■ **Figura 2. Esquema simplificado de la producción de alúmina**



Fuente: Aluminium Association of Canada

1.3 Producción de aluminio

Se utilizan dos tipos de tecnologías para producir aluminio (Figura 3): las que usan ánodos de autococción (ánodos Söderberg) y las que usan ánodos precocidos.

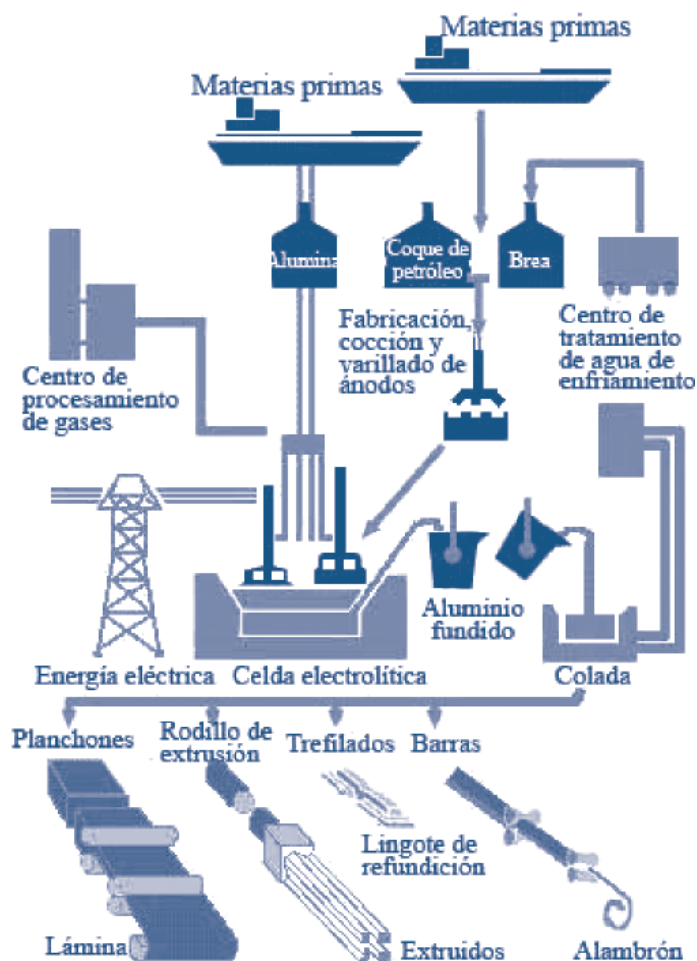
Los ánodos Söderberg, de tecnología más antigua, se preparan *in situ* a partir de una pasta de coque de petróleo calcinado y brea de alquitrán, y se cuecen con el calor proveniente del baño de electrolito fundido. A medida que se consume el ánodo, baja más pasta por la cubierta del ánodo en un proceso que no requiere cambiar los ánodos. Se agrega periódicamente alúmina a las celdas Söderberg a través de orificios practicados en la corteza de la alúmina y el electrolito congelado que cubre el baño fundido. Según la ubicación de las barras anódicas, se conocen como celdas o cubas Söderberg de barras verticales o de barras horizontales. En plantas modernizadas, se utilizan sistemas alimentación automáticos de picado puntual, que evitan la necesidad de perforar la corteza regularmente.

Los ánodos precocidos se fabrican en una planta de carbón con una mezcla de coque de petróleo calcinado y brea de alquitrán, con la que se forma un bloque que luego se cuece en un horno de ánodo. Las plantas que producen ánodos precocidos suelen ser parte de la planta de aluminio primario. Los ánodos precocidos bajan gradualmente en las cubas a medida que se consumen, y deben reemplazarse antes de que se consuma todo el bloque. Los restos o residuos de ánodo se limpian y vuelven a la planta de carbono para su reciclaje. Según el método de introducción de la alúmina en las celdas electrolíticas, estas se llaman celdas de ánodos precocidos con picado lateral o con picado central. Para el primer tipo, la alúmina se introduce en las celdas habiendo roto la corteza en el perímetro; en el segundo tipo de celdas, la alúmina se introduce después de romper la corteza a lo largo de la línea central de la celda o en puntos determinados de la línea central de la misma.

Normalmente, el cátodo debe reemplazarse cada cinco u ocho años por su deterioro, que puede hacer que el electrolito fundido y el aluminio penetren la barra conductora del cátodo y la cubierta de acero. El cátodo gastado, que se conoce como revestimiento gastado de cuba electrolítica, contiene sustancias tóxicas y peligrosas como cianuros y fluoruros, que deben eliminarse adecuadamente.

La alúmina fundida de las celdas se aspira periódicamente por sifón y se transfiere a crisoles. Los crisoles con metal líquido se transportan a la planta de moldeado, donde el aluminio se transfiere a los hornos de conservación, donde se agregan los elementos de aleación. Se retira la escoria (“espumas”) formada por la oxidación del aluminio fundido, y se emplean contenedores sellados para evitar que la escoria siga oxidándose. También se emplea una atmósfera de nitrógeno y argón. A continuación se elimina el sodio, magnesio, calcio e hidrógeno. El gas de tratamiento usado varía según las impurezas. Se emplea argón o nitrógeno para retirar el hidrógeno, y mezclas de cloro con nitrógeno o argón para quitar las impurezas metálicas.

■ **Figura 3. Diagrama general del proceso electrolítico para producción de aluminio**



Fuente: Aluminium Association of Canada

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

Es poco probable que la producción primaria de aluminio sea una fuente importante de liberaciones de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF), aunque es posible que genere contaminación por los electrodos de grafito (AEA Technology Environment 1999, p. 63). Por lo general, se considera que los niveles de las liberaciones de PCDD/PCDF son bajos, y se presta más atención al procesamiento térmico de los materiales de chatarra (UNEP 2003, p. 73). Este tema se analiza más a fondo en la subsección 2.3 *infra*.

2.1 Emisiones de PCDD/PCDF

Existe poca información sobre las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, en particular sobre la formación de PCDD/PCDF a partir de los procesos de aluminio primario. Algunas publicaciones sugieren que la evaluación inicial de las emisiones indica que no se considera que los PCDD/PCDF derivados de este sector sean significativos.

Se ha informado que es poco probable que los procesos Söderber y de precocción liberen emisiones notablemente distintas por tonelada de aluminio producido (AEA Technology Environment 1999, p. 63). Los resultados de las pruebas sobre fuentes de emisión y unidades de reducción asociadas a la fabricación de ánodos precocidos indican que los PCDD derivados de estas fuentes no son significativos. Sin embargo, deberán examinarse las emisiones si se utilizan compuestos o aditivos clorados (European Commission 2001, p. 669).

En algunos estudios se ha analizado el vapor procedente del proceso de moldeado para detectar PCDD, ya que el uso de cloro para desgasificación y la presencia de carbono en los gases de combustión pueden contribuir a la formación de PCDD. Los resultados en las naves de colada de fundiciones primarias han demostrado que las liberaciones están muy por debajo de un gramo por año (Comisión Europea 2001, p. 289). El potencial de formación de PCDD/PCDF durante los procesos de refinación en la producción primaria y secundaria de aluminio no se ha investigado totalmente. Se ha recomendado que se cuantifique esta fuente (European Commission 2001, p. 318).

2.2 Liberaciones al suelo

Se considera que la producción primaria de aluminio a partir de minerales no genera cantidades significativas de PCDD/PCDF (New Zealand Ministry for the Environment 2000). La "*Review of Dioxin Releases to Land and Water in the UK*" establece que puede haber posibilidades de que los electrodos de grafito estén algo contaminados con PCDD/PCDF (UK Environment Agency 1997). Los datos de Suecia sugieren que el lodo de las celdas gastado puede contener 7.8 ng EQT-Nórdico kg⁻¹. No obstante, si el cátodo es de carbono de alta pureza y el proceso de reducción no utiliza cloro o materiales clorados, es improbable la presencia de PCDD/PCDF.

El polvo metálico recuperado puede contener PCDD/PCDF ya que se utilizan cloros o productos en base a cloro para desgasificar la fracción del aluminio que se vierte en las barras de extrusión.

2.3 Resultados de investigaciones pertinentes

Existen pocos datos sobre la formación involuntaria de PCDD/PCDF en este sector. Se ha sugerido que la producción primaria de aluminio no se considera una fuente importante de liberaciones. En un artículo científico se informa de niveles no detectados de emisiones de dioxinas y furanos (ESP Environmental Ltd., 2000). Sin embargo, un estudio ruso realizado en 2001 sobre emisiones de PCDD/PCDF en la ciudad de Krasnoyarsk concluyó que la fábrica de aluminio era responsable del 70 % de las emisiones industriales de PCDD/PCDF a la atmósfera y del 22% de las liberaciones industriales al suelo (Kucherenko *et al.* 2001). Se necesitarían más estudios en esta área para determinar si la producción primaria de aluminio es o no una fuente significativa de dioxinas y furanos.

2.4 Información general sobre liberaciones de plantas de aluminio primario

Los gases de invernadero son los contaminantes principales que genera la producción de aluminio y se originan por el uso de combustibles fósiles, consumo de ánodos de carbono, y perfluorocarbonos de los efectos de ánodo. Aparte de los gases de invernadero, las fundiciones de aluminio también descargan otras emisiones atmosféricas, así como algunos desechos sólidos (revestimientos gastados de las cubas) y efluentes líquidos (SNC-Lavalin Environment 2002, p. 3:14).

“El uso de ánodos de carbón produce emisiones de dióxido de azufre (SO₂), sulfuro de carbonilo (COS), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y óxidos de nitrógeno (NO_x). La mayor parte del azufre contenido en el ánodo de carbono se libera como COS, que no se oxida completamente para formar SO₂ antes de ser emitido por las chimeneas de los depuradores de gases en la sala de cubas. En la mayoría de los casos, las emisiones de azufre se producen en forma de SO₂ con un pequeño componente de COS. Se espera que la emisión de gases sulfurados de la reducción de aluminio aumente con el incremento en el contenido de azufre de los coques de petróleo empleados en la fabricación de ánodos. Los PAH son resultado de la combustión incompleta de los hidrocarburos que se encuentran en ciertas breas usadas para elaborar ánodos. El uso de ánodos precocidos casi ha eliminado las emisiones de PAH, asociadas principalmente a los ánodos Söderberg. En su mayoría, las emisiones de NO_x provienen de la quema del combustible en el horno de cocción de ánodos” (SNC-Lavalin Environment 2002, p. 3:14).

“La electrolisis de alúmina también conlleva la emisión de fluoruros (fluoruros particulados y HF gaseoso) y otros materiales particulados. Actualmente, la eficiencia de eliminación de fluoruros provenientes de gases de celda, que se realiza con sistemas modernos de depuradores secos con inyección de alúmina, es superior al 99 %, y las emisiones

finales de fluoruro producidas por fundidoras modernas de precocido son mucho menores. El cambio de ánodos y el enfriamiento de los residuos de los ánodos gastados son las fuentes más importantes de emisiones fugitivas de fluoruros de una fundición de aluminio, y se estima que son de cuatro a cinco veces mayores que las emisiones de chimenea (después del depurador)” (SNC-Lavalin Environment 2002, p. 3:16).

Por el “efecto de ánodo” se generan perfluorocarbonos en las cubas de fundición cuando la concentración de alúmina cae por debajo de cierto nivel por falta de alimentación. De preferencia, el ánodo de carbono reacciona con el flúor en la solución de criolita porque el oxígeno de la alúmina es insuficiente. Cuando esto ocurre, se produce tetrafluoruro de carbono (CF_4) y hexafluoroetano (C_2F_6), junto con un aumento repentino del voltaje. La cantidad de perfluorocarbono generada depende de la eficiencia del control de alimentación en la cuba. En cubas que no están equipadas con controles adecuados, las emisiones de perfluorocarbono provenientes de efectos de ánodo pueden constituir la fuente principal, a saber, más del 50%, de las emisiones totales de la fundición (en unidades de CO_2 equivalente). Casi cualquier cuba de alimentación puntual, controlada por computadora, puede operar con baja frecuencia de efecto de ánodo. Las tecnologías más antiguas, como las celdas Söderberg de barra vertical y horizontal, arrojan mayores coeficientes de generación de perfluorocarbono. Es típico que estas tecnologías no tengan sistemas de detección en cada cuba y que la alimentación se realice mediante un sistema a granel no automatizado. Las técnicas para controlar el proceso en fundiciones modernas de precocción permiten que las emisiones de perfluorocarbono se reduzcan a menos del 5 % de las liberaciones totales de gases de invernadero generadas por la fundición. La emisión de CO_2 del consumo de ánodos es la segunda fuente en importancia para las cubas que no cuentan con controles modernos (SNC-Lavalin Environment 2002, p. 3:10–11).

■ **Tabla 3. Emisiones, efluentes, subproductos y desechos sólidos de la producción primaria de aluminio**

Proceso	Emisiones al aire ^a	Efluentes	Subproductos y desechos sólidos
Refinación de alúmina	Material particulado	Aguas residuales con contenido de almidón, arena y cáusticos.	Lodo rojo, oxalato de sodio.
Producción de ánodos	Material particulado, fluoruros, hidrocarburos aromáticos policíclicos, SO ₂ , PCDD/PCDF ^b	Aguas residuales con sólidos suspendidos, fluoruros y materia orgánica.	Polvo de carbón, alquitrán, desechos refractarios.
Fundición de aluminio	CO, CO ₂ , SO ₂ , fluoruros (gaseosos y particulados), perfluorocarbonos (CF ₄ , C ₂ F ₆), hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCDD/PCDF ^b	Efluentes húmedos del control de contaminación de aire (precipitador electrostático húmedo).	Revestimientos gastados de las cubas, desechos húmedos del control de contaminación de aire, lodos.

a. Sin incluir emisiones asociadas a la combustión.

b. Según el estudio de Krasnoyarsk (Kucherenko *et al.* 2001).

Fuente: Energetics Inc. 1997.

3. Procesos alternativos a la fundición primaria de aluminio (nuevas tecnologías)

El Convenio de Estocolmo estipula que al considerar las propuestas para la construcción de una nueva planta de aluminio primario, se dé prioridad a los procesos, técnicas o prácticas alternativas que tengan una utilidad similar pero que eviten la formación y liberación de las sustancias en cuestión.

En la actualidad se están desarrollando varias iniciativas de investigación para producir aluminio primario, reduciendo de forma concomitante el consumo de energía y las emisiones (European Commission 2001, p. 335; SNC-Lavalin Environment 2002; Welch 1999; USGS 2001; BCS Inc. 2003, p. 41–58). Estas iniciativas son:

- Ánodos inertes: Ánodos sin carbón que son inertes, dimensionalmente estables, de consumo lento, y producen oxígeno en lugar de CO₂. El uso de estos ánodos evita la necesidad de una planta de ánodos de carbono (y las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos derivadas del proceso).
- Cátodos humectables: Nuevos materiales para cátodos o revestimientos para cátodos existentes que permiten una mayor eficiencia energética.

- Electrodo vertical, electrólisis de baja temperatura (VELTE): Este proceso utiliza un ánodo de aleación de metal refractario, un cátodo humectado y un baño electrolítico, que se mantiene saturado con alúmina a una temperatura relativamente baja de 750°C mediante partículas de alúmina libre suspendidas en el baño. Con esta tecnología se podría producir metal de aluminio primario con menor consumo de energía, menor costo, y menor degradación ambiental que con el proceso Hall-Héroult convencional.
- Tecnología de celda drenada: Los cátodos de las celdas de aluminio están revestidos con dibromuro de titanio y se elimina la almohadilla metálica, con lo que se reduce la distancia entre ánodo y cátodo, y, por consiguiente, reduce también la tensión en la celda y la pérdida de calor.
- Tecnología carbotérmica: La reducción carbotérmica produce aluminio mediante una reacción química que ocurre dentro de un reactor, y necesita mucho menos espacio físico que la reacción Hall-Héroult. El resultado de este proceso sería una disminución significativa en el consumo eléctrico, y la eliminación de emisiones de perfluorocarbono derivadas de los efectos de ánodo de carbono, del peligro de los revestimientos gastados, y de las emisiones de hidrocarburos asociadas a la cocción de ánodos de carbono consumibles.
- Tecnología de reducción por caolinita: La producción de aluminio por reducción de cloruro de aluminio con arcillas resulta atractiva ya que las materias primas se encuentran fácilmente y son de bajo costo. Asimismo, la termodinámica permite reacciones de conversión muy rápidas, que requieren menos consumo eléctrico y no generan residuos de bauxita.

4. Medidas primarias y secundarias

A continuación se explican las medidas primarias y secundarias para reducir las emisiones de PCDD/PCDF derivadas de los procesos de la producción primaria de aluminio.

El grado de reducción de emisiones que puede lograrse con la sola aplicación de medidas primarias no es fácil de determinar. Por lo tanto, para en las plantas existentes, se recomienda considerar la aplicación tanto de medidas primarias como de medidas secundarias.

Cabe señalar que no se han establecido medidas secundarias para controlar la formación involuntaria de PCDD/PCDF específica de las fundiciones primarias de aluminio. Las siguientes son medidas generales, y pueden producir una disminución en las emisiones contaminantes de fundiciones primarias de aluminio, como las liberaciones de PCDD/PCDF.

4.1 Medidas primarias

Por medidas primarias se entienden las medidas de prevención de contaminación que evitan o disminuyen la formación y liberación de las sustancias establecidas (material particulado, fluoruros, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dióxido de azufre, dióxido

de carbono, monóxido de carbono, y perfluorocarbonos). A veces se las denomina medidas de optimización o integración del proceso. La prevención de la contaminación se define como “el uso de procesos, prácticas, materiales, productos o energía que evitan o disminuyen la creación de contaminantes y desechos, y reducen el riesgo total para la salud humana o el medio ambiente” (véase la sección III.B de estas directrices). Cabe señalar que no se han determinado medidas primarias para PCDD/PCDF.

En el caso de fundiciones nuevas, una medida importante para prevenir la contaminación es utilizar la tecnología de precocción en lugar de la tecnología Söderberg, para la fundición de aluminio (World Bank 1998). El uso de celdas de ánodos precocidos con picado central de alúmina, con puntos múltiples de alimentación automática, se considera una mejor técnica disponible para la producción de aluminio primario (European Commission 2001, p. 325).

“Los alimentadores puntuales proporcionan una alimentación gradual y más precisa, que permite un mejor funcionamiento de la celda. Generalmente se ubican en el centro de la celda y, por lo tanto, es menos la difusión necesaria para llevar la alúmina disuelta a los puntos de reacción anódica. La adición controlada de cantidades discretas de alúmina mejora el proceso de disolución, que ayuda a aumentar la estabilidad y el control de la celda, reduce los efectos anódicos, y disminuye la formación de lodo sin disolver en el cátodo. En la jerga empresarial moderna, los alimentadores puntuales permiten el suministro de alúmina “usto a tiempo” para que el funcionamiento de la celda sea óptimo. Los dispositivos de alimentación puntual se van mejorando a medida que los controladores de celda se hacen más precisos” (BCS Inc. 2003, p. 47).

La industria también está adoptando controladores de proceso avanzados para reducir la frecuencia de los efectos anódicos y controlar variables de operación, en particular, la química del baño y la saturación de la alúmina, a fin de que las celdas se mantengan en óptimas condiciones (BCS Inc. 2003).

Las medidas primarias que pueden ayudar a reducir la formación y liberación de sustancias son (European Commission 2001, p. 326, 675–676):

1. Un sistema establecido para gestión ambiental, control de operación y mantenimiento
2. Control informatizado del proceso de electrólisis a partir de bases de datos de las celdas activas y vigilancia continua de los parámetros de operación de la celda para disminuir el consumo energético y reducir el número y duración de los efectos de ánodo
3. En caso de que deba reducirse el SO_2 por efectos ambientales a escala local, regional o de gran alcance, emplear, si es posible, carbono con bajo contenido de azufre para los ánodos o pasta anódica, o bien un sistema de depuración de SO_2

4.2 Medidas secundarias

Se entiende por medidas secundarias las tecnologías o técnicas de control de contaminación, que a veces se describen como tratamientos de fin de proceso. Cabe señalar que las siguientes medidas secundarias no se consideran específicas para las liberaciones de PCDD/PCDF, sino para las liberaciones de contaminantes en general.

Se ha comprobado que las siguientes medidas reducen de manera efectiva las liberaciones de la producción primaria de aluminio y deberían considerarse mejores técnicas disponibles (European Commission 2001, p. 326, 675–676):

1. Preparación del alimento: Moler y mezclar la materia prima en un recinto cerrado, con sistemas de extracción, uso de filtros de tela.
2. Celdas totalmente cubiertas con campanas, conectadas a un sistema escape de gases con filtros, cubiertas de celdas robustas, velocidad de extracción adecuada, sistema de enfriamiento sellado para los residuos de ánodo.
3. Captación continua de vapores de celdas superior al 99%, disminución del tiempo necesario para abrir las cubiertas y cambiar los ánodos.
4. Los gases del proceso primario de fundición deberían tratarse para eliminar polvo, fluoruros y fluoruro de hidrógeno mediante un depurador de alúmina y filtros de tela. La eficiencia total del depurador para fluoruro debería ser de >99.8%, y la alúmina capturada debería emplearse en las celdas electrolíticas.
5. Uso de quemadores con baja emisión de NO_x o a base de oxcombustibles, control de la combustión de los hornos para optimizar el uso energético y reducir los hidrocarburos aromáticos policíclicos y emisiones de NO_x .
6. Si hay una planta de ánodos integrada, los gases del proceso deberían tratarse con un sistema de depuración de alúmina y filtros de tela, y la alúmina capturada debería utilizarse en las celdas electrolíticas. Los alquitranes de los procesos de mezclado y formación pueden tratarse con un filtro de coque.
7. Destrucción de cianuros, alquitranes e hidrocarburos en cámara de postcombustión si no se han eliminado con otras técnicas de reducción.
8. Uso de depuración húmeda o semi seca para eliminar, de ser necesario, el SO_2 .
9. Uso de biofiltros para eliminar, de ser necesario, los componentes odoríferos.
10. Uso de sistemas de enfriamiento sellados o indirectos.

5. Resumen de medidas

Las tablas 4 y 5 presentan un resumen de las medidas analizadas anteriormente.

■ **Tabla 4. Medidas para plantas nuevas de producción primaria de aluminio**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos alternativos	Debería darse prioridad a los procesos alternativos con menos efectos ambientales que las plantas de producción primaria de aluminio tradicionales.	Ejemplos: <ul style="list-style-type: none"> • Ánodos inertes • Cátodos humectables • Electrodo verticales, electrólisis de baja temperatura • Tecnología de celda drenada • Tecnología carbotérmica • Tecnología de reducción por caolinita 	Estos procesos se encuentran todavía en fase de desarrollo.
Tecnología de precocción	El uso de celdas de precocción con picado central y múltiples puntos de alimentación automática se considera una mejor técnica disponible.		
Niveles de desempeño	Se debería exigir a las nuevas plantas de producción primaria de aluminio cumplir requisitos más estrictos de desempeño y registro, asociados a mejores tecnologías y técnicas disponibles.	Deberían considerarse las medidas primarias y secundarias que figuran en la tabla 5.	No se han establecido requisitos de desempeño para las plantas primarias de aluminio en materia de liberaciones de PCDD.

■ Tabla 5. Resumen de las medidas primarias y secundarias para plantas de producción primaria de aluminio

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Sistema para la gestión ambiental, control de operación y mantenimiento			
Control informatizado del proceso y vigilancia	Disminuir el consumo energético y reducir el número y duración de los efectos de ánodo.		
Selección del alimento: Usar carbono con bajo contenido de azufre para los ánodos o pasta anódica	De ser necesario, controlar las emisiones de dióxido de azufre.	Puede usarse un sistema de depuración de SO ₂ .	
Medidas secundarias			
Preparación del alimento: Moler y mezclar las materias primas en recinto cerrado. Uso de filtros de tela	Evitar las liberaciones de material particulado.		
Celdas totalmente cubiertas con campanas	Usar campanas que cubran las celdas completamente a fin de capturar gases para su evacuación y filtración.		
Captación y tratamiento de vapores	La eficiencia de la captación de vapores debería ser superior al 99%. Los gases deberían tratarse para eliminar polvo, fluoruros y HF mediante un depurador de alúmina y filtros de tela.		El tiempo necesario para abrir las cubiertas y cambiar los ánodos debería ser mínimo.
Uso de quemadores con baja emisión de NO _x o a base de combustibles oxigenados	La combustión del horno debería optimizarse para reducir las emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos y NO _x .		

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Depurador de alúmina	Los gases de proceso de la planta de ánodos deberían tratarse con un sistema de depurador de alúmina y filtros de tela.		La alúmina debería emplearse en las celdas electrolíticas. Los alquitranes pueden tratarse en un filtro de coque.
Cámara de postcombustión	Para destruir cianuros, alquitranes e hidrocarburos aromáticos policíclicos si no se han eliminado con algún otro sistema de reducción.		
Depuración húmeda o semi seca	Para eliminar SO ₂ , de ser necesario.		
Biofiltros	Para eliminar componentes odoríferos, de ser necesario.		

6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF del sector del aluminio primario son <<0.1 ng EQT-/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

AEA Technology Environment. 1999. *Releases of Dioxins and Furans to Land and Water in Europe*. Prepared for Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Germany, on behalf of European Commission DG Environment.

Aluminium Association of Canada. aac.aluminium.qc.ca/anglais/production/index.html.

BCS Inc. 2003. *U.S. Energy Requirements for Aluminum Production: Historical Perspectives, Theoretical Limits and New Opportunities*. Prepared under contract for the United States Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.

Energetics Inc. 1997. *Energy and Environmental Profile of the U.S. Aluminum Industry*. Prepared for the United States Dept of Energy, Office of Industrial Technologies, Maryland. www.oit.doe.gov/aluminum/pdfs/alprofile.pdf.

ESP Environmental Ltd. 2000. *Anglesey Aluminum Dioxin and Furan Emission Survey*. ESP Environmental Ltd, Carmarthenshire, Wales.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Kucherenko A., Kluyev N., Yufit S., Cheleptchikov A. and Brodskj E. 2001. "Study of Dioxin Sources in Krasnoyarsk, Russia." *Organohalogen Compounds* 53:275–278.

New Zealand Ministry for the Environment. 2000. *New Zealand Inventory of Dioxin Emissions to Air, Land and Water, and Reservoir Sources*. www.mfe.govt.nz/publications/hazardous/dioxin-emissions-inventory-mar00.pdf.

SNC-Lavalin Environment. 2002. *Evaluation of Feasibility and Roadmap for Implementing Aluminium Production Technologies That Reduce/Eliminate Greenhouse Gases and Other Emissions*. Prepared for Environment Canada.

UK Environment Agency. 1997. *A Review of Dioxin Releases to Land and Water in the UK*. Research and Development Publication 3. Environment Agency, Bristol, United Kingdom.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

USGS (United States Geological Survey). 2001. *Technological Advancement: A Factor in Increasing Resource Use*. Open-File Report 01-197. pubs.usgs.gov/of/of01-197/html/app2.htm.

Welch B.J. 1999. "Aluminum Production Paths in the New Millennium." *Journal of Metals* 51:5. www.tms.org/pubs/journals/JOM/9905/Welch-9905.html.

World Bank. 1998. "Industry Sector Guidelines – Aluminum Manufacturing." In: *Pollution Prevention and Abatement Handbook*. World Bank, Washington, D.C.

(iii) Producción de magnesio

■ Resumen

El magnesio puede producirse a partir de cloruro de magnesio puro por electrólisis de sales fundidas, o por reducción de los óxidos de magnesio con ferrosilicio o aluminio a altas temperaturas, así como por recuperación secundaria del magnesio (por ejemplo, de residuos de amianto).

En la producción de magnesio, factores como la adición de cloro o cloruros, la presencia de ánodos de carbono, y las altas temperaturas del proceso pueden llevar a la formación de sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, y a su emisión al aire y descarga en aguas.

Entre las técnicas alternativas está la eliminación de la fuente de carbono mediante ánodos sin grafito, y la aplicación de carbón activado. No obstante, los niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles dependen del tipo de proceso y de los controles utilizados para las liberaciones al aire y agua.

1. Descripción del proceso

Son dos los procedimientos principales en la producción del metal de magnesio. En el primero se recupera el cloruro de magnesio de las materias primas y se transforma en metal por electrólisis de sales fundidas. El segundo procedimiento consiste en reducir el óxido de magnesio con ferrosilicio o aluminio a altas temperaturas. A continuación se describen ejemplos de los dos tipos de procedimiento.

También se puede recuperar y producir magnesio a partir de diversas materias primas y materiales de chatarra que contienen este metal (VAMI 2004).

1.1 Proceso de producción de magnesio a partir de materiales con óxido de magnesio

Este proceso permite producir magnesio a partir de materias primas que contienen óxido: magnesita, brucita, y serpentina, entre otras. También se puede producir magnesio utilizando materias primas que contienen sulfato de magnesio solo o mezclado con cloruros, como el agua de mar. En todos los casos, se recicla el cloro generado por la electrólisis y se utiliza para transformar el óxido o sulfato de magnesio en cloruro de magnesio (VAMI 2004).

El proceso de producción de magnesio con óxidos de magnesio se compone de las siguientes etapas (véase la Figura 4):

1. Lixiviación de las materias primas con ácido clorhídrico y purificación de la solución obtenida.
2. Separación de esta solución del producto de cloruro de magnesio en forma de carnalita sintética o mezcla de cloruros.

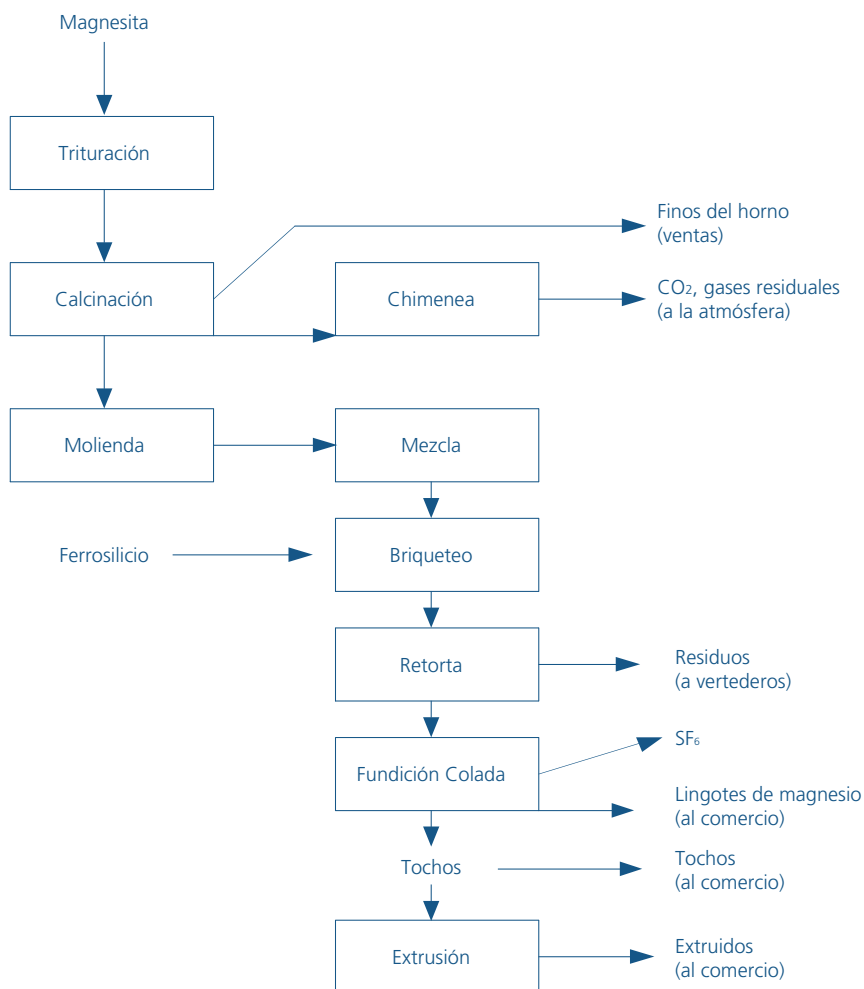
1.2 El proceso Pidgeon (proceso de reducción térmica)

En el proceso Pidgeon se produce magnesio a partir de dolomita calcinada al vacío, a altas temperaturas, y usando silicio como agente reductor. En el proceso, el carbonato de dolomita (magnesio/calcio) finamente triturado se introduce en hornos rotatorios donde se calcina, y donde se expelle el dióxido de carbono, dejando un producto de dolomita calcinada. Después, esta dolomita se pulveriza en un molino de cilindros antes de mezclarse con ferrosilicio y espato flúor finamente molidos. La dolomita fina calcinada, el ferrosilicio y el espato flúor se pesan en lotes y se mezclan en una mezcladora rotatoria. Luego esta mezcla se briquetea en prensas especiales (Noranda Magnesium website).

Luego, las briquetas se transportan a hornos de reducción. La operación de reducción es un proceso por lotes donde se libera magnesio en forma de vapor, que se condensa en la sección enfriada por agua de la retorta fuera de la pared del horno. Después de retirarla del horno, la corona de magnesio de la manga se comprime en una prensa hidráulica. Los residuos de la carga de reducción se extraen de la retorta y se envían a un vertedero.

La Figura 5 ilustra el proceso.

■ **Figura 5. Diagrama del proceso: Planta de magnesio Timminco**



Fuente: Hatch and Associates 1995.

1.3 Diversos procesos y consideraciones

En varios países se utilizan diversos procesos térmicos para la producción de magnesio, que se basan en el proceso Pidgeon creado en Canadá en los años 1940. La dolomita calcinada (CaO:MgO) se funde con ferrosilicio (FeSi) al vacío. El magnesio se libera del fundido en forma de vapor y se condensa fuera del reactor para formar un depósito de metal que se puede sacar y refundir en lingotes para uso industrial. En muchos casos, se usa carbón para calentar la retorta, lo que puede generar emisiones importantes de contaminantes orgánicos persistentes. Se produce una escoria que contiene silicatos de hierro y calcio junto con una proporción de óxido de magnesio sin reaccionar, y también deben eliminarse las cenizas de la combustión del carbón. Si bien se usa agua para enfriamiento, no tiene que contaminarse con los desechos del proceso.

El proceso dependerá de la naturaleza de las materias primas disponibles, el tamaño de la instalación propuesta, y la infraestructura y condiciones locales existentes. En la actualidad existen mejores procesos que disminuyen los efectos ambientales al reducir la demanda de energía. Sin embargo, estos procesos están sujetos a licencia, y no son de libre acceso. En Sudáfrica se ha desarrollado un proceso que opera en forma casi continua, que funciona con presión atmosférica (proceso Mintek) y que puede utilizarse mediante licencia. El control efectivo de las liberaciones depende de una especificación detallada de la planta y de su funcionamiento efectivo para reducir al mínimo el uso de energía y optimizar la conversión de materias primas en producto. Existen diversos métodos y la elección estará determinada por la combinación de condiciones económicas y del proceso correspondientes. Tendrán que instalarse controles apropiados para la contaminación atmosférica y preverse instalaciones adecuadas para manejar y eliminar los residuos sólidos.

La selección de un proceso que disminuya el consumo de energía puede aminorar la producción de contaminantes orgánicos persistentes. Por lo tanto, los procesos continuos tienden a usar mejor la energía ya que se necesita menos calor para que el reactor vuelva a alcanzar temperaturas operativas entre ciclos. Un proceso de uso generalizado, que puede utilizarse mediante licencia, es el proceso Magnatherm, que utiliza la inducción eléctrica para calentar la retorta en lugar de carbón. Como resultado, el combustible no emite contaminantes orgánicos persistentes. Además, este proceso funciona en forma semi continua y con un vacío menor que el del proceso Pidgeon original. El uso de petróleo o combustible gaseoso en vez de carbón puede reducir enormemente la cantidad de contaminantes orgánicos persistentes formados, y se recomienda cuando hay una red de distribución fiable de estos combustibles.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

2.1 Emisiones al aire

2.1.1 Información general sobre emisiones de la producción de magnesio

Las plantas de producción de magnesio generan varios tipos de contaminantes durante el proceso de fabricación, en particular polvo, dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), cloro (Cl₂), ácido clorhídrico (HCl), y, en varios casos, hexafluoruro de azufre (SF₆).

El polvo y dióxido de azufre son emitidos principalmente por las calcinaciones de dolomita y óxido de magnesio (MgO), el secado de gránulos así como el tratamiento de los gases residuales generados por la cloración.

La fuente de las emisiones de óxidos de nitrógeno son las calcinaciones de dolomita y MgO, y el secado de gránulos. El cloro y ácido clorhídrico se liberan durante los procesos de electrólisis y cloración, y en el sistema de tratamiento para los gases residuales de la cloración.

El dióxido de carbono emitido proviene de todo el proceso de fabricación, pero la fuente de descargas de hexafluoruro de azufre es la nave de colada.

2.1.2 Emisiones de PCDD y PCDF

Según pruebas realizadas sobre un proceso electrolítico en una planta de producción de magnesio en Noruega, el proceso principal que provoca la formación de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzoburanos policlorados (PCDF) fue la transformación de gránulos de MgO y coque en cloruro de magnesio (MgCl₂) en horno a 700°C – 800°C, en una atmósfera con Cl₂ (Oehme, Manø and Bjerke 1989; European Commission 2001).

Asimismo, la purificación de MgO mediante HCl y láminas de grafito (“cloración”), o electrólisis de MgCl₂ con electrodos de grafito, representan otras posibles fuentes de formación de PCDD/PCDF (UNEP 2003).

La empresa Timminco Ltd, de Ontario, Canadá, que emplea la tecnología de reducción térmica del proceso Pidgeon, registró liberaciones atmosféricas de PCDD/PCDF de 0.416 g EQT-l/año (CCME 2003).

Los datos proporcionados por Noruega sobre emisiones de dioxinas de una planta que producía magnesio (Norsk Hydro), arrojaron para el periodo 1992-2001 emisiones atmosféricas que fueron aproximadamente de 0.03 a 0.25 mg EQT-l/tonelada de Mg producido. Las emisiones disminuyeron de casi 0.3 mg EQT-l/tonelada de Mg a menos de 0.1 mg EQT-l/tonelada de Mg después de instalado un sistema adicional para limpieza de gases.

(Comunicación personal, participante de Noruega, junio 2006).

La Tabla 6 muestra emisiones al aire de diferentes procesos de producción de magnesio. Adviértase que los valores que se proporcionan como representativos del desempeño de Norsk Hydro son distintos de los antes mencionados.

■ **Tabla 6. Emisiones al aire de PCDD/PCDF de distintos procesos de producción de magnesio**

Tipo de proceso	Fuente	Emisiones ¹ (ng TEQ/Nm ³)	Concentración (µg EQT/t)
	Cloración en el tratamiento de gases residuales	0.8	12
	Gases de escape de la cloración	0.8	28
	Electrólisis/cloración	–	13
Térmico	Reducción, refinación y fundición	0.08	3
Proceso de Norsk Hydro	–	–	<1.0

Hydro Magnesium Canada registró emisiones de PCDD/PCDF al aire por un total de 0.456 g EQT-l/año², que se desglosan en la Tabla 7.

■ **Tabla 7. Emisiones de PCDD/PCDF por fuente: Hydro Magnesium Canada**

Fuente	g EQT/año
Disolución	0.001
Deshidratación	0.112
Electrólisis	0.277
Fundición	0.025
Síntesis de HCl	0.0003
Refundición de Mg	0.050

2.2 Liberaciones a otros medios

2.2.1 Agua

Los principales contaminantes del agua generados durante el proceso de fabricación de magnesio son compuestos metálicos emitidos como sólidos en suspensión. Sin embargo, los hidrocarburos clorados y PCDD/PCDF también se encuentran en las aguas residuales del proceso de electrólisis del magnesio (Tabla 8).

■ **Tabla 8. Liberaciones de PCDD/PCDF al agua de distintos procesos de producción de magnesio**

Tipo	ng/m ³	ug EQT/t de Mg
Electrolítico	100	13
Térmico	0.08	3
Proceso de Norsk Hydro	–	<0.1

Fuente: Hydro Magnesium Canada.

Los datos sobre las emisiones de Norsk Hydro del periodo 1992–2001 proporcionados por Noruega son los siguientes (Comunicación personal, participante de Noruega, junio 2006) (advirtiéndose que los valores presentados anteriormente sobre el desempeño de Norsk Hydro son distintos a estos):

Descargas de dioxinas al agua: Aproximadamente 0.03–0.09 mg EQT-/tonelada de Mg producida.

Descargas de hexaclorobenceno al agua: Aproximadamente 0.02–0.2 g EQT-/ tonelada de Mg producida.

2.2.2 Suelo

Cabría esperar que el proceso de depuración húmeda utilizado para tratar las corrientes de gas generara residuos con PCDD/PCDF. Un sistema de tratamiento de aguas que implique asentar estos residuos en una laguna constituiría entonces una liberación en suelo (UNEP 2003).

■ **Tabla 9. Factores de emisión en la industria del magnesio: PCDD/PCDF**

Factores de emisión: µg EQT/t de Mg

	Aire	Agua	Suelo	Producto	Residuos
Producción con tratamiento térmico de MgO/C en Cl ₂ sin efluentes, tratamiento de gases reducido	250	9,000	n.p.	n.p.	0
Producción con tratamiento térmico de MgO/C	50	30	n.p.	n.p.	9000
Proceso de reducción térmica	3	n.d.	n.p.	n.p.	n.p.

n.p. No procede.

n.d. No determinado.

Fuente: UNEP 2005.

■ **Tabla 10. Factores de emisión en la industria del magnesio: Hexaclorobenceno (HCB)**

Factores de emisión: µg/kg

	Aire	Agua	Suelo	Generadas en el proceso	Volatilizadas desde suelo
Norsk Hydro, Posgrunn ^a	700–3,000	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Norsk Hydro, Bécancour ^a	90–170	2.4	60–120	n.d.	n.d.
Noranda, Asbestos ^b	439	0	8	No estimado	~6

n.d. No determinado.

a. Fuente: Bramley 1998.

b. Fuente: Kemp 2004. Adviértase que estaba funcionando sólo el 50% de la capacidad nominal de la planta, y por lo tanto, se considera que el factor de emisión está exagerado.

3. Procesos alternativos para la producción de magnesio

Aunque la eficiencia y productividad del proceso podrían ser el motor principal del fomento y desarrollo de nuevas tecnologías alternativas, se espera que se tomen debidamente en consideración los aspectos ambientales, lo que implica que eliminar o reducir la formación de contaminantes en su fuente, y la introducción de sistemas efectivos para reducir la contaminación deberían formar parte del diseño inicial del proyecto.

3.1 Proceso de deshidratación de Norsk Hydro

En su planta de Canadá, Norsk Hydro ha desarrollado y puesto en práctica satisfactoriamente una nueva tecnología: un proceso de deshidratación de $MgCl_2$ (European Commission 2001). Las liberaciones de contaminantes, PCDD/PCDF en especial, generadas por este proceso son significativamente menores que las de procesos existentes (Tablas 9 y 10).

La planta produce salmuera de $MgCl_2$ disolviendo roca de magnesita en ácido clorhídrico. Se eliminan las impurezas, como aluminio, hierro y manganeso, del licor de lixiviación por purificación. Luego, la salmuera se somete a evaporación, granulación y secado usando la técnica de lecho fluidizado. El resultado es un producto de $MgCl_2$ anhidro.

Las celdas de electrólisis de la planta funcionan a 400 kA aproximadamente. El $MgCl_2$ en gránulos alimenta las celdas de electrólisis de manera continua desde la planta de deshidratación. Esta operación produce metal de magnesio y gas clorado. Este gas clorado reacciona con hidrógeno para producir ácido clorhídrico, que se recicla para la

etapa de disolución de la magnesita. El magnesio líquido se moldea en condiciones controladas. Los productos finales son metales puros y aleaciones en forma de lingotes y barras para molienda.

3.2 Recuperación del magnesio a partir de residuos de amianto en la planta de Noranda

Una nueva tecnología utilizada por Noranda³ consiste en recuperar el magnesio de los restos de amianto (sitio web de Noranda Inc.). El proceso es el siguiente:

Transformación de la serpentina en magnesio fino: En el método patentado por Noranda, la serpentina pasa por una serie de procesos químicos y fases de filtrado para producir un cloruro de magnesio anhidro de gran pureza, que se reduce electrolíticamente a magnesio y cloro en celdas de última tecnología y alta eficiencia. El cloro se captura y recicla por completo. Las proyecciones de desempeño ambiental de la compañía contemplan niveles de emisiones no superiores a 0.09 g EQT de PCDD/PCDF al aire, usando un sistema de adsorción por carbón activado.

Preparación del alimento: El proceso Noranda comienza con serpentina crisotilo ($3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), un residuo mineral que contiene 23% de magnesio. El material ya se ha extraído y está depositado junto a la planta. La serpentina se tritura, criba y separa por procedimiento magnético. A continuación, el material se lixivia con ácido clorhídrico para obtener salmuera de cloruro de magnesio, junto con un residuo de sílice y hierro.

Purificación de la salmuera: Para purificar la solución de cloruro de magnesio, la salmuera pasa por otras etapas de purificación para eliminar impurezas importantes, como el boro. Las impurezas se extraen de la salmuera por precipitación.

Secado en lecho fluidizado: La salmuera de alta pureza se seca para producir cloruro de magnesio granulado, con lo que se obtiene cloruro de magnesio parcialmente deshidratado (MgCl_2). El HCl se recicla para usarse en la etapa de lixiviación.

Cloración del fundido: Los gránulos de cloruro de magnesio se funden en un electrolito y se tratan con un proceso de cloración que consiste en inyectar HCl gaseoso. El ácido y el agua se recuperan en el proceso para su uso en la etapa de lixiviación.

Celda electrolítica: El magnesio metálico se produce por electrólisis enviando una fuerte corriente eléctrica a través del electrolito. Se lava el gas clorado producido durante la etapa de electrólisis y se combina con hidrógeno; de esta forma se reconvierte en ácido, que será reconvertido en gas y reutilizado en el proceso de cloración.

Colada: El magnesio metálico es vertido y luego moldeado en lingotes.

Purificación de emisiones: La planta de producción está equipada con depuradores de gas en todo el proceso para purificar las emisiones provenientes del proceso y la ventilación. El cloro es capturado por completo, reciclado y devuelto al proceso. Las emisiones se lavan para extraer partículas y otros contaminantes antes de su liberación a la atmósfera. El proceso no libera efluentes líquidos al medio ambiente.

3.3 Procesamiento térmico y recuperación del magnesio a partir de chatarra

Siempre que se recupere el magnesio de la chatarra habrá posibilidad de formación y liberación de las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Pueden usarse diversos tipos de horno.

Al igual que en otros procesos de metales secundarios, la formación de contaminantes se fomenta por combustión incompleta, materiales de alimentación contaminados, control insuficiente del proceso, temperaturas inadecuadas en el horno, y, en particular, reacciones en las zonas de enfriamiento (200°C –450°C).

Las emisiones disminuyen si el proceso se opera de forma eficaz, y si se aplican diversas medidas secundarias, cuando proceda, como postquemadores, enfriamiento rápido de gases, reducción efectiva del polvo, y posiblemente, inyección de carbono. Los polvos y efluentes pueden contener niveles elevados de las sustancias del Anexo C, por lo que tendrán que someterse al tratamiento correspondiente.

4. Medidas primarias y secundarias

4.1 Medidas primarias

El proceso de electrólisis es de sumo interés en lo referente a emisiones de PCDD/PCDF por la presencia de carbón y cloro en el proceso y sus altas temperaturas.

Las medidas primarias que pueden ayudar a reducir la formación y liberación de las sustancias identificadas consisten en eliminar la fuente de carbón sustituyendo el grafito por ánodos sin grafito, posiblemente ánodos metálicos. En la industria del cloro se reemplazaron los ánodos de grafito por ánodos metálicos a principios de la década de 1970, y se formaban cantidades muy pequeñas de PCDF (Eurochlor 2001).

Se ha observado que el nuevo proceso de deshidratación de $MgCl_2$ genera niveles de PCDD/PCDF mucho más bajos (Tablas 9 y 10).

Es de esperar que la planta de producción de magnesio Cogburn, que se ha proyectado en La Columbia Británica con la tecnología STI/VAMI, producirá menos hidrocarburos clorados que en Magnola por la ausencia de cloradores. Para más información, véase la subsección 5.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas son las siguientes:

1. Tratamiento de efluentes mediante técnicas como la nanofiltración y el uso de un sistema de contención diseñado especialmente para residuos y efluentes sólidos.
2. Tratamiento de gases residuales limpiando los gases emitidos por los cloradores con una serie de depuradores húmedos y precipitadores electrostáticos húmedos antes de la incineración, y el uso de filtros de

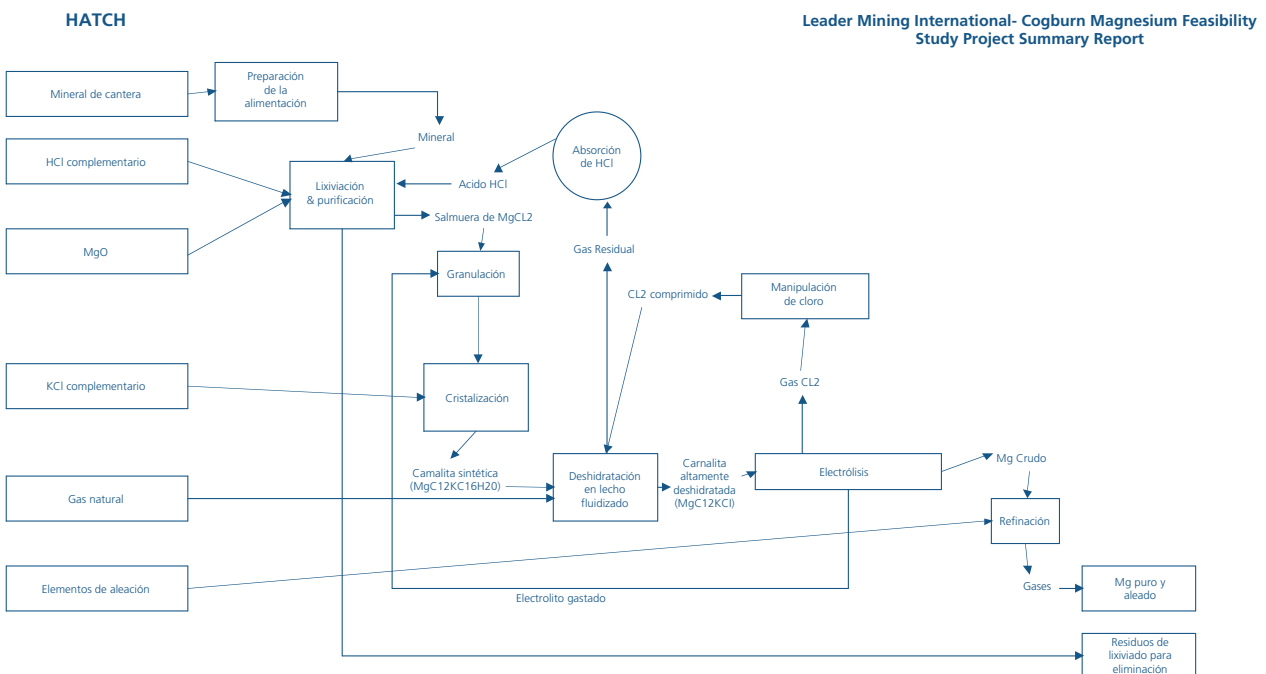
manga para limpiar y eliminar las sales arrastradas del proceso de electrólisis del magnesio.

3. Uso de carbón activado: En el proyecto para producción de magnesio Cogburn hay dos sistemas para eliminar los hidrocarburos clorados, que se basan en la eliminación del carbón activado de los hidrocarburos clorados en efluentes líquidos.

5. Nuevas investigaciones

Se espera que el proyecto de producción de magnesio Cogburn en la Columbia Británica utilice la tecnología para celdas electrolíticas STI/VAMI para la descomposición de $MgCl_2$ en metal de magnesio y gas clorado (Figura 6). En la industria actual del magnesio, este proceso se realiza en celdas electrolíticas monopolaes sin membrana. La tecnología STI/VAMI se basa en un concepto de flujo continuo en el que todas las celdas de la sala de celdas están conectadas. Cada celda se alimenta por separado. El magnesio y el electrolito pasan de una celda a la otra por un sistema de canales cerrados. Se recolecta el magnesio al final de la línea de producción en una celda de separación, y se extrae por sifón para moldearlo en la nave de colada. Este sistema se usa actualmente en la planta Magnesio del Mar Muerto, en Israel (Hatch and Associates 2003).

■ **Figura 6 Organigrama simplificado: Planta de producción de magnesio Cogburn**



Fuente: Hatch and Associates 2003.

6. Resumen de medidas

Las Tablas 11 y 12 presentan un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 11. Resumen de medidas primarias para plantas de magnesio**

Medida	Descripción	Consideraciones
Procesos alternativos	Se debería dar prioridad a los procesos alternativos con menos efectos ambientales que los procesos tradicionales para fabricación de magnesio.	Ejemplos: <ul style="list-style-type: none"> • Proceso de deshidratación de salmuera de $MgCl_2$, de Norsk Hydro • Eliminación de fuente de carbono: reemplazar ánodos de grafito por ánodos sin grafito
Calidad del alimento	Una mayor disponibilidad de chatarra y otras materias primas con magnesio haría su uso atractivo para la fundición. Las fundiciones deberían asegurarse de usar sólo chatarra de buena calidad, sin contaminantes.	
Técnicas de pretratamiento	Las calcinaciones de dolomita origina una cantidad significativa de polvo.	El uso de un calcinador de suspensión de gas podría reducirla de forma significativa.

■ **Tabla 12. Resumen de medidas secundarias para plantas de magnesio**

Medida	Descripción	Consideraciones
Tratamiento de gases residuales	Los gases residuales de los hornos de cloración en plantas de magnesio contienen contaminantes como PCDD, PCDF e hidrocarburos clorados.	Con depuradores húmedos y precipitadores electrostáticos húmedos se eliminan los aerosoles. Luego, en la incineración se destruyen PCDD/PCDF y otros compuestos orgánicos volátiles. También se utiliza carbón activado para adsorber contaminantes.
Tratamiento de efluentes	Las aguas residuales recolectadas de las diversas secciones de la planta de magnesio, como efluentes de depuración derivados de la etapa de cloración, contienen PCDD/PCDF e hidrocarburos clorados.	Retirar los sólidos por floculación, sedimentación y filtración, y luego inyectar carbón activado para eliminar los contaminantes.

7. Niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones de HCB de la producción de magnesio

No se han determinado niveles asociados a mejores técnicas disponibles para el HCB emitido por los distintos procesos de producción de magnesio.

Referencias

Bramley M.J. 1998. *Dioxin and Hexachlorobenzene Releases from Magnesium Production in North America: Lessons from Noranda's Magnola Project in Asbestos, Quebec*. Greenpeace, Canada.

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2003. *Status of Activities Related to Dioxins and Furans Canada-Wide Standards*. CCME, Winnipeg.
www.ccme.ca/assets/pdf/d_f_sector_status_rpt_e.pdf.

Eurochlor. 2001. *Effect of Dioxins on Human Health*.
www.eurochlor.org/chlorine/issues/dioxins.htm.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.
eippcb.jrc.es.

Hatch and Associates. 1995. *Addendum to Primary Non-Ferrous Smelting and Refining Sector in Canada: Magnesium*. Prepared for Environment Canada.

Hatch and Associates. 2003. *Binder No. 1 Project Summary For Production Feasibility Study For Cogburn Magnesium Plant*. Prepared for Leader Mining International.
www.leadermining.com/Binder_No1_Project_Summary.pdf.

Noranda Inc. *Noranda Magnesium – A Production Breakthrough*.
my.noranda.com/Noranda/magnesium/Introducing+Noranda+Magnesium/A+Production+Breakthrough/_A+Production+Breakthrough.htm.

Noranda Magnesium. *Magnesium Production: Thermal Reduction – Pidgeon Process*.
www.norandamagnesium.com/.

Norsk Hydro. 2001. *Environmental Report 2001, Light Metals: Specific Values*.
www.hydro.com/de/global_commitment/environment/reports/light_metals_main.html.

Oehme M., Larssen S. and Brevik E.M. 1991. "Emission Factors of PCDD/CDF for Road Vehicles Obtained by a Tunnel Experiment." *Chemosphere* 23:1699–1708.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva.
www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

VAMI (Russian National Aluminium-Magnesium Institute). 2004. *Magnesium Production Process from Magnesium Oxide Resources*.
www.vami.ru/processes/magnesium/sposob_proizvod_magnia_is_oksidnogo_siria.htm.

(iv) Producción secundaria de acero

■ Resumen

El acero secundario se produce por fundición directa de chatarra ferrosa en hornos de arco eléctrico. El horno funde y refina una carga metálica de chatarra de acero para producir aceros al carbón, aleados e inoxidables en acerías no integradas. Los materiales de alimentación ferrosos pueden ser chatarra, como vehículos triturados y virutas de metal, o hierro de reducción directa. Además, la chatarra puede destinarse a otros hornos de fundición dentro de la planta y a los sectores de hierro y acero primario.

Parece ser más probable que se formen sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, como PCDD y PCDF, en el proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico por síntesis *de novo* en la combustión de materia orgánica no clorada, como son los plásticos, carbón y partículas de carbono, en presencia de donantes de cloro. Muchas de estas sustancias se encuentran en concentraciones traza en la chatarra de acero, o son materias primas del proceso, como el carbono inyectado.

Las medidas primarias consisten en un manejo y acondicionamiento apropiados de los gases residuales para evitar las condiciones que propician la formación de PCDD/PCDF por síntesis *de novo*. A este respecto cabe señalar el uso de postquemadores, seguidos de un enfriamiento rápido de los gases residuales. Entre las medidas secundarias está la inyección de adsorbente (por ejemplo, de carbón activado) y desempolvamiento de alta eficiencia con filtros de tela.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para la producción secundaria de acero son $<0.1 \text{ ng/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

1.1 Descripción general del proceso

La fundición directa de materiales con contenido de hierro, como chatarra, suele realizarse en hornos de arco eléctrico, que tienen una función y presencia cada vez más importantes en las acerías modernas. El horno funde y refina una carga metálica de chatarra para producir aceros al carbón, aleados e inoxidables en acerías (secundarias) no integradas.

Un horno de arco eléctrico es un recipiente cilíndrico con un hogar refractario en forma de plato y electrodos que bajan desde un techo móvil, en forma de cúpula. El horno está revestido con ladrillos refractarios. Por lo general, las paredes contienen paneles enfriados por agua, que están cubiertos para disminuir la pérdida de calor. Los electrodos también pueden estar equipados con sistemas de refrigeración por agua.

La fabricación de acero en hornos de arco eléctrico consiste en la carga, fundición, refinación, desescoriado y colado de la chatarra. Además de la chatarra de acero, la carga puede contener arrabio y elementos de aleación. A medida que la chatarra se

funde, puede agregarse más material al horno. El horno de arco eléctrico genera calor mediante haciendo pasar una corriente eléctrica entre electrodos a través de la carga en el horno. Esta energía se complementa con gas natural, oxígeno y otros combustibles.

Otras tecnologías empleadas para fundir materiales que contienen hierro son los hornos de cubilote (con aire caliente y frío), hornos de inducción y altos hornos.

Los hornos de cubilote se utilizan para la producción de hierro colado y acero colado. Los cubilotes son hornos verticales que se calientan con coque; las materias primas se cargan por lotes, o a veces en forma continua, con tolvas vibratorias. El calor necesario para fundir los materiales cargados es generado por la combustión de coque y el aire (caliente o frío) que se inyecta por medio de toberas situadas en los costados del horno. La zona en que se produce la fundición se encuentra en el tercio inferior del horno vertical. Con respecto al uso del calor, la operación es parecida a las estufas de carbón. La capacidad de fundición depende principalmente del volumen de aire inyectado para combustión, la cantidad de combustible y el diámetro del horno (Quass, Fermann and Bröker 2000).

Los hornos de inducción son crisoles o canales simples, calentados por una bobina eléctrica externa. Los hornos de inducción de canal se usan principalmente para fundir piezas de grandes dimensiones. La corriente se induce en el metal cargado en el horno para generar calor. Los hornos pueden estar equipados con campanas extractoras de vapores y sistemas de reducción de polvo que pueden usarse durante las operaciones de desescoriado y vertido. Para poder efectuar la carga y colada en un horno de inducción se suele utilizar un sistema de campanas móviles, que son robustas para poder resistir impactos mecánicos. Por otro lado, se usan sistemas de extracción fija o periférica. Para algunos materiales, la eficiencia de este horno puede ser baja pero puede incrementarse, en especial si el material de alimentación es pequeño. Para lograr una mejor eficiencia, las piezas grandes pueden cortarse, lo que permite también una mejor disposición de las campanas para extracción de vapores. Algunos procesos continuos también retienen un resto de material fundido en el fondo del horno entre cargas, si la operación lo permite. También pueden funcionar al vacío, por ejemplo, para fundir superaleaciones, acero de alta aleación o metales puros, y en algunos casos, para destilar metales. La temperatura del horno puede controlarse de manera automática para disminuir la producción de vapores al fundir metales volátiles u oxidables como el zinc o aleaciones de zinc. Estos hornos también se usan para mantener el metal fundido para aleación y moldeado. La corriente inducida en estos hornos hace que el metal se agite electromagnéticamente, lo que promueve la mezcla de la carga y de cualquier material de aleación agregado (European Commission 2001).

Un alto horno es un horno vertical que utiliza toberas para inyectar aire caliente o frío dentro de la carga del horno para fundir el contenido. El sinter se carga por la parte superior del alto horno en capas alternadas con coque.

1.2 Alimento de horno

El alimento principal del horno es la chatarra ferrosa, que puede contener chatarra de las mismas acerías (ej., despuntes), cortes provenientes de fábricas de productos de acero (ej., compañías automotrices) y chatarra externa o de postconsumo (ej., vehículos

y artefactos de fin de vida útil) (European Commission 2000). Otros insumos son fundentes y adiciones como elementos desoxidantes o para aleación. También el hierro de reducción directa se usa cada vez más como material de alimentación, tanto por su bajo contenido de gangas como por las variaciones del precio de la chatarra (European Commission 2000).

Se agregan fundentes para que se combinen con los materiales no deseados y formen una escoria, que retira las impurezas (ej., silicio, azufre y fósforo) del acero fundido. Puede añadirse oxígeno al horno para acelerar el proceso siderúrgico. Al final de la hornada, el horno se inclina hacia delante para verter el acero fundido.

1.3 El horno de arco eléctrico

Muchas plantas de acero aumentan su productividad usando un horno de arco eléctrico en la etapa de fundición y un proceso de metalurgia de cuchara para las fases finales de refinación y aleación. En algunos casos, la cuchara de colada se lleva a una estación de desgasificado al vacío donde se reduce el contenido de gas del acero fundido para cumplir los requisitos de calidad.

El acero fundido del horno de arco eléctrico o del proceso de metalurgia de cuchara se moldea en una máquina de colada continua para producir formas moldeadas como bloques, tochos o palanquillas. En algunos procesos, se cortan con autógena y se transportan calientes al laminador en caliente para continuar su procesamiento. Otras acerías tienen hornos de recalentamiento. Se deja que las palanquillas se enfríen, y luego se recalientan en un horno antes de transformarlas en barras u otras formas.

Producir acero a partir de chatarra consume mucha menos energía que a partir de minerales de hierro (EPRI 1997). La fabricación de acero en hornos de arco eléctrico es una importante actividad de reciclaje que ayuda a recuperar los recursos del acero y a disminuir los desechos.

El uso de hornos de arco eléctrico en la producción de acero representa tres grandes ventajas: los costos de capital para la fabricación de acero son menores, se necesita mucha menos energía en comparación con los métodos a base de hornos de coque, altos hornos y hornos básicos de oxígeno, y se evita el uso de hornos de coque.

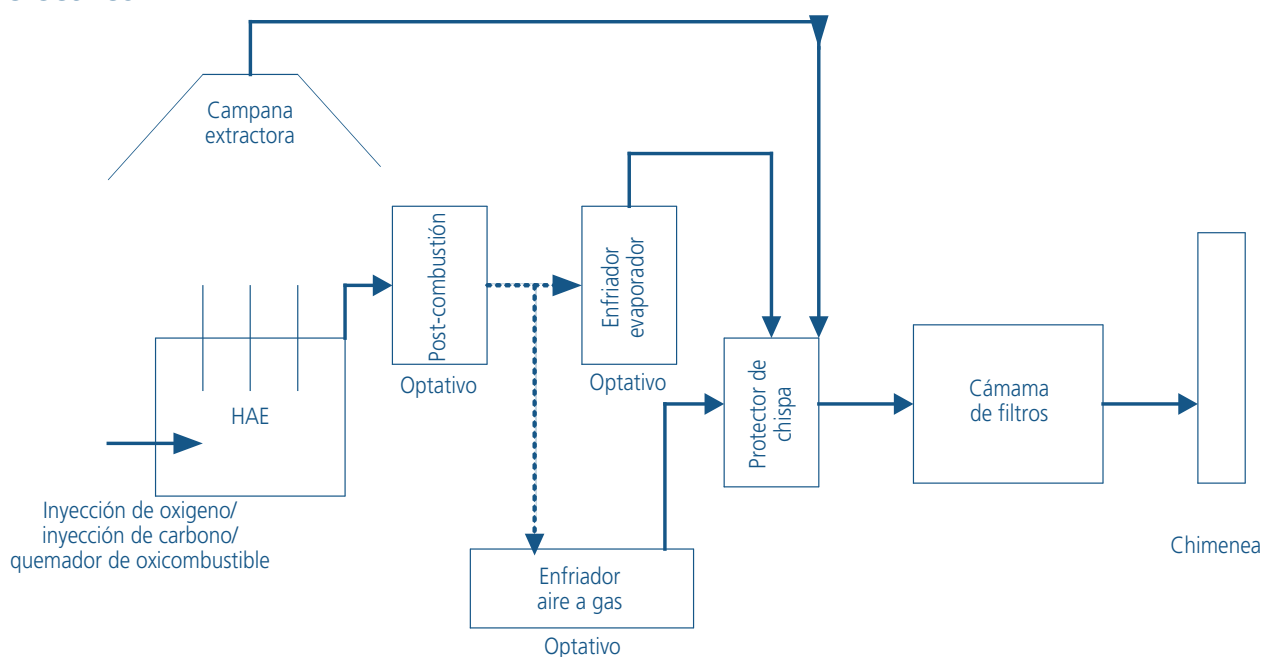
La fabricación de acero en hornos de arco eléctrico es un proceso dinámico por lotes, con tiempos de una hora o menos entre coladas por hornada, salvo para la producción de acero inoxidable y aceros especializados. Es un proceso de cambios constantes, desde retirar el techo del horno para cargar la chatarra de acero, fundirla (con la correspondiente generación de emisiones por los contaminantes que contiene, como aceites y plásticos), refinarla, hasta finalmente, colar el acero. Las condiciones dentro del horno de arco eléctrico y en los procesos de combustión varían durante todo el ciclo de producción de calor.

En los últimos años se han equipado más hornos de arco eléctrico existentes y nuevos con un sistema para precalentar la chatarra de los gases residuales a fin de recuperar energía. La llamada tecnología *shaft* y el proceso Consteel son dos sistemas verificados que se han introducido. El sistema *shaft* puede diseñarse para recalentar el 100% de la chatarra (European Commission 2000).

Algunos hornos de arco eléctrico también utilizan un sistema de pulverización de agua o enfriamiento por evaporación para enfriar los gases residuales calientes, y algunos utilizan intercambiadores de calor que se sitúan antes del dispositivo de control de emisiones. Los hornos pueden estar equipados con controles de contaminación atmosférica secos, semi húmedos o húmedos. Los sistemas de depuración de gases semi húmedos y húmedos pueden constituir fuentes de aguas residuales.

En la Figura 7 se presenta el horno de arco eléctrico y un sistema genérico para control de emisiones con filtros de tela.

■ **Figura 7. Sistema genérico para control de emisiones en hornos de arco eléctrico**



Fuente: William Lemmon and Associates Ltd 2004.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

2.1 Emisiones

2.1.1 Formación de PCDD/PCDF

La fabricación de acero en hornos de arco eléctrico es un proceso por lotes que puede generar emisiones fluctuantes durante el calentamiento de la carga y entre hornadas. Los sistemas de manejo de gases varían según la planta, tanto en configuración como en diseño. Estos factores contribuyen a que las concentraciones contaminantes en los gases residuales del proceso sean variables.

Siendo un proceso metalúrgico de alta temperatura, se genera una material particulado que contiene un vapor fino de metal y óxidos metálicos. Se necesitan sistemas de control

de contaminación de gran eficiencia para eliminar el material particulado de los gases residuales.

Pueden formarse compuestos aromáticos organohalogenados, como dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), clorobenzenos y bifenilos policlorados (PCB), como producto del proceso térmico, y han sido detectados en los gases residuales de hornos de arco eléctrico. Los más importantes de este grupo de compuestos son los PCDD/PCDF. El precalentamiento de la chatarra puede generar mayores emisiones de compuestos aromáticos organohalogenados.

Un informe titulado *Research on Technical Pollution Prevention Options for Steel Manufacturing Electric Arc Furnaces* (William Lemmon and Associates Ltd 2004), elaborado por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente, toma en consideración el documento *Formation of PCDD/PCDF: An Overview* del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (UNEP 2003a), y proporciona una apreciación sobre el mecanismo básico de formación de PCDD/PCDF. A continuación se resume el contenido de este informe.

Los procesos de formación de PCDD/PCDF todavía no se comprenden totalmente. La mayor parte de la información sobre estas sustancias en los procesos de combustión proviene de experimentos de laboratorios, sistemas a escala piloto e incineradoras de desechos urbanos.

Parece ser más probable que se formen sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo, como PCDD y PCDF, en el proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico por síntesis *de novo* en la combustión de materia orgánica no clorada, como son los plásticos, carbón y partículas de carbono, en presencia de donantes de cloro. Muchas de estas sustancias se encuentran en concentraciones residuales en la chatarra de acero, o son materias primas del proceso, como el carbono inyectado. La Ohio Valley Aluminium Company (Ovaco) ha comentado que es un hecho conocido que las emisiones de PCDD/PCDF son muy bajas cuando se usa chatarra con acero inoxidable como materia prima, y que son sólo una pequeña fracción de las emisiones de otros hornos de arco eléctrico. Sugiere que puede deberse a los efectos catalíticos de los metales presentes en el polvo (Ovaco 2006 comunicación).

Hay un dualismo inherente entre la formación y la dechloración de PCDD/PCDF, que se producen en el mismo rango de temperatura y especialmente en las condiciones presentes en el horno de arco eléctrico. En general, la dechloración de PCDD/PCDF parece efectuarse a temperaturas superiores a los 750°C en presencia de oxígeno. Conforme la temperatura aumenta a más de 750°C, la tasa de dechloración se incrementa, mientras que disminuye el tiempo de residencia requerido.

Un aumento en las concentraciones de oxígeno genera una mayor formación de PCDD/PCDF. No se ha determinado si sucede lo mismo con concentraciones elevadas de oxígeno (por ejemplo, con más del 10%

O₂). En condiciones pirolíticas (con deficiencia de oxígeno), la dechloración de PCDD/PCDF se produce a temperaturas superiores a 300°C.

Algunos metales sirven de catalizadores en la formación de PCDD/PCDF. El cobre es un catalizador potente, mientras que el hierro es más débil.

La condensación comienza entre 125°C y 60°C en los PCDD, que son más clorados, y aumenta muy rápidamente al bajar la temperatura. Los PCDF, que son menos clorados, son los últimos en condensarse, lo que explica por qué los tetra y penta PCDF constituyen la mayoría de los PCDF en las pruebas de emisiones en hornos de arco eléctrico.

Los resultados de las pruebas de emisiones arrojaron mayores concentraciones de PCDD/PCDF cuando la temperatura de los gases a la salida del sistema de acondicionamiento de gases o del dispositivo de enfriamiento rebasaba sistemáticamente 225°C, lo que era indicio de que se había producido síntesis *de novo* en el sistema de acondicionamiento de gases.

En todos los casos, los PCDF aportaron entre 60% y 90% de la concentración de PCDD/PCDF en pruebas de emisiones efectuadas en hornos de arco eléctrico.

Dos congéneres de furano, 2,3,7,8-TCDF (tetraclorodibenzofurano) y 2,3,4,7,8-TCDF, aportaron sistemáticamente entre 60% y 75% de la concentración en EQT-I de PCDD/PCDF en pruebas de emisiones en hornos de arco eléctrico. Estos resultados son parecidos a los cálculos teóricos de condensación de PCDD/PCDF, ya que estos dos congéneres serían los últimos en condensarse al disminuir la temperatura de los gases.

Estas últimas conclusiones indican que existe un mecanismo predominante en la formación de PCDD/PCDF, la síntesis *de novo*, en el proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico. Parece probable que las variaciones en la huella de PCDD/PCDF del proceso se deban a variaciones en los componentes de la carga de chatarra, cambios en las condiciones del horno debidos a modificaciones en las prácticas operativas de una a otra hornada o de una a otra planta, condiciones variables en los sistemas de acondicionamiento y limpieza de gases, y diferencias en la eficiencia de la recolección de la cámara de filtros.

Los hornos de inducción eléctrica requieren cargas de chatarra más limpias que las admisibles en hornos de arco eléctrico, y funden su carga usando campos magnéticos. Aunque hay algunas semejanzas con los hornos de arco eléctrico, se considera que la generación de dioxinas y furanos en estas unidades debe ser mucho más baja que la de hornos de arco eléctrico.

Con respecto a las emisiones generadas por hornos de cubilote empleados en la fundición de hierro y acero colados, un informe alemán presentado a *The European Dioxin Emission Inventory Stage II* (Quass, Fermann and Bröker 2000) resumió los resultados de un estudio que recopiló datos de 25 cubilotes de tiro en frío que operaban

en Alemania. En UNEP 2003b se observa que el potencial de los cubilotes de tiro en frío (también denominados cubilotes de aire frío o viento frío) de producir emisiones significativas es mayor que el de otros tipos de horno:

“Para las fundiciones casi no hay datos: las pruebas en Alemania (SCEP 1994) mostraron que los cubilotes de aire caliente y los hornos de inducción equipados con filtros de tela generaron menos emisiones atmosféricas; debería utilizarse un factor de emisión de 0.03 g EQT/t de producto. Los cubilotes de aire frío mostraron arrojaron más emisiones, con un factor de 1 g EQT/t para plantas que emplean filtros de tela.

Unas pocas pruebas en hornos de tambor rotatorio arrojaron también niveles mayores, aplicando un factor de 4.3 g EQT/t a plantas con filtros de tela para la limpieza de gases. Cuando se utilizan cubilotes de aire frío u hornos de tambor rotatorio sin filtros de tela o un equivalente para depurar gases debería usarse un factor de emisiones más alto, de 10 g EQT/t, estos datos deben tomarse en cuenta en caso de chatarra de calidad deficiente (muy contaminada) u hornos poco controlados, con sistemas de limpieza de gases distintos de los filtros de tela.”

Quass, Fermann y Bröker 2000 dedican un trabajo reciente a cubilotes de tiro frío bien controlados que producen hierro para moldeados, equipados con filtros de tela para controlar las emisiones de partículas. Según este estudio, las 18 muestras individuales arrojaron valores en el rango de 0.003 a 0.184 ng EQT-I/Nm³, y los promedios de tres series en cuatro de los seis hornos analizados fueron de menos de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (el valor límite de emisiones para incineradoras de desechos urbanos). También concluye que “en todos los hornos estudiados, el factor promedio de emisiones fue de 0.35 g EQT-I/t de hierro fundido en los hornos, con un valor máximo de 1.45 g EQT-I/t.” Las conclusiones de este capítulo de Quass, Fermann y Bröker 2000 fueron las siguientes:

“A la vista de las concentraciones observadas en los gases residuales, los hornos de cubilote de tiro frío operados en fundiciones de hierro y acero no pueden considerarse fuentes importantes de dioxinas y furanos por las cantidades totales de PCDD y PCDF que emiten. Los resultados de las mediciones coinciden, pues, con unos cuantos datos que ya se conocían antes del comienzo de las investigaciones.

Sin embargo, debe advertirse que las emisiones de Renania del Norte-Westfalia se extrapolaron de sólo seis hornos. No puede decirse con seguridad que estos hornos sean representativos de todos los hornos de cubilote de tiro frío que funcionan en Alemania. En este estudio, se encontraron en un horno concentraciones de PCDD y PCDF en el polvo capturado por el filtro hasta de 12 g EQT-I/kg aproximadamente. Estas concentraciones fueron mucho mayores que las generadas por las plantas cuyas emisiones fueron calculadas (la concentración más alta en el polvo recolectado por los filtros de estas plantas fue de 0.4 g EQT-I). Además, se hizo evidente una gran fluctuación temporal de las concentraciones de PCDD y PCDF en el polvo recolectado por los filtros. Por lo tanto, a pesar del indicio de una correlación positiva entre las

concentraciones en el polvo recolectado por los filtros y las concentraciones en los gases residuales, derivado de los resultados de las mediciones, no es posible asegurar que esta correlación pueda extrapolarse a hornos con mayores concentraciones en el polvo capturado por los filtros. Para determinarlo, sería necesario otro estudio que permita, por ejemplo, medir las concentraciones de PCDD y PCDF en el polvo de los filtros de un horno durante más tiempo.

Considerando la interdependencia observada entre las emisiones de PCDD y PCDF y las cantidades utilizadas de chatarra de fundición y material reciclado, puede concluirse que los contaminantes que se adhieren a la chatarra de fundición (restos de pintura, aceites, etc.) inciden en las emisiones. Para reducir las concentraciones de dioxinas parecería razonable disminuir la cantidad de chatarra de fundición, sin embargo, se reduciría considerablemente la rentabilidad de las fundiciones. Cabe preguntarse si algunos contaminantes de la chatarra de fundición tienen mayor incidencia en la formación y emisión de PCDD y PCDF. De ser así, sería necesario proceder a una eliminación selectiva desde el material que ingresa.”

2.1.2 Investigación de PCDD/PCDF en hornos de arco eléctrico

La mayor parte de las investigaciones sobre la formación y control de PCDD/PCDF se han realizado en hornos de arco eléctrico de Europa. El primer trabajo registrado fue realizado por Badische Stahlwerke GmbH (BSW) en Kehl/Rheim, Alemania, a principios de los años 1990 (Weiss and Karcher 1996). Otras empresas de acero europeas siguieron el ejemplo de BSW por la presión reguladora de los organismos ambientales del país.

A continuación, se presenta un resumen de las conclusiones operativas sobre hornos de arco eléctrico:

- El proyecto de investigación de BSW confirmó que una alta concentración de material con hidrocarburos en la chatarra de acero aumenta de manera significativa las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y de PCDD/PCDF.
- Los resultados de las pruebas de emisiones realizadas por los programas de pruebas de BSW, ProfilARBED, Differdange y Gerdau Ameristeel Cambridge arrojaron mayores concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF cuando la temperatura de los gases a la salida del sistema de acondicionamiento o del dispositivo de enfriamiento era sistemáticamente superior a 225°C, lo que indicaba que se había producido síntesis *de novo* en el sistema de acondicionamiento de gases.
- En todos los casos, los PCDF aportaron entre 60% y 90% de la concentración en EQT-I de PCDD/PCDF en pruebas de emisiones efectuadas en hornos de arco eléctrico en Canadá. En pruebas europeas del mismo tipo se han registrado resultados similares.
- Dos congéneres de PCDF, 2,3,7,8-TCDF y 2,3,4,7,8-TCDF, aportaron sistemáticamente de 60% al 75% de la concentración en EQT-I de PCDD/PCDF

en pruebas de emisiones en hornos de arco eléctrico en Canadá. Se han registrado resultados similares en pruebas europeas de emisiones de hornos de arco eléctrico. Estos resultados son parecidos a los cálculos teóricos de condensación de PCDD/PCDF, ya que estos dos congéneres serían los últimos en condensarse al disminuir la temperatura de los gases.

- Las distribuciones de concentración en EQT-I por congéneres en las pruebas de emisiones de hornos de arco eléctrico en Canadá fueron similares, independiente de las concentraciones totales de PCDD/PCDF en EQT-I.
- Las conclusiones indican que la síntesis *de novo* es el principal mecanismo de formación de PCDD/PCDF en el proceso de elaboración de acero con hornos de arco eléctrico.
- Parece probable que las variaciones en la huella de PCDD/PCDF del proceso se deban a variaciones en los componentes de la carga de chatarra, cambios en las condiciones del horno debidos a modificaciones en las prácticas operativas de una a otra hornada o de una a otra planta, condiciones variables en los sistemas de acondicionamiento y limpieza de gases, y diferencias en la eficiencia de la recolección de la cámara de filtros. No hay suficiente información a disposición pública para determinar la importancia relativa de estos factores.

Un informe preparado por el Gobierno de Japón analizó la ejecución de medidas especificadas en estas directrices para reducir emisiones de PCDD/PCDF y bifenilos policlorados coplanares de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, analizando 19 plantas de 38 acerías japonesas no integradas. La concentración de las emisiones disminuyó entre 80% y 87.2% en las plantas que pusieron en práctica sólo una medida, mientras que se lograron reducciones de 96% o más cuando se aplicaron dos o más medidas. La concentración de emisiones se redujo en un promedio de 84% en comparación con las acerías que no aplicaron medida alguna. La concentración promedio fue de 0.42 ng EQT-I/Nm³. Dos plantas (el 10% de todas las analizadas) lograron el nivel de desempeño alcanzable, que corresponde a menos de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (Government of Japan 2006).

2.1.3 Revisión de la química de la combustión en arco eléctrico y formación de PCDD/PCDF

A continuación se explica la relación de la química de la combustión en hornos de arco eléctrico con la formación de PCDD/PCDF en el horno:

- Los PCDD/PCDF pueden formarse a partir de precursores clorados afines, como bifenilos policlorados, fenoles clorados y bencenos clorados.
- El ambiente dentro de un horno de arco eléctrico para fabricar acero es muy complejo y varía constantemente. La química de la combustión genera condiciones susceptibles de formación de PCDD/PCDF. Los hidrocarburos que ingresan en el horno con la chatarra pueden vaporizarse, romperse, quemarse parcial o completamente, según las condiciones en el horno o en partes del horno durante o después de la carga. Otras fuentes de carbono son el carbono inyectado y los electrodos de grafito. Los procesos duales de formación y

decoloración de PCDD/PCDF pueden ocurrir al mismo tiempo si la concentración y la temperatura propician la formación de algunos congéneres de PCDD o PCDF mientras se decoloran otros.

- Las investigaciones sobre la optimización de la postcombustión interna indican que en operaciones normales de fabricación de acero se dan condiciones que favorecen la formación de PCDD/PCDF (atmósfera rica en oxígeno, partículas de carbono reactivas y temperaturas menores a 800°C) en algunas partes del horno durante la fase de fusión y, posiblemente, durante algún tiempo más. En vista de la presencia de metales que actúan como catalizadores y la posible presencia de cantidades traza de cloro en algunos materiales de carga y fundentes, parecen dadas las condiciones para que se produzca síntesis *de novo*. Al no existir unas condiciones de mezclado ideal, resulta que una parte de los PCDD/PCDF formados saldrán del horno de arco eléctrico con los gases residuales sin haber encontrado temperaturas lo suficientemente altas para que se produzca decoloración.
- El objetivo de la mayoría de las investigaciones sobre la química de la combustión y la postcombustión interna en hornos de arco eléctrico para fabricación de acero ha sido aumentar la productividad aprovechando las ventajas de los combustibles en el interior del horno (hidrocarburos, monóxido de carbono e hidrógeno) para reemplazar la energía eléctrica con energía química, reduciendo así el total de la energía introducida, y disminuyendo los costos de producción por tonelada de producto.
- El precalentamiento de la chatarra puede producir emisiones elevadas de compuestos aromáticos clorados como PCDD/PCDF, clorobenzenos, bifenilos policlorados, así como de hidrocarburos aromáticos policíclicos, y otros productos de la combustión incompleta de la chatarra contaminada con pintura, plásticos, lubricantes u otros compuestos orgánicos. Puede disminuirse la formación de estos contaminantes mediante una postcombustión dentro del horno (a diferencia de la postcombustión externa de los gases residuales) con quemadores de oxígeno adicional instalados para quemar monóxido de carbono e hidrocarburos, con lo que se recupera energía química. Se ha sugerido que precalentar la chatarra aumenta la materia orgánica en los gases de combustión y, posiblemente, también aumenta la formación de compuestos clorados. Lo que suceda con las emisiones depende del equilibrio total de la energía calorífica del sistema de los gases de combustión. En el caso de Ovaco, el precalentamiento de la chatarra disminuye la emisión de PCDD/PCDF (y lo más probable es que aumente la emisión de compuestos orgánicos livianos), debido a que el precalentamiento de la chatarra funciona como un enfriador de gases eficiente. La baja temperatura de los gases en el filtro significa que los compuestos orgánicos pesados se separan con polvo.
- Se ha señalado que la postcombustión interna puede ser una opción más atractiva que la externa para prevenir la formación de PCDD/PCDF.

2.2 Liberaciones de PCDD/PCDF en fuentes de desechos sólidos y aguas residuales

En todo el mundo, la mayor parte de las acerías operan hornos de arco eléctrico con sistemas secos para la limpieza de gases residuales (es decir, filtros de tela para recolectar el polvo), que no producen aguas residuales que requerirían tratamiento.

Algunos hornos de arco eléctrico existentes pueden estar equipados con sistemas semisecos para el control de la contaminación (European Commission 2000). En los sistemas semisecos se aplica agua a los gases residuales del horno a fin de enfriarlos parcialmente y acondicionarlos antes de retirar el material particulado con un precipitador electrostático. Con estos sistemas, si se equilibra el agua aplicada con el agua que se evapora en el proceso de acondicionamiento se puede llegar a no generar descargas de aguas residuales. El agua de enfriamiento libre de contacto es la fuente principal de agua, sin embargo, algunas plantas pueden emplear agua de proceso tratada y el agua de servicio de la planta (EPA 2002).

Las normas de algunas jurisdicciones declaran que la ausencia de descargas es la mejor técnica disponible para sistemas semisecos de limpieza de gases.

En ciertos países de la Unión Europea se utilizan depuradores húmedos para limpiar los gases residuales de hornos de arco eléctrico en algunas acerías. Sin embargo, no hay información de estas instalaciones sobre la cantidad de aguas residuales ni métodos de tratamiento (European Commission 2000). Por consiguiente, no se llegó a conclusiones en cuanto a mejores técnicas disponibles para tratar y disminuir las liberaciones de PCDD/PCDF por aguas residuales de sistemas húmedos de control de la contaminación atmosférica.

Se ha encontrado que hay importantes cantidades de PCDD/PCDF en los residuos pulverulentos captados por el sistema seco de control de contaminación atmosférica que se emplea en hornos de arco eléctrico.

3. Mejoras en el proceso de horno de arco eléctrico y procesos alternativos para la fabricación de acero

3.1 Mejoras en el proceso

El proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico ha experimentado cambios en las últimas décadas. Los estudios sobre la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico y su desarrollo, en especial en Europa se concentran en mejorar el diseño del horno para aumentar su productividad y eficiencia energética, y reducir los costos de fabricación.

Estos estudios tienen una doble motivación: reducir los costos de fabricación del acero, como lo ilustra el incremento de productividad, y mejorar la calidad del producto, como lo ilustran las exigencias de calidad de la industria automotriz. Además, existe una tercera razón: las presiones ambientales. Las mejoras en la productividad han acertado

los tiempos entre coladas, y han aumentado la eficiencia energética y el uso de la energía química.

Se ha respondido a las exigencias de calidad mediante selección de la chatarra, prácticas operativas del horno y mayor uso de procesos complementarios como la metalurgia en cuchara y la desgasificación al vacío. Las presiones ambientales exigen la reducción de emisiones de PCDD/PCDF y de precursores de neblumo, o *smog*, en sustancias como las partículas finas. Una alternativa para estos productores es utilizar una chatarra de mejor calidad con menores niveles de contaminantes (William Lemmon and Associates Ltd 2004).

Una segunda opción es reemplazar parte de la carga de chatarra por hierro de reducción directa o productos similares a base de mineral de hierro, cuyas concentraciones de contaminantes sean menores que las de la chatarra de acero de baja calidad. La producción comercial de hierro de reducción directa está en aumento, al igual que el mercado internacional, por lo que una mayor disponibilidad podría significar que algunos fabricantes de acero que utilizan hornos de arco eléctrico tengan la opción de comprar hierro de reducción directa en vez producirlo *in situ*. Hay muy poca información sobre emisiones de PCDD/PCDF del proceso del hierro de reducción directa pero, dadas las características del proceso, es probable que sean muy bajas. No se dispone de información sobre PCDD/PCDF formados y emitidos por el uso de hierro de reducción directa en la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico.

Una tercera opción es usar metales calientes en la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico. Se prevé que aumentará a medida que los fabricantes de acero vayan logrando ciclos de calentamiento más cortos y mayor productividad (Fruehan 1998). No se dispone de información sobre el efecto de esta alternativa en las emisiones de PCDD/PCDF. Al precalentar parte de la chatarra pueden ahorrarse alrededor de 60 kWh/t; si se precalienta el total de la chatarra se puede economizar hasta 100 kWh/t de acero líquido. La aplicabilidad del precalentamiento de la chatarra depende de las circunstancias, y debe demostrarse en cada caso.

Los avances en el proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico suelen tener ventajas colaterales, como la reducción del material particulado y de las emisiones de PCDD/PCDF, excepto con precalentamiento de la chatarra, como ya se ha mencionado. Por lo general, el objetivo de las prácticas operativas avanzadas es mejorar la eficiencia operativa y energética a fin de aumentar la productividad y, por ende, la producción, y reducir los costos de funcionamiento.

3.2 Procesos alternativos

No hay una tecnología alternativa para la fabricación de acero que reemplace los hornos de arco eléctrico para las operaciones de gran producción de las acerías. Aunque anteriormente se han utilizado electrodos de otros materiales en algunos hornos, en la actualidad no hay alternativas para los electrodos de grafito.

4. Medidas primarias y secundarias

Las medidas primarias y secundarias para reducir emisiones de PCDD/PCDF de hornos de arco eléctrico se explican en la siguiente sección. Una gran parte de este material se ha extraído de William Lemmon and Associates Ltd 2004. Algunas de las medidas también pueden aplicarse a hornos de cubilote y de inducción eléctrica.

No es fácil saber la reducción de emisiones que se puede lograr con la sola ejecución de medidas primarias. Para lograr los niveles de emisión deseados, se requerirá probablemente la aplicación tanto de medidas primarias como secundarias en plantas nuevas y plantas existentes. En Finlay y Peng, 2006, se presenta un estudio de caso sobre la modernización de los sistemas de prevención y control de contaminación en una acería con horno de arco eléctrico.

Las plantas deberían poder aplicar algunas o todas las prácticas de prevención de la contaminación que se exponen a continuación.

4.1 Medidas primarias para emisiones

Las medidas primarias, a menudo llamadas técnicas de prevención de la contaminación, pueden evitar, eliminar o disminuir la formación de PCDD/PCDF, o de clorar PCDD/PCDF, en el proceso de elaboración secundaria de acero.

Como medida general, una parte integral del programa para prevención de la contaminación de una planta debería implicar mejores prácticas ambientales, de funcionamiento y de mantenimiento para cada operación y aspecto del proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico.

A continuación se presentan diversas opciones que constituyen medidas primarias; algunas pueden no ser aplicables en todos los diseños de horno o plantas, y otras pueden requerir más investigación. Esta lista de técnicas se ha elaborado a partir del trabajo realizado con hornos de arco eléctrico, y aunque se espera que los mismos principios sirvan para los hornos de inducción eléctrica y de cubilote, no se han documentado para estas aplicaciones. Sin embargo, el hecho de que la mayor parte de los resultados de pruebas para los otros tipos de horno se encuentren por debajo de 0.1 ng EQT-I/Nm³ indica que una combinación de estas medidas y de las medidas secundarias que figuran más adelante debería tener eficacia para limitar las emisiones.

4.1.1 Calidad de la materia prima

La materia prima principal que se utiliza en el proceso de fabricación secundaria de acero es chatarra de hierro o acero. En la chatarra suelen encontrarse contaminantes como petróleo, plásticos y otros hidrocarburos. Las prácticas de prevención de la contaminación para evitar o disminuir el ingreso de contaminantes en los hornos para fabricación de hierro y acero implican cambios en las especificaciones del material, mejores programas de control de calidad, cambios en los tipos de materia prima (como controlar el uso de chatarra impregnada de aceites o limpiar este tipo de chatarra), y programas para evitar el ingreso de contaminantes.

4.1.2 Operación del horno

Los últimos cambios en las prácticas operativas de hornos de arco eléctrico que se han adoptado para mejorar la eficiencia operativa y energética parecen conllevar beneficios colaterales para reducir los PCDD/PCDF o, en determinadas condiciones, para dechlorarlos. Las prácticas para prevenir la contaminación que parecen disminuir las emisiones de PCDD/PCDF consisten en reducir el tiempo de apertura del techo para la carga, reducir la infiltración de aire en el horno, y evitar o disminuir los retrasos en la operación. La condensación de PCDD/PCDF aumenta rápidamente con temperaturas inferiores a 125°C, comenzando con las dioxinas más cloradas.

4.1.3 Diseño del sistema de acondicionamiento de gases residuales

El acondicionamiento de gases residuales consiste en su recolección, enfriamiento y canalización antes de su limpieza en una cámara de filtros. Las condiciones del sistema de acondicionamiento de gases residuales pueden propiciar la formación de PCDD/PCDF por síntesis *de novo* a no ser que se tomen medidas para evitar estas condiciones. Las técnicas de prevención de la contaminación consisten en un sistema bien dimensionado, maximización de la mezcla de los gases residuales, enfriamiento rápido de gases residuales por debajo de 200°C, y establecimiento y ejecución de buenas prácticas de operación y mantenimiento.

4.1.4 Sistema de monitoreo continuo de parámetros

Con un sistema de monitoreo continuo de parámetros, concebido para optimizar los parámetros adecuados para el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de gases residuales, y mediante procedimientos documentados de operación y mantenimiento, se debería reducir la formación de PCDD/PCDF por síntesis *de novo* en el sistema de acondicionamiento de gases.

4.2 Medidas secundarias para emisiones

Las medidas secundarias, a menudo llamadas técnicas de control de contaminación, pueden resumirse de la siguiente forma:

4.2.1 Recolección del polvo de gases residuales

Capturar todos los gases residuales, incluso las emisiones fugitivas, del área del horno de arco eléctrico es una parte importante del sistema de control. La eficiencia de la recolección de polvo de las emisiones primarias y secundarias del horno debería potenciarse combinando gases de escape con sistema de campanas, o boca de carga con sistema de campanas, o bien instalando un sistema de evacuación de aire.

4.2.2 Recolección de polvo mediante filtros de tela (o cámara de filtros)

Algunos PCDD/PCDF en los gases residuales de hornos de arco eléctrico se adsorben en material particulado fino. A medida que la temperatura del gas disminuye con la temperatura de condensación de los distintos congéneres de PCDD/PCDF, una mayor cantidad de PCDD/PCDF se adsorbe en las partículas finas o se condensa y forma

partículas finas. Unos filtros de tela bien diseñados y operados logran eficiencias de menos de 5 mg de polvo/Nm³. Al disminuir los niveles de polvo también disminuyen las emisiones de PCDD/PCDF.

4.2.3 Sistema de postcombustión externa en conjunto con enfriamiento rápido del agua

Esta técnica fue de la primera técnica de control de emisiones de PCDD/PCDF que se aplicó a la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico. Los sistemas de postcombustión externa se crearon originalmente para quemar el monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H₂) presentes en los gases residuales del horno en una cámara de combustión con revestimiento refractario, por lo general con combustible complementario. Posteriormente, varias acerías con hornos de arco eléctrico adoptaron la tecnología de postcombustión externa para reducir las emisiones de PCDD/PCDF manteniendo la temperatura de postcombustión por encima de 800°C. Con esta técnica de control de emisiones no se puede cumplir en todos los casos la norma pancanadiense de 100 pg EQT-I/Nm³ (0.1 ng EQT-I/Nm³). Puede que para algunas plantas sea difícil instalar cámaras de postcombustión externas y efectuar mejoras en los sistemas de acondicionamiento de gases por problemas de espacio propios del lugar. En algunos hornos, la postcombustión realizada dentro del horno puede contribuir a prevenir emisiones de PCDD/PCDF.

4.2.4 Inyección adsorbente

Esta técnica de control fue creada originalmente para controlar las emisiones de PCDD/PCDF de incineradoras de desechos. La tecnología de inyección de coque de lignito calibrado (el carbón activado es un adsorbente similar) se utiliza en varias acerías europeas con hornos de arco eléctrico para complementar la tecnología de cámara de filtros a fin de obtener bajas concentraciones de PCDD/PCDF en forma constante. Esta técnica también reduce las emisiones de mercurio. Los resultados de pruebas de emisiones registrados de acerías con hornos de arco eléctrico en Europa indican que esta técnica, en conjunto con una cámara de filtros de alta eficiencia, permite sistemáticamente lograr concentraciones de PCDD/PCDF de menos de 0.1 ng EQT-I/Nm³.⁴ No obstante, otras técnicas también pueden ser efectivas para reducir las emisiones a estos niveles.

El coque de lignito calibrado se inyecta en los gases residuales antes de la cámara de filtros. El coque (o carbón activado) adsorbe los PCDD/PCDF presentes en los gases residuales. Una buena mezcla del coque con los gases residuales, y la calibración apropiada del coque (a un tamaño similar a las partículas del flujo de gas) son primordiales para la eliminación óptima de PCDD/PCDF.

La producción de coque de lignito calibrado y el carbón activado no liberan los PCDD/PCDF captados a las temperaturas normales en que el producto se almacena y deposita en vertederos, y son resistentes a la lixiviación. El uso de coque de lignito calibrado como adsorbente aumenta en 2% el volumen de polvo en la cámara de filtros.

Los sistemas de inyección de carbón activado o coque calibrado deberían considerarse en las acerías para reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Las circunstancias del sitio,

como falta de espacio, configuración de los sistemas existentes para controlar emisiones, así como consideraciones de costo pueden influir en la posibilidad de usar de esta técnica.

4.3 Medidas primarias y secundarias para desechos sólidos y aguas residuales

Las medidas que figuran en esta sección se aplican en forma general a hornos de arco eléctrico, de inducción eléctrica y de cubilote. En lo referente a desechos sólidos, la escoria de hornos eléctricos y el polvo del filtro de cualquier horno deberían reciclarse lo más posible. El polvo del filtro proveniente de la producción de acero de alta aleación, cuando sea posible, puede ser tratado para recuperar metales valiosos. Los desechos sólidos excedentes deberían eliminarse de forma tal que no dañe el medio ambiente.

Ovaco ha comentado que depositar el polvo de hornos de arco eléctrico en rellenos sanitarios ya no está permitido en la mayoría de los países industrializados. El método regular consiste en recuperar los metales valiosos por un proceso o procesos de tratamiento separados, fuera de la acería. Si se utiliza chatarra de acero inoxidable como materia prima, se recupera cromo, níquel, zinc y plomo; en los demás casos (para la mayor parte del polvo) sólo se separa zinc y plomo. El contenido de dioxina calculado en el polvo generado en Ovaco es de aproximadamente 1,300 pg EQT-I/g, y representa el 96% de la cantidad total sintetizada en su proceso. Por consiguiente, el polvo de los hornos de arco eléctrico puede ser una reserva importante de PCDD/PCDF y debería tratarse adecuadamente como desecho en lo referente a su contención y eliminación.

Con respecto a aguas residuales, los sistemas de enfriamiento de aguas por circuito cerrado para componentes de hornos eléctricos evitan la generación de agua residual, o garantizan que se recicle lo más posible para disminuir el volumen de agua para tratamiento.

En algunas plantas pueden usarse sistemas semisecos para control de emisiones. Aunque lo más conveniente sería reemplazarlos por colectores de polvo en seco, pueden diseñarse sistemas semisecos para evitar la generación de aguas residuales.

Se pueden generar aguas residuales en instalaciones que emplean sistemas de depuración húmeda. El método preferible consiste en reemplazar los sistemas existentes por colectores de polvo en seco. Si se puede efectuar este reemplazo, las aguas residuales tendrían que ser tratadas. No obstante, no se han encontrado normas para la calidad de aguas residuales tratadas que se refieran a niveles de descarga de PCDD/PCDF u otros parámetros.

5. Resumen de medidas

Las Tablas 13 y 14 presentan un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 13. Medidas para nuevos hornos de arco eléctrico**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Diseño de proceso	Debería darse prioridad a los diseños de proceso comprobados más recientes, tomando en cuenta su desempeño en materia de proceso y emisiones.	Como ejemplo, horno de arco eléctrico nuevo con postcombustión interna.	
Requisitos de funcionamiento	La normativa pertinente debería exigir que los hornos de arco cumplan niveles más estrictos de desempeño y de registro de emisiones.	Deberían considerarse las medidas primarias y secundarias que figuran en la Tabla 14, en especial que los sistemas de ventilación estén bien dimensionados, y el uso y mantenimiento adecuados de filtros de tela de alta eficiencia.	Límites de emisiones alcanzables: <0.1 ng EQT- I/Nm ³ para PCDD/PCDF

■ **Tabla 14. Medidas para hornos de arco eléctrico nuevos y existentes**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Prácticas operativas generales	Una parte integral del programa para prevención de la contaminación de una planta debería incluir mejores prácticas ambientales, de funcionamiento y mantenimiento para cada operación y aspecto del proceso de fabricación de acero con hornos de arco eléctrico.	Aplicable en general. Parte de un concepto integral para prevenir la contaminación.	
Calidad de la materia prima	Se deberían revisar los materiales de alimentación y determinar materiales y/o procedimientos alternativos para disminuir el ingreso de materiales no deseados. Deberían desarrollarse y ponerse en práctica procedimientos documentados para efectuar los cambios adecuados.	Aplicable en general. Las medidas implican cambios en las especificaciones del material, mejores programas de control de calidad, cambios en los tipos de materias primas (como controlar el uso de chatarra impregnada de aceites) y programas para evitar el ingreso de contaminantes.	
Operación de hornos de arco eléctrico	Reducir el tiempo de apertura del techo para la carga, reducir la infiltración de aire en el horno, y evitar o disminuir los retrasos en la operación.	Una ventaja colateral es la reducción de PCDD/PCDF.	Se reducen otros contaminantes, como compuestos aromáticos organohalogenados, monóxido de carbono, hidrocarburos y gases de invernadero.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Acondicionamiento de gases residuales	<p>El diseño e instalación de un sistema bien dimensionado para el acondicionamiento de los gases, con base en los parámetros óptimos del sistema, debería evitar o disminuir la formación de PCDD/PCDF durante este proceso.</p> <p>Se deberían elaborar y ejecutar procedimientos documentados de operación y mantenimiento para potenciar el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de gases.</p>	<p>Se ha asociado una reducción de la síntesis <i>de novo</i> en el sistema de acondicionamiento de gases al enfriamiento rápido de los gases residuales del horno, a temperaturas por debajo del rango de 225°C - 200°C.</p>	
Monitoreo continuo de parámetros	<p>Debería utilizarse un sistema de monitoreo continuo de parámetros, como los Monitores de Opacidad Continua (COM) o Detectores de Fugas en las Mangas (BLD) para asegurar un funcionamiento óptimo.</p> <p>Los operadores deberían preparar un plan de vigilancia particular para el sistema de vigilancia continua de los parámetros y conservar registros que documenten su conformidad con el plan.</p>	<p>Deberían determinarse las correspondencias entre valores paramétricos y emisiones de chimenea (en operación estable). Luego, los parámetros se monitorean comparándolos con los valores óptimos.</p>	<p>Puede preverse un sistema de alerta para que se tomen las medidas correctivas en caso de desviaciones importantes.</p>

Medidas secundarias

Las siguientes medidas secundarias pueden reducir en gran medida las emisiones de PCDD/PCDF y son ejemplos de mejores técnicas disponibles.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Recolección de gases residuales	La eficiencia de la recolección de polvo de las emisiones primarias y secundarias del horno debería potenciarse combinando gases de escape con sistema de campanas, o boca de carga con sistema de campanas, o bien instalando un sistema de evacuación de aire.	Los sistemas de ventilación del nave de fundición deberían estar adecuadamente dimensionados para asegurar la captura de las emisiones del proceso dentro de la planta y su transferencia al sistema de control de contaminación atmosférica.	Puede obtenerse un 98% de eficiencia o más en la recolección de polvo.
Filtros de tela	<p>Con filtros de tela bien diseñados se logran bajas emisiones de polvo.</p> <p>Deberían establecerse procedimientos para la operación y mantenimiento del sistema de recolección de polvo por filtros de tela para que su funcionamiento sea óptimo: mejora de los ciclos de limpieza, uso de los filtros de tela mejorados, y aplicación de prácticas de mantenimiento preventivas.</p> <p>Debería preverse un sistema continuo de control de temperatura y alerta para monitorear la temperatura de entrada de los gases residuales al dispositivo de control de emisiones.</p> <p>Debería preverse un sistema para detectar filtraciones en las mangas con procedimientos de operación y mantenimiento documentados para responder a las alertas del sistema de monitoreo.</p>	Hay correlaciones entre emisiones de PCDD/PCDF y de polvo. A distintas temperaturas de los gases de combustión, los PCDD/PCDF se absorberán y adsorberán en el polvo atrapado en el filtro de tela. Los filtros de manga modernos de dimensiones, funcionamiento adecuados, con un mantenimiento y monitoreo adecuados, pueden obtener emisiones de polvo de <5 mg/Nm ³ .	<p>Mantener los gases residuales en la cámara de filtros a menos de 60°C reducirá la evaporación de PCDD/PCDF y aumentará la captura de los PCDD/PCDF asociados al polvo. El polvo capturado debería manipularse adecuadamente, considerando los contaminantes que contiene.</p> <p>Cerrando las áreas de recolección del polvo de los filtros y los puntos de transferencia se reducen las fugas de polvo.</p> <p>El uso de sistemas de ventilación bien dimensionados y operados reducirá la exposición ocupacional de los trabajadores de la planta a los contaminantes.</p>

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Postcombustión de gases residuales	<p>Puede disminuirse la formación de PCDD/PCDF con una postcombustión dentro del sistema de ductos de gases residuales, o mediante cámara de postcombustión separada.</p> <p>Hay indicios de que la postcombustión interna puede ser una opción más atractiva que la externa para prevenir la formación de PCDD/PCDF.</p>		<p>Los PCDD/PCDF que se han formado en el proceso sufren reacciones de dechloración al quemarse los gases residuales en los quemadores adicionales de oxígeno.</p> <p>Ésta técnica, con un enfriamiento rápido por agua, es una de las primeras técnicas para control de emisiones de PCDD/PCDF que se aplicaron a la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico.</p>
Inyección adsorbente	<p>La inyección de carbón activado o de un material de adsorción similar en los gases residuales antes de los filtros de tela de alta eficiencia en hornos de arco eléctrico en acerías europeas constantemente logró emisiones bajas de PCDD/PCDF, según datos de los proyectos de demostración.</p>		

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Disminución de la generación de desechos sólidos	<p>La escoria de hornos de arco eléctrico y el polvo del filtro deberían reciclarse lo más posible.</p> <p>El polvo del filtro proveniente de la producción de acero de alta aleación, cuando sea posible, puede ser tratado para recuperar metales valiosos.</p> <p>Deberían formularse y aplicarse mejores prácticas de gestión para el acarreo y manipulación de los desechos sólidos que generan polvo.</p> <p>Los desechos sólidos excedentes deberían eliminarse de forma ambientalmente racional.</p>		
Disminución de aguas residuales	<p>Los sistemas de enfriamiento de aguas por circuito cerrado para componentes de hornos de arco eléctrico evitan la generación de agua residual.</p> <p>Reciclar las aguas residuales lo más posible.</p> <p>Se debería tratar el agua residual restante.</p> <p>Pueden diseñarse sistemas semisecos para control de la contaminación a fin de no realizar descargas de aguas residuales.</p> <p>Debería tratarse el agua residual de los sistemas húmedos para limpieza de gases antes de su descarga al medio ambiente.</p>	<p>Estas medidas se vincularían principalmente a prácticas generales de prevención y control de la contaminación en lugar de aplicarse especial o exclusivamente a las emisiones de PCDD/PCDF.</p>	<p>No se encontraron normas sobre límites de PCDD/PCDF en descargas de aguas residuales tratadas como efluentes finales de sistemas húmedos para limpieza de gases residuales.</p>

6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Un nivel de desempeño que se asocia a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF del sector de fabricación secundaria de acero y fundición de hierro y acero es de <0.1 ng EQT-I/Nm³ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2002. *Development Document for Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Iron and Steel Manufacturing Point Source Category*. EPA, Washington, D.C. epa.gov/waterscience/ironsteel/pdf/tdd/complete.pdf.

EPRI (Electric Power Research Institute). 1997. *Understanding Electric Arc Furnace Operations*. EPRI, Centre for Materials Production, Palo Alto, California.

European Commission. 2000. *Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Finlay, P.G., and Peng, H. 2006, Environment Canada, "Steelmaking electric arc furnace facility-Upgrade of pollution prevention and control systems: Case Study" prepared for UNEP Expert Group on BAT/BEP for UPOPs, Draft unpublished presentation made in Geneva, Switzerland, 21 November, 2006

Finlay, P. G., and Smith. K. 2006, Environment Canada, "Implementation of best available techniques and best environmental practices in Canada's National Action Plan for unintentional Persistent Organic Pollutants", Draft unpublished presentation made in Kyoto, Japan, 29 September 2006.

Fruehan R.J. (ed.) 1998. *The Making, Shaping and Treating of Steel* 11th Edition: *Steelmaking and Refining* Vol. AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA.

Government of Japan. 2006. *Report on the PCDD/PCDF/CO-PCB Reduction Measures for the Steel Manufacturing Electric Arc Furnaces in Japan, and the Consequent Effects*.

Quass U., Fermann M. and Bröker G. 2000. *The European Dioxin Emission Inventory Stage II Vol. 2: Desktop Studies and Case Studies*. Report prepared by North Rhine Westphalia State Environment Agency on behalf of European Commission, Directorate General for Environment. europa.eu.int/comm/environment/dioxin/pdf/stage2/volume_2.pdf.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Formation of PCDD/PCDF: An Overview*. Draft. UNEP/POPS/EGB.1/INF/5. UNEP Chemicals, Geneva. www.pops.int/documents/meetings/.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Weiss D. and Karcher A. 1996. *Evaluation and Reduction of Dioxin and Furan Emissions from Thermal Processes: Investigation of the Effect of Electric Arc Furnace Charge Materials and Emission Control Technologies on the Formation of Dioxin and Furan Emissions*. Prepared for BSW.

William Lemmon and Associates Ltd. 2004. *Research on Technical Pollution Prevention Options for Steel Manufacturing Electric Arc Furnaces*. Final Report. Prepared for the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), Contract No. 283-2003. www.ccme.ca/assets/pdf/df_eaf_p2_ctxt_p2_strtgy_e.pdf.

(v) Fundición primaria de metales comunes

■ Resumen

La fundición primaria de metales comunes consiste en la extracción y refinación de níquel, plomo, cobre, zinc y cobalto. Por lo general, las instalaciones de fundición primaria de metales comunes procesan concentrados de mineral. La mayoría de las fundiciones primarias tienen la capacidad técnica de complementar el alimento de concentrado primario con materiales secundarios (ej., reciclables).

Las técnicas de producción pueden comprender procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Se considera que las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo se originan por procesos térmicos metalúrgicos a altas temperaturas, por lo tanto, los procesos hidrometalúrgicos no se analizarán en esta sección sobre mejores técnicas disponibles para la fundición primaria de metales comunes.

La información existente sobre emisiones de PCDD y PCDF provenientes de diversos sectores de fuentes (ej., incineradoras, hornos de arco eléctrico para acero, plantas de sinterización de hierro) sugiere que las tecnologías y técnicas de procesamiento, y el correspondiente acondicionamiento de gases residuales, pueden afectar la formación y la posterior liberación de PCDD/PCDF. Al momento de considerar propuestas para la construcción y puesta en servicio de nuevas instalaciones o procesos para fundir metales comunes, deben considerarse los procesos hidrometalúrgicos, si son técnica y económicamente viables, como alternativa a los procesos pirometalúrgicos.

Las medidas primarias consisten en el uso de procesos hidrometalúrgicos, control de calidad de los materiales y chatarra de alimentación a fin de disminuir al mínimo los contaminantes que ayudan a la formación de PCDD/PCDF, control efectivo del proceso para evitar las condiciones que ayudan a la formación de PCDD/PCDF, y uso de la tecnología de fusión *flash*. Las medidas secundarias establecidas son la depuración de gases de alta eficiencia, la conversión de dióxido de azufre en ácido sulfúrico, recolección efectiva de vapores y gases, y desempolvado de alta eficiencia.

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundiciones primarias de metales comunes son $<0.1 \text{ ng EQT-I /Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

1. Descripción del proceso

Por lo general, los procesos técnicos que participan en la extracción y refinación de metales comunes (níquel, plomo, cobre, zinc y cobalto) se desarrollan como se muestra en la Figura 8. Las principales tecnologías de recuperación de metales utilizadas para producir metales refinados pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Las tecnologías pirometalúrgicas utilizan calor para separar los metales requeridos de los materiales no deseados. Estos procesos aprovechan las

diferencias de potencial de oxidación, punto de fusión, presión del vapor, densidad y miscibilidad entre los componentes una vez fundidos.

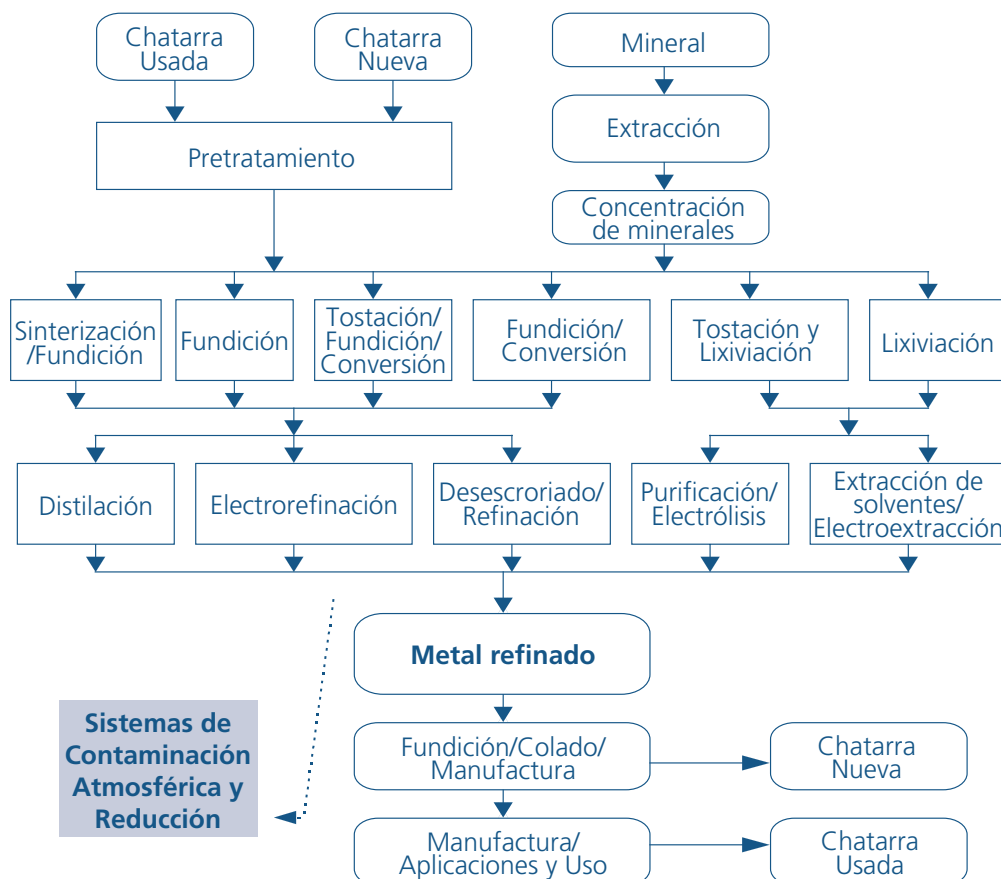
2. Las tecnologías hidrometalúrgicas utilizan las diferencias de solubilidad y propiedades electroquímicas entre los componentes en solución acuosa ácida para separar los metales requeridos de los materiales no deseados.
3. Las tecnologías vapometalúrgicas se aplican en el proceso de carbonilo de Inco donde las aleaciones de níquel se tratan con gas de monóxido de carbono para formar carbonilo de níquel.

Las plantas de fundición primaria de metales comunes procesan generalmente concentrado de mineral. La mayoría de las fundidoras primarias tienen la capacidad técnica de complementar el alimento de concentrado primario con materiales secundarios (ej., reciclables).

La Figura 8 presenta un diagrama de flujo con los principales procesos de producción correspondientes a la fundición y refinación primarias.

Se considera que las sustancias del Anexo C del Convenio de Estocolmo se originan por procesos térmicos metalúrgicos a altas temperaturas, por lo tanto, los procesos hidrometalúrgicos no se analizarán en esta sección sobre mejores técnicas disponibles para la fundición primaria de metales comunes.

■ **Figura 8. Diagrama de flujo genérico para la fundición primaria de metales comunes**



En países en desarrollo y países con economías en transición se realizan a veces actividades de recuperación de metal en instalaciones pequeñas y artesanales. Estos procesos artesanales pueden constituir fuentes importantes de contaminación y afectar la salud humana. El aluminio, antimonio, cobre, estaño, hierro, manganeso, mercurio, oro, plata, plomo, tungsteno y zinc son metales que se producen en actividades de recuperación en instalaciones pequeñas y artesanales. Es habitual que en estas actividades no se realicen controles de contaminación, por lo tanto, pueden ser fuentes de las sustancias del Anexo C.

Estas técnicas no se consideran mejores técnicas disponibles ni mejores prácticas ambientales. No obstante, como mínimo deberían reunir condiciones adecuadas de ventilación y manipulación de materiales para disminuir la exposición de seres humanos a contaminantes derivados.

2. Fuentes de las sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

Las fundidoras primarias de metales comunes pueden ser fuente de las sustancias del Anexo C. La formación y liberación de estas sustancias a partir de fundiciones primarias son procesos que no se comprenden del todo, y se ha demostrado que las emisiones de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) pueden variar significativamente entre operaciones con procesos similares.

2.1 Liberaciones al aire

2.1.1 Información general sobre emisiones de la fundición de metales comunes

“Los principales problemas ambientales en la producción de la mayor parte de los metales no ferrosos a partir de materias primas primarias son la emisión potencial al aire de polvo y metales o compuestos de metales, y de dióxido de azufre en caso de tostación y fundición de concentrados de sulfuro, o cuando se usa azufre que contiene combustibles u otros materiales. Por consiguiente, la captura de azufre y su conversión o eliminación es un factor importante en la producción de metales no ferrosos. Los procesos pirometalúrgicos son fuentes potenciales de polvo, vapores fugitivos y metales de hornos, reactores y de los canales y cucharas de colada durante el transporte del material fundido” (European Commission 2001).

2.1.2 Emisiones de PCDD y PCDF

“Hay poca información publicada sobre los mecanismos de formación de dioxinas y furanos provenientes del sector de la fundición de metales comunes, y la mayor parte se basa en la experiencia de fundiciones secundarias de metales comunes en Europa. Se encuentran algunas afirmaciones generales de que es posible que haya dioxinas y furanos en

algunas de las materias primas usadas en la fundición secundaria de metales comunes, y de que muchas de estas materias primas contienen aceites y materiales orgánicos. La presencia de aceites y otros materiales orgánicos en la chatarra u otras fuentes de carbono (combustibles parcialmente quemados y reductores, como coque) pueden producir partículas finas de carbono o precursores gaseosos que reaccionan con cloruros inorgánicos o cloro orgánicamente ligado en el rango de temperatura de 250°C a 500°C para producir dioxinas y furanos. Este proceso se conoce como *síntesis de novo*, y depende de catalizadores como cobre y hierro. Las dioxinas y furanos se destruyen a altas temperaturas (por encima de 850°C) en presencia de oxígeno, pero aún así puede haber *síntesis de novo* al enfriarse los gases” (Charles E. Napier Co. Ltd 2002).

La información existente sobre emisiones de PCDD y PCDF provenientes de diversos sectores de fuentes (ej., incineradoras, hornos de arco eléctrico, plantas sinterizadoras de hierro) sugiere que las tecnologías y técnicas del proceso, y el correspondiente acondicionamiento de gases residuales, puede afectar la formación y posterior liberación de PCDD/PCDF.

En instalaciones de fundición y refinación de metales comunes de Canadá se realizaron pruebas de emisiones para detectar PCDD y PCDF, y los resultados de este trabajo mostraron que los niveles de concentración variaban según el tipo de sistema de acondicionamiento de gases residuales.

Por lo general, en las fundiciones canadienses se procesan concentrados de sulfuro y, en algunas plantas, también algunos materiales secundarios. El acondicionamiento de gases residuales varía desde una depuración exhaustiva (ej., desempolvamiento de alta eficiencia) y conversión en ácido sulfúrico, a una eliminación del polvo con filtros de tela o precipitadores electrostáticos. Estas plantas producen níquel, cobre, plomo, zinc, y otros metales co-producto. En este programa de pruebas canadiense participaron once plantas, y se realizaron aproximadamente veinte pruebas de emisiones en 16 fuentes distintas. Ninguna planta tenía la misma combinación y configuración de procesos de producción y sistemas de acondicionamiento de gases residuales que otra, lo que complicó aún más cualquier análisis posible. Siendo así, las observaciones que se presentan a continuación son índole general.

Cuando los gases residuales se limpiaban (es decir, se desempolvaban, depuraban) y procesaban en una planta ácida para convertir los gases residuales con alto contenido de dióxido de azufre (SO₂) en ácido sulfúrico, los resultados de las pruebas de emisiones mostraban concentraciones de menos de 5 pg (0.005 ng) EQT-l/m³.⁵

Cuando los gases residuales se desempolvaban con filtros de manga, el rango de concentración típico era de unos pocos pg EQT-l/m³ a <30 pg EQT-l/m³.

Cuando los gases residuales se desempolvaban con un precipitador electrostático, los rangos de concentración eran de 30 pg EQT-l/m³ a 500 pg EQT-l/m³, aproximadamente.

2.2 Liberaciones a otros medios

Sólo existe información sobre liberaciones al aire de las sustancias del Anexo C provenientes de fundiciones primarias de metales comunes. No obstante, es probable que se encuentren en algunos efluentes líquidos provenientes de depuradores húmedos, y en algunos polvos y residuos de depuradores recolectados por los sistemas de reducción de contaminación atmosférica.

3. Procesos alternativos para la fundición de metales comunes

De conformidad con el Convenio de Estocolmo, al considerar propuestas para la construcción de una nueva planta para fundición de metales comunes, se debería dar prioridad a los procesos, técnicas o prácticas alternativas que tienen una utilidad similar pero que evitan la formación y liberación de las sustancias identificadas.

Como se indicó en la Figura 8, en la fundición primaria de metales comunes se emplea toda una serie de procesos. Los procesos utilizados para producir metales comunes en bruto o refinados que provienen de fuentes primarias dependerán en gran medida del mineral o concentrado disponible (ej., mineral de laterita o de azufre), y de otras consideraciones (ej., propiedades del metal o metales requeridos, propiedades de los materiales de alimentación, fuentes de combustible y energía disponibles, consideraciones económicas y de capacidad).

Se considera que la formación y liberación de las sustancias del Anexo C son resultado operaciones metalúrgicas a altas temperaturas. Al considerar propuestas para la construcción y puesta en servicio de nuevas plantas o procesos para la fundición de metales comunes, y cuando sea técnicamente factible, deberían considerarse los procesos hidrometalúrgicos (ej., lixiviación, electroextracción) como alternativa para los procesos pirometalúrgicos (ej., tostación, fundición, conversión, pirefinación).

4. Medidas primarias y secundarias

Hace falta información sobre la liberación de sustancias del Anexo C de las operaciones de fundición primaria de metales comunes. No se han determinado técnicas específicas del sector de la fundición primaria de metales comunes para prevenir o controlar la formación y liberación involuntaria de PCDD/PCDF y otras sustancias del Anexo C. Las siguientes medidas constituyen medidas generales que pueden disminuir las emisiones contaminantes de fundiciones primarias de metales comunes, incluidas las liberaciones de PCDD/PCDF.

No es fácil saber la reducción de emisiones que se puede lograr con la sola ejecución de medidas primarias. Por consiguiente, se recomienda prever la aplicación de medidas tanto primarias como secundarias.

4.1 Medidas primarias

Por medidas primarias se entienden las medidas de prevención de contaminación que evitan o disminuyen la formación y liberación de las sustancias establecidas, a saber PCDD, PCDF, hexaclorobenceno (HCB) y bifenilos policlorados (PCB). A veces se las denomina medidas de optimización o integración del proceso. La prevención de la contaminación se define como “el uso de procesos, prácticas, materiales, productos o energía que evitan o disminuyen la creación de contaminantes y desechos, y reducen el riesgo total para la salud humana o el medio ambiente” (véase la sección III.B de estas directrices).

Las medidas primarias que pueden ayudar a reducir la formación y liberación de contaminantes son las siguientes:

4.1.1 Uso de procesos hidrometalúrgicos

Usar procesos hidrometalúrgicos en vez de procesos pirometalúrgicos cuando sea posible es una forma significativa de prevenir emisiones. Las plantas de electrólisis de circuito cerrado ayudarán a prevenir la contaminación.

4.1.2 Control de calidad del material de alimentación (chatarra)

Debería evitarse la presencia de componentes con aceites, plásticos y cloro en los materiales de chatarra para alimentación a fin de reducir la generación de PCDD/PCDF durante la combustión incompleta o por síntesis *de novo*. El material de alimentación debería clasificarse según la composición y posibles contaminantes. La selección y clasificación para evitar la introducción de material contaminado con materia orgánica o precursores puede reducir el potencial de formación de PCDD/PCDF. Las técnicas de almacenamiento, manejo y pretratamiento estarán determinadas por la distribución según tamaños y la contaminación del alimento.

Los métodos para considerar son los siguientes (European Commission 2001, p. 232):

1. Mezclado suficiente del material para obtener un alimento homogéneo y para que las condiciones sean estables.
2. Eliminación del aceite contenido en el alimento (por ejemplo, eliminación térmica de revestimientos y aceites seguida de postcombustión para destruir cualquier material orgánico presente en los gases residuales).
3. Utilización de técnicas de molienda y trituración con buenos sistemas de extracción y reducción de polvo. Las partículas restantes pueden tratarse con técnicas de separación neumática o por densidad para recuperar metales valiosos.
4. Eliminación de plásticos por desforramiento de cables (por ejemplo, posibles técnicas criogénicas para hacer friables los plásticos y fáciles de separar).

4.1.3 Control efectivo del proceso

Deberían usarse sistemas de control de proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere según parámetros que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF, por ejemplo, mantener la temperatura del horno por encima de 850°C para destruir PCDD/PCDF. Lo ideal sería monitorear constantemente las emisiones de PCDD/PCDF a fin de garantizar menos liberaciones. Para algunos sectores (ej., incineración de desechos) el muestreo continuo de las emisiones de PCDD/PCDF ha sido demostrado, pero aún se está investigando en este campo. A falta de un monitoreo constante de PCDD/PCDF, otras variables como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y los reguladores de tiro para captación de vapores, deberían ser monitoreadas y mantenidas a fin de establecer las condiciones de funcionamiento óptimas para disminuir las emisiones de PCDD/PCDF.

4.1.4 Uso de la tecnología de fusión flash

La alternativa más efectiva para prevenir la contaminación es escoger un proceso que suponga un menor consumo energético y menos emisiones. Cuando se emplean técnicas pirometalúrgicas, la tecnología de fusión *flash* en lugar de tecnologías más antiguas (ej., tostadores, altos hornos) permite reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones. La fusión *flash* también producirá una alta concentración de dióxido de azufre en la corriente de gases residuales, lo que permitiría la fijación o recuperación eficiente del dióxido de azufre antes de la evacuación de los gases residuales.

4.1.5 Máximo incremento del contenido de SO₂ para fijación de azufre

Una medida general implica operar los procesos de forma que se obtenga una máxima concentración de SO₂ en los gases de escape (al procesar minerales o concentrados de sulfuro). Por consiguiente, es importante seleccionar un proceso que utilice aire enriquecido con oxígeno (u oxígeno puro) para elevar el contenido de SO₂ en la corriente de gas del proceso, y reducir el volumen total de la corriente, permitiendo así una fijación eficaz de SO₂.

4.2 Medidas secundarias

Por medidas secundarias se entienden las tecnologías o técnicas de control de contaminación, que a veces se describen como tratamientos de final de proceso.

Las medidas secundarias que pueden contribuir a reducir la formación y liberación de emisiones contaminantes son las siguientes:

4.2.1 Limpieza de gases de alta eficacia y conversión de SO₂ en ácido sulfúrico

Para los gases residuales ricos en SO₂ (normalmente 5%, o más) generados por el procesamiento pirometalúrgico de minerales o concentrados de sulfuro, una prelimpieza de gran eficiencia de los gases residuales seguida de conversión de SO₂ en ácido sulfúrico se consideran en conjunto mejores técnicas disponibles para este tipo de

fuelle. Las concentraciones de PCDD/PCDF con esta combinación de técnicas son <0.005 ng EQT-l/m³.

Para la conversión en ácido sulfúrico, un proceso de contacto doble y adsorción doble se considera una mejor técnica disponible. Un planta de este tipo no debería emitir más de 0.2 kg de SO₂ por tonelada de ácido sulfúrico producida (partiendo de una eficiencia de conversión de 99.7%) (World Bank 1998).

Los gases residuales ricos en SO₂ provenientes de plantas de fundición pasan por un tren de limpieza de gases, que normalmente contiene un sistema de desempolvamiento de alta eficiencia, antes de llegar a la planta de ácido sulfúrico.

Esta combinación de técnicas tiene la ventaja adicional de controlar las emisiones de polvo y de SO₂, además de los PCDD/PCDF.

Otras técnicas para la fijación de azufre, que pueden requerir prelimpieza de gases residuales antes de la conversión o recuperación, pueden contribuir a reducir las emisiones de PCDD/PCDF (World Bank 1998). Estas técnicas son:

1. Recuperación del dióxido de azufre líquido (absorción de los gases residuales limpios y secos en agua o absorción química por bisulfito de amonio o dimetilanilina).
2. Recuperación como azufre elemental, mediante reductores como hidrocarburos, carbono o ácido sulfhídrico. Normalmente, cuando se usa esta técnica, el contenido de azufre en el gas sigue siendo mayor contenido aceptable. Las condiciones de reducción también son favorables para la formación de dioxinas. Así, pues, después de la recuperación, el gas debería someterse a postcombustión y lavarse con técnicas como la depuración.

4.2.2 Recolección de vapores y gases

Las emisiones atmosféricas deberían controlarse en todas las etapas del proceso, incluida la manipulación del material, fundición y puntos de transferencia del material, a fin de controlar las emisiones de PCDD/PCDF. Los hornos sellados son primordiales para contener emisiones fugitivas y permiten recuperar el calor y capturar los gases residuales para reciclarlos en el mismo proceso. Es esencial una buena configuración de las campanas y de la red de tuberías para atrapar los vapores. Puede ser necesario que el horno o reactor estén en recintos cerrados. Si no se puede efectuar una extracción y contención de vapores primarias, el horno debería estar encerrado para poder extraer, tratar y descargar el aire de la ventilación. Por su elevado gasto energético, conviene evitar la captura de vapores en la línea del techo. El uso de reguladores de tiro inteligentes puede mejorar la captación de vapores, reducir el tamaño de los ventiladores y, por lo tanto, disminuir los costos. Los carros o contenedores de carga sellados que se usan en hornos de reverbero pueden reducir significativamente las emisiones fugitivas al aire ya que retienen las emisiones durante la carga (European Commission 2001, p. 187–188).

El uso de hornos de reverbero disminuye constantemente por la dificultad de controlar las emisiones y los altos costos que implica. Es difícil imaginar que se construyan más hornos de reverbero.

(Comunicación Personal, Febrero 2006)

4.2.3 Eliminación del polvo de alta eficiencia

El proceso de fundición genera grandes volúmenes de material particulado con una gran área superficial en la que pueden adsorberse los PCDD/PCDF. Estos polvos y compuestos de metal deberían eliminarse para reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Se deberían emplear técnicas de desempolvamiento de muy alta eficiencia, como por ejemplo, los filtros de cerámica, filtros de tela de alta eficiencia o el tren de limpieza de gases antes de pasar a la planta ácido sulfúrico.

Para controlar el polvo se debería dar preferencia a los filtros de tela en lugar de los depuradores húmedos y precipitadores electrostáticos húmedos o calientes. El polvo derivado del equipo para control de polvo debería devolverse al proceso. El polvo devuelto o recolectado debería tratarse en hornos de alta temperatura para destruir PCDD/PCDF y recuperar metales, de preferencia reciclando el polvo en el mismo proceso de fundición. El polvo capturado que no se recicle se deberá eliminar en un relleno sanitario seguro o de alguna otra forma aceptable.

El funcionamiento de los filtros de tela debería monitorearse constantemente con dispositivos para detectar fallas en las mangas.

5. Nuevas investigaciones

Se ha aplicado la reducción catalítica selectiva para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de diversos procesos industriales. Se ha demostrado que la tecnología modificada de reducción catalítica selectiva (es decir, con una mayor área reactiva) y los procesos de selección catalítica descomponen los PCDD y PCDF contenidos en los gases residuales, probablemente mediante reacciones de oxidación catalítica. Este proceso puede considerarse una técnica en evolución con potencial de reducir de manera efectiva las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes de operaciones de fundición de metales comunes y otras aplicaciones. Sin embargo, la oxidación catalítica, según la selección del catalizador, puede ser susceptible de envenenamiento por metales traza y otros contaminantes de los gases de escape. Se requeriría un trabajo de validación antes de utilizar este proceso.

6. Resumen de medidas

Las tablas 15 y 16 presentan un resumen de las medidas analizadas en las secciones anteriores.

■ **Tabla 15. Medidas para nuevas operaciones de fundición primaria de metales comunes**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos alternativos	Se debería dar prioridad a los procesos alternativos que tienen un potencial menor de afectar el medio ambiente que la fundición pirometalúrgica de metales comunes.	Los procesos hidrometalúrgicos son un medio importante de prevenir emisiones. Se ha comentado que debería considerarse la lixiviación atmosférica directa de concentraciones de sulfuros (concentrados Fe _x a Zn) (Representante de Finlandia, 2006) Las plantas de electrólisis de circuito cerrado contribuirán a prevenir la contaminación.	
Requisitos de desempeño	Las nuevas operaciones de fundición primaria de metales comunes debería permitir alcanzar niveles estrictos de desempeño y registro asociados a mejores técnicas disponibles.	Se deberían considerar las medidas primarias y secundarias que figuran en la Tabla 16.	Los requisitos de desempeño deberían tomar en consideración los niveles alcanzables de emisiones de PCDD/PCDF identificados en la subsección 7.

■ **Tabla 16. Resumen de medidas primarias y secundarias para operaciones de fundición de metales comunes**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Uso de procesos hidrometalúrgicos	Usar procesos hidrometalúrgicos en vez de procesos pirometalúrgicos, cuando sea posible, es una forma importante de prevenir emisiones. Las plantas de electrólisis de circuito cerrado ayudarán a prevenir la contaminación.	El uso de los procesos hidrometalúrgicos dependerá mayormente del mineral y concentrado que se procese (ej., laterita o sulfuro). La combinación de hidrometalurgia y pirometalurgia, técnicas nuevas para metales como níquel y cobre, puede servir para la fundición de zinc. (Representante de Finlandia, 2006)	

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Control de calidad del material de alimentación (chatarra)	La selección y clasificación para evitar introducir material contaminado con materia orgánica o precursores puede reducir el potencial de formación de PCDD/PCDF.	<p>Métodos para consideración:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eliminación del aceite del alimento (ej., eliminación térmica de revestimientos y aceites seguida de postcombustión para destruir cualquier material orgánico en los gases residuales). • Utilización de técnicas de molienda y trituración con buenos sistemas de extracción y reducción de polvo. Las partículas restantes pueden tratarse con técnicas de separación neumática o por densidad para recuperar metales valiosos. • Eliminación de plásticos por desforramiento de cables (ej., posibles técnicas criogénicas para hacer friables los plásticos y fáciles de separar). • El método prioritario sería un mezclado suficiente del material para obtener un alimento homogéneo y para que las condiciones sean estables. <p>(Representante de Finlandia, 2006)</p>	

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Control efectivo del proceso	Deberían utilizarse sistemas de control del proceso para mantener la estabilidad del mismo y para que opere según parámetros que contribuyan a disminuir la generación de PCDD/PCDF. A falta de un monitoreo constante de PCDD/PCDF, otras variables, como temperatura, tiempo de residencia, composición de gases y reguladores de flujo para captación de vapores, deberían ser monitoreadas y mantenidas a fin de establecer las condiciones de funcionamiento óptimas para la reducción de PCDD/PCDF.	Por ejemplo, las temperaturas del horno deberían mantenerse por sobre los 850°C para destruir PCDD/PCDF.	
Uso de la tecnología de fusión <i>flash</i>	Cuando se emplean técnicas pirometalúrgicas, la tecnología de fusión <i>flash</i> en lugar de tecnologías más antiguas (ej., tostadores, altos hornos) permite reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones.	La fusión <i>flash</i> también producirá una alta concentración de SO ₂ en la corriente de gases residuales, que permitiría la fijación o recuperación eficiente de SO ₂ antes de la evacuación de los gases residuales.	

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Maximizar el contenido de SO ₂ para fijación de azufre	Esta medida general implica operar los procesos de forma que se obtenga una máxima concentración de SO ₂ en los gases de escape (al procesar minerales o concentrados de sulfuro), para permitir la recuperación o fijación del azufre. Se debería dar preferencia a procesos que emplean aire enriquecido con oxígeno (u oxígeno puro) para aumentar el contenido de SO ₂ del flujo de gas del proceso y reducir el volumen total de la corriente.		

Medidas secundarias

Estas medidas secundarias pueden reducir eficazmente las emisiones de PCDD/PCDF y deberían considerarse como ejemplos de mejores técnicas disponibles

Limpieza de gases de alta eficiencia y conversión de SO ₂ en ácido sulfúrico	Deberían utilizarse gases residuales ricos en SO ₂ , una prelimpieza de alta eficiencia de los gases residuales seguida de conversión de SO ₂ en ácido sulfúrico, que en conjunto se consideran mejores técnicas disponibles.	Esta combinación de técnicas tiene la ventaja adicional de controlar las emisiones de polvo y de SO ₂ , además de los PCDD/PCDF.	Las concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF con el uso de una limpieza de gases de alta eficiencia y conversión del SO ₂ en ácido sulfúrico son <0.005 ng EQT-/m ³ .
Recolección de vapores y gases	Las emisiones atmosféricas deberían controlarse en todas las etapas del proceso, incluida la manipulación del material, fundición y los puntos de transferencia del material, a fin de controlar las emisiones de PCDD/PCDF.		

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Eliminación de polvo de alta eficiencia	<p>Los compuestos de polvo y metal deberían retirarse para reducir las emisiones de PCDD/PCDF. Se deberían emplear técnicas de desempolvamiento de muy alta eficiencia, como por ejemplo, los filtros de cerámica, filtros de tela de alta eficiencia o el tren de limpieza de gases antes de pasar a una planta de ácido sulfúrico.</p> <p>El polvo del equipo de control de polvos debería devolverse al proceso.</p> <p>El polvo devuelto o recolectado debería tratarse en hornos de alta temperatura para destruir PCDD/PCDF y recuperar metales.</p> <p>El funcionamiento de los filtros de tela debería monitorearse con dispositivos para detectar fallas en las mangas.</p>	<p>Para controlar el polvo, se debería dar preferencia a los filtros de tela en lugar de depuradores húmedos, precipitadores electrostáticos húmedos o calientes.</p> <p>El polvo capturado que no se recicle se deberá eliminar en un relleno sanitario seguro o de alguna otra forma aceptable.</p>	

7. Niveles de desempeños asociados a mejores técnicas disponibles

Los niveles de desempeño que se asocian a mejores técnicas disponibles en materia de emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF para fundiciones primarias de metales comunes son $<0.1 \text{ ng EQT-I/Nm}^3$ (con concentraciones operativas de oxígeno).

Referencias

Charles E. Napier Co. Ltd. 2002. *Generic Dioxin/Furan Emission Testing Protocol for the Base Metals Smelting Sector*. Prepared for Environment Canada.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

World Bank. 1998. *Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: Toward Cleaner Production*. Chapters on copper, nickel, lead and zinc smelting. www-wds.worldbank.org/servlet/WDS_IBank_Servlet?pcont=details&eid=000094946_

Otras fuentes

Gunson A.J. and Jian Y. 2001. *Artisanal Mining in The People's Republic of China*. Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), International Institute for Environment and Development (IIED), September 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme). UNEP News Centre. www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=284&ArticleID=3204&I=en, as read on 20 January 2006.

Xinbin F., Guangle Q., Guanghui L., Ping L. and Shaofeng W. 2005. "Mercury Emissions from Artisanal Zinc and Mercury Smelting in Guizhou, PR China." *Goldschmidt Conference Abstracts 2005: The Geochemistry of Mercury* p. A705.

Xinbin F., Xianwu B., Guangle Q., Guanghui L. and Shunlin T. *Mercury Pollution in Guizhou, China: A Status Report*. pbc.eastwestcenter.org/abstracts2005/abstract2005fengxinbin.htm, as read on 29 December 2005.

- ¹ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3kPa. Para información sobre mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de estas directrices.
- ² Comunicación de Hydro Magnesium Canada en la Electrolytic Magnesium Industry Bi-national Informative Meeting, Montreal, 12 de diciembre de 2000, a cargo de Jean Laperrière, Environment Chief.
- ³ Esta planta se cerró indefinidamente en abril de 2003 debido a las condiciones del mercado.
- ⁴ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen del gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para información sobre mediciones de toxicidad, véase la sección I.C, subsección 3, de estas directrices. Para fuentes metalúrgicas se utilizan las condiciones de concentración operativa de oxígeno de los gases de escape.
- ⁵ 1 pg (picogramo) = 1×10^{-15} kilogramo (1×10^{-12} gramo); 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo), para información sobre mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de estas directrices. Para fuentes metalúrgicas se emplean las condiciones operativas de concentración de oxígeno de los gases de escape.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/7

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Fuentes de combustión doméstica



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

ÍNDICE

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.C

**Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C**

Categoría de fuentes (c) de la Parte III: Fuentes de combustión doméstica

VI.C Fuentes de combustión doméstica	9
Introducción	11
1. Liberaciones de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo derivadas de la combustión doméstica	11
1.1 Emisiones de la combustión de combustibles fósiles y biomasa	11
1.2 Emisiones de la combustión de combustibles mezclados y contaminados.....	13
2. Mejores técnicas disponibles.....	15
2.1 Combustibles y aparatos: Principios generales.....	16
2.2 Aparatos de cocina y calefacción	17
3. Mejores prácticas ambientales	17
3.1 Aparatos de combustión y problemas potenciales.....	17
3.2 Ventilación.....	19
3.3 Inspección y mantenimiento.....	19
3.4 Uso correcto de los aparatos y el combustible.....	21
3.5 Programas de educación, sensibilización y capacitación	22
3.6 Gestión de la combustión doméstica.....	23
3.7 Gestión de las liberaciones hacia otros medios.....	23
4. Aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	23
Referencias	26
Otras fuentes.....	26

Tablas

Tabla 1. Factores de emisión de PCDD/PCDF de la combustión de combustibles fósiles.....	12
Tabla 2. Factores de emisión de PCDD/PCDF y PCB de la combustión doméstica ..	13
Tabla 3. Factores de emisión de PCDD/PCDF y PCB de diversos combustibles	13
Tabla 4. Comparación de factores de emisión de PCDD/PCDF de la combustión de madera limpia y madera contaminada	14
Tabla 5. Aparatos de combustión y problemas potenciales	18
Tabla 6. Programa para la inspección y el mantenimiento	20

Tabla 7.	Relación entre factores de emisión de PCDD/PCDF y contenido de PVC en el material quemado	21
----------	---	----

Tabla 8.	Posibles opciones y obstáculos para la aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para aparatos de combustión domésticos	24
----------	---	----

Cuadros

Cuadro 1.	Sensibilización y educación: estudios de caso	25
-----------	---	----

Resumen

La presente sección trata de la combustión de madera, carbón, gas y otros compuestos orgánicos utilizados principalmente para calefacción y cocina domésticas. La combustión se realiza en estufas o chimeneas de encendido manual y, en el caso de sistemas centrales de calefacción más grandes, en instalaciones de encendido automático. Algunos estudios han demostrado que las fuentes de combustión domésticas liberan cantidades importantes de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo. La cantidad de compuestos liberados depende principalmente del combustible utilizado (desechos domésticos, maderos impregnados de sal marina y madera tratada son fuentes importantes de PCDD/PCDF) y de la eficiencia de la combustión. La eficiencia de la combustión depende de la temperatura de la misma, adecuada mezcla de los gases, el tiempo de residencia, suficiente oxígeno y propiedades del combustible. Por su gran profusión, los aparatos de combustión doméstica contribuyen perceptiblemente a las liberaciones globales de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C.

La quema eficiente de combustibles limpios y no tratados para calefacción y cocina de importancia primordial para reducir la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C. Algunas estrategias para reducir las liberaciones de estas sustancias a partir de fuentes de combustión doméstica son los programas de educación, sensibilización y capacitación sobre el uso correcto de aparatos, uso de combustibles adecuados y efectos de la combustión doméstica no controlada en la salud. Los aparatos pequeños de calefacción y cocina domésticas no suelen contar con las tecnologías de reducción utilizadas comúnmente en establecimientos industriales. No obstante, con el uso y buen funcionamiento de estufas bien diseñadas se pueden lograr reducciones de las sustancias químicas del Anexo C, con la importante ventaja complementaria de mejorar la calidad del aire en interiores.

Los quemadores cerrados de baja emisión, con ductos de escape y uso de leña seca bien curada se consideran mejores técnicas disponibles. En países y regiones donde no se dispone de este tipo de combustibles y aparatos, las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para la combustión doméstica consisten en garantizar la separación de los desechos domésticos de los combustibles para evitar la quema de los primeros en aparatos de calefacción y cocina. En todos los países, debería evitarse el uso de madera tratada o maderos impregnados de sal marina, así como el uso de plásticos como material para encendido o combustible.

En todos los países del mundo cocinar y calentar la vivienda con leña es una práctica común y significativa. Toda acción para reducir las emisiones de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C provenientes de la combustión doméstica también tendrá que tomar en cuenta factores locales, sociales, culturales y económicos. Para subrayar la importancia de tales factores, se exponen casos de Australia y Nueva Zelanda.

Introducción

Los grupos de bajos ingresos utilizan generalmente la biomasa como fuente de energía porque es barata y fácil de obtener. En los países en desarrollo, entre 75% y 80% de la población depende de la madera y biomasa de desecho como combustible para calefacción y cocina. Además, al menos en los próximos cien años no se prevé una disminución significativa de la dependencia de la población rural mundial respecto de la biomasa como fuente de energía; algunos estudios indican que incluso puede incrementarse. En la mayoría de los casos, la biomasa de desechos agrícolas y forestales se utiliza como combustible, pero en ciertas regiones del mundo la demanda de energía del sector doméstico ha comprometido sobremedida los recursos forestales (Karve 2000).

Los métodos para cocinar que utilizan biomasa son por lo regular rudimentarios. En muchos casos, se trata simplemente de estructuras sencillas de tres piedras (es decir, un fuego abierto). No tienen chimenea ni ventilación para humo y hollín, lo que implica que cualquier persona que esté cerca inhalará directamente cualquier emisión. La contaminación del aire en interiores (hollín y humo) derivada del uso deficiente de combustibles de biomasa en viviendas es un problema de salud pública importante. Los estudios realizados en las dos últimas décadas han demostrado que la baja calidad del aire en interiores es una de las principales causas de muerte, enfermedades respiratorias y salud deficiente en mujeres y niños de zonas rurales en países en desarrollo, así como en grupos de bajos ingresos. En la India, por ejemplo, 1,5% del total de decesos de mujeres se atribuye a enfermedades crónicas del sistema respiratorio.

La incidencia de la ceguera y tuberculosis es mayor en mujeres que utilizan cocinas tradicionales que en cualquier otro grupo de población. Varios estudios recientes apuntan hacia una correlación directa entre muerte por enfermedades en lactantes y niños y uso doméstico de madera y biomasa como combustible. (En 2003, la preocupación ante la relación entre sistemas de calefacción y cocina en países en desarrollo, y calidad del aire de interiores y salud pública motivó la formación de la Alianza Mundial para el Aire Limpio Intradomiciliario (<http://www.pciaonline.org/>, consultado en noviembre de 2006), que apoya el desarrollo de tecnologías limpias de bajo costo para aparatos de calefacción y cocina.) Además, los desechos domésticos se utilizan como combustible para cocina y calefacción, y pueden contribuir a la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C derivadas de la combustión doméstica.

1. Liberaciones de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo derivadas de la combustión doméstica

1.1 Emisiones de la combustión de combustibles fósiles y biomasa

Para la calefacción y la cocina domésticas se utiliza una gran variedad de aparatos que van desde pequeños anafres y hogares, hasta grandes estufas y hornos muy sofisticados

alimentados con madera. Como cada país utiliza términos distintos (ej., estufa, calefactor), cuando sea pertinente se utilizará el término genérico “combustor” para hacer referencia a este tipo de aparatos.

Los combustibles fósiles se utilizan generalmente para calefacción doméstica, principalmente en países en desarrollo y en países con economías en transición. El carbón, combustóleo (ligero) y gas (natural) son los principales tipos de combustible fósil empleados para calefacción doméstica.

Se quema combustible fósil en aparatos diversos, desde pequeños hornos de carga manual hasta grandes calderas muy tecnificadas para la calefacción centralizada de los edificios de departamentos. Con un buen funcionamiento y mantenimiento de estos aparatos, la producción de calor se optimiza. En general, se utilizan dos tipos generales de sistemas de calefacción que se distinguen por la forma en que transportan y liberan el calor. El primero son los llamados sistemas de calefacción central, que por lo regular utilizan petróleo o gas, y emplean una unidad grande para calentar agua o aire que luego circula en el edificio liberando su calor hacia varios radiadores o ductos descentralizados. Estos sistemas modernos suelen ser muy eficientes y de combustión muy limpia y si producen residuos para eliminar, son pocos.

El segundo tipo de sistema de calefacción utiliza mayormente combustibles sólidos (carbón) y está constituido por estufas individuales que se colocan en cada habitación del edificio o se empotran en las paredes para dar acceso directo y simultáneo a varias habitaciones. Estas estufas se componen de hornos bastante pequeños, pero que proporcionan un sistema para que el aire pueda circular dentro de la estufa y alrededor del horno. Estos sistemas suelen ser más antiguos, menos eficientes y de combustión menos limpia, y pueden generar cenizas de fondo por el contenido inorgánico del combustible, que deben ser eliminadas. Algunos de estos sistemas también pueden quemar petróleo.

La combustión incompleta pueden generar la formación de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF), que son liberados principalmente al aire. En el caso de la combustión de carbón, los residuos pueden también ser un vector potencial de liberación. La Tabla 1 presenta los factores de emisión provenientes de estudios realizados en Europa.

■ Tabla 1. Factores de emisión de PCDD/PCDF de la combustión de combustibles fósiles

Tipo de aparato	Factores de emisión: μg EQT/TJ de combustible fósil quemado, al aire^a	Concentración en ng EQT/ kg de residuo de ceniza
Estufas de carbón con alto contenido de cloro	15,000	30,000
Estufas de carbón	100	5,000
Estufas de petróleo	10	ND
Estufas de gas natural	1.5	ND

ND no disponible.

a. TJ = terajulio = 1×10^{12} julio.

Fuente: UNEP 2005.

El término biomasa se emplea para describir la materia orgánica natural como madera, paja, cáscara de de coco, cascarillas varias, estiércol, etc., que se utiliza como combustible para calefacción y cocina domésticas. En general, existe considerable variación e incertidumbre respecto a los factores de emisión de la combustión doméstica. A continuación se presenta un resumen de datos existentes al momento de la publicación de estas directrices clasificados por tipo de combustible y tecnología.

En Austria, se realizaron pruebas sobre emisiones de PCDD/PCDF de la calefacción residencial (Thanner and Moche 2002). La evaluación consistió en mediciones de emisiones de tres tipos de estufas de combustible sólido. Los aparatos evaluados en los experimentos fueron una estufa nueva de bajo costo que operaba con todo tipo de combustibles sólidos, una estufa de hierro fundido de coque de aproximadamente 20 años y una estufa de hierro fundido de aproximadamente 10 años. Las mediciones se realizaron con carbón y coque, así como madera; todos estos combustibles eran de la calidad habitualmente encontrada en la venta al por menor. Las muestras fueron tomadas durante un ciclo de calefacción completo, desde el encendido del fuego hasta su extinción. Se analizaron los humos para detectar PCDD/PCDF y bifenilos policlorados (PCB); se tomaron muestras de cenizas y hollín de chimenea al final de cada ciclo de calefacción y se analizó su contenido de PCDD/PCDF y PCB. Los factores de emisión se muestran en las Tablas 2 y 3.

En cenizas y hollín de chimenea se detectaron únicamente pequeñas cantidades de PCDD/PCDF y PCB formados durante la combustión de madera y combustibles fósiles; cerca de 90% de estos contaminantes estaban presentes en subproductos gaseosos y aerosoles. El resto se acumuló principalmente en el hollín, mientras que las cenizas contenían cantidades insignificantes.

Las mediciones en el terreno en condiciones normales (es decir, realistas) y con aparatos que funcionan en la vida real pueden arrojar variaciones mucho más significativas que

si se usa el mismo tipo de estufa e idéntico tipo de combustible. Un proyecto realizado por una institución privada en el que se analizaron siete aparatos de calefacción alimentados con madera registró concentraciones de PCDD/PCDF de 0,09 a 9,0 ng EQT-I/MJ.

■ **Tabla 2. Factores de emisión de PCDD/PCDF y PCB de la combustión doméstica**

Combustible	PCDD/PCDF EQT (I-TEF)	PCDD/PCDF EQT (OMS)	PCB EQT (OMS)
	ng/Nm ³ (0% O ₂) ^a	ng/Nm ³ (0% O ₂)	ng/Nm ³ (0% O ₂)
Madera	0.1–2.0	0.1–2.0	0.01–0.08
Carbón	7.5–38.7	8.0–41.8	1.7–2.4
Coque	0.9–4.4	0.9–4.6	0.03–0.2

Fuente: Thanner y Moche 2002.

a. 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101,3 kPa.

■ **Tabla 3. Factores de emisión de PCDD/PCDF y PCB de diversos combustibles**

Combustible		PCDD/PCDF	PCB	
		EQT-I ng/MJ ^a	EQT- OMS ng/MJ	Σ Ballschmitter* ng/MJ
Madera	Mediana	n=8	n=3	n=3
	Promedio	0.27	0.01	65.2
		0.32	0.01	50.3
Carbón	Mediana	n=8	n=2	n=2
	Promedio	8.80	0.51	64.0
		7.74	0.51	64.0
Coque	Mediana	n=4	n=4	n=4
	Promedio	1.53	0.06	82.0
		1.47	0.06	81.1

* Fuente: Thanner and Moche 2002

a. MJ = megajulio = 1×10^6 julio.

1.2 Emisiones de la combustión de combustibles mezclados y contaminados

El Inventario Europeo de Emisiones revela que la combustión doméstica de madera es una de las que más contribuye a las emisiones de PCDD/PCDF al aire (Berdowski *et al.* 1997). Aunque se ha prestado especial atención a la combustión de madera, se debería tener en cuenta que el material quemado a menudo contiene no sólo madera natural sino también madera de desecho revestida y tratada con diferentes compuestos químicos, entre ellos organoclorados. Los residuos de madera (de desecho e industrial)

suelen contener diversos tipos de contaminantes (arsenato de cobre cromado, pentaclorofenol, creosota, adhesivos, resinas, pintura y otros revestimientos de superficies). También es común utilizar cualquier material combustible, incluidos los desechos (ej., textiles, caucho, plásticos, material impreso, material para embalaje, aceite de desecho, etc.).

La Tabla 4 muestra una comparación entre los factores de emisión de la combustión de madera tratada y de madera no tratada, basada en estudios realizados en diferentes países europeos. Los factores de emisión para liberaciones con residuos se expresan sobre la base de concentraciones medidas en cenizas y no tienen relación alguna con el valor calorífico del combustible.

■ Tabla 4. Comparación de factores de emisión de PCDD/PCDF de la combustión de madera limpia y madera contaminada

Tipo de aparato	Factores de emisión: µg EQT/TJ de biomasa quemada, al aire ^a	Concentración: ng EQT/ kg cenizas residuales
Estufas alimentadas con madera/biomasa contaminadas	1.500	1.000
Estufas alimentadas con madera/biomasa vírgenes	100	10

a. TJ = terajulio = 1×10^{12} julio.

Fuente: UNEP 2005.

En los Estados Unidos se realizaron algunos estudios sobre la combustión doméstica con madera para determinar si hubo formación de PCDD/PCDF (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004). Se analizaron raspados de hollín tomados de chimeneas de estufas de leña de las regiones central, oriental y occidental del país. El promedio total de niveles de PCDD/PCDF en material depositado en chimeneas fue de 8,3 ng/kg en la región oriental, 42,1 ng/kg en la región central y 10 ng/kg en la occidental. Esta enorme variación fue atribuida a las diferencias en el diseño de las diversas unidades y a la contaminación de la madera utilizada como combustible.

Se han detectado niveles medibles de tetraclorodibenzoparadioxinas (TCDD) en hollín de chimenea y en cenizas de fondo de horno de estufas y hogares alimentados con leña. Se ha determinado que los depósitos de chimenea de la combustión doméstica con madera contienen perfiles de congéneres de PCDD/PCDF similares a los de los gases de combustión provenientes de incineradores de desechos urbanos. Esto indica que la madera usada en aparatos de combustión doméstica puede estar altamente contaminada y que pueden estar utilizándose materiales no adecuados, por ejemplo plásticos, como fuentes combustibles.

En la Columbia Británica, Canadá, se analizó el hollín de dos estufas de madera para detectar PCDD. En el hollín de la estufa alimentada con madera impregnada de sal de una zona costera se detectaron niveles de PCDD entre 20 y 90 veces más altos que en

las estufas de zonas no costeras. La concentración de PCDD en cenizas volantes aumentaba junto con la concentración de cloro (de sal marina).

Según los datos de análisis químicos realizados en Polonia, las fuentes domésticas pueden emitir gases de chimenea con una concentración de PCB 3 veces mayor que las fuentes industriales (salvo industrias manufactureras), concentraciones de hexaclorobenceno 2 veces mayores (HCB) y concentraciones de PCDD/PCDF 25 veces mayores. La causa principal de estas concentraciones elevadas de PCDD/PCDF, PCB y HCB es la co-combustión de desechos domésticos con hulla o madera, generalmente en estufas de cocina sencillas o calderas de calefacción (Lassen *et al.* 2002, 2003).

En zonas rurales o suburbanas cercanas a bosques, casas de recreo y también en zonas residenciales se practica la co-combustión de madera o carbón con desechos domésticos. Según datos estadísticos públicos, el valor de la combustión combinada de madera y turba es de 95,000 TJ, pero la contribución de ésta se considera menor. Según estimaciones periciales, cerca del 15% de la cantidad total de madera o carbón quemados se reemplaza por desechos domésticos. La cantidad total estimada de combustible contaminado es de 9,500–19,000 TJ. En Polonia, las concentraciones de PCDD/PCDF en gases de escape de chimeneas de estufas, en donde los desechos domésticos son co-incinerados, varían considerablemente entre 0.32 y 77 ng EQT-I/Nm³. Los factores de emisión respecto a la hulla se ubican entre 17 y 570 mg EQT/Mg. La emisión total anual estimada de PCDD/PCDF en Polonia a partir de fuentes domésticas se calcula de 30 a 85 g EQT-I. El perfil de distribución de masa de congéneres de PCDD/PCDF en gases de escape es similar al que registraron los gases de chimenea de incineradores de desechos.

Las emisiones provenientes de fuentes domésticas se controlan poco. La mayoría de las estufas y hogares funcionan deficientemente, con niveles de oxígeno insuficientes y baja turbulencia de los gases de combustión (por sobrecarga o alimentación con trozos de madera demasiado grandes). En estas circunstancias, la combustión libera no sólo contaminantes gaseosos sino también contaminantes sólidos con PCDD/PCDF, lo que implica su liberación a suelos.

2. Mejores técnicas disponibles

La combustión de gran calidad y eficiente en aparatos de cocina y calefacción es muy importante para reducir la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C. Para combustores cerrados, depende principalmente de la temperatura de la cámara de combustión, turbulencia de los gases de combustión, tiempo de residencia, exceso de oxígeno y el tipo de combustible utilizado. Estos parámetros se rigen por factores como:

- Tecnología de combustión (ej., diseño de la cámara de combustión, tecnología de control del proceso)
- Condiciones de operación (ej., relación aire primario-aire secundario, distribución de las toberas de aire)
- Condición de la carga (carga total o parcial)

- Características del combustible (forma, distribución del tamaño, contenido de humedad)

Toda recomendación respecto a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para aparatos alimentados con biomasa o madera debería tener en cuenta que el uso de biomasa como combustible para cocina y calefacción seguirá siendo, durante muchos años, una práctica común en muchas comunidades de bajos ingresos y rurales. La aplicación de las directrices correspondientes para estos aparatos dependerá de diversos factores, entre ellos los socioeconómicos. Como parte de sus planes de aplicación nacionales, los países deberían realizar evaluaciones para determinar las posibles consecuencias socioeconómicas de la aplicación de cualquier norma o reglamento nuevos.

Reemplazar los aparatos de diseño deficiente por aparatos mejorados que quemen el combustible de manera más eficiente será una estrategia efectiva para reducir las liberaciones de las sustancias del Anexo C, con la ventaja adicional de mejorar la calidad del aire de interiores. Además, algunos estudios han señalado que los diseños mejorados permiten ahorrar de 50% a 80% de combustible en comparación con los diseños tradicionales. Los diseños óptimos para aparatos mejorados pueden economizar combustible, reducir la contaminación atmosférica, ser fáciles de fabricar, instalar y operar y ser asequibles para usuarios en zonas rurales. También mejorarían la seguridad pues reducirían la exposición directa a llamas y calor, y constituirían oportunidades de empleo para la fabricación, comercialización y mantenimiento de aparatos mejorados.

El diseño de aparatos mejorados también debería tener en cuenta las necesidades y preocupaciones de los usuarios. Por ejemplo, algunos estudios indican que los usuarios de aparatos mejorados se preocupan por el combustible, formas de economizarlo, emisiones de contaminantes, costo, tiempo de cocción, facilidad de operación y mantenimiento, adaptabilidad a los utensilios de cocina existentes, prácticas relativas al uso de combustible y la cocina, facilidad de encendido, control del nivel calor y seguridad de operación. Los esfuerzos para diseñar aparatos mejorados deben prestar atención a los aspectos social, cultural, científico, económico, ergonómico y de salud.

2.1 Combustibles y aparatos: Principios generales

Entre las mejores técnicas disponibles se encuentran los combustores cerrados de baja emisión con conductos de humo y uso de leña seca bien curada. En el caso de países que no exigen la reducción de gases de invernadero, también podría ser conveniente utilizar combustibles de combustión más limpia como gas licuado de petróleo, gas natural, aceite y keroseno, pero para ello se requieren aparatos que puedan utilizar estos combustibles.

Para los países o regiones en los que no se dispone de estos combustibles y aparatos, las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para la combustión doméstica consisten en asegurarse de separar los desechos domésticos del combustible a fin de evitar la quema de aquéllos en aparatos de cocina y calefacción. Todos los países deberían evitar el uso de madera tratada o impregnada de sal marina y el uso de plásticos como material para encendido o como combustible.

Las medidas para controlar emisiones son recomendables pero no se consideran comunes para aparatos domésticos de fuego y combustión. Los grandes sistemas similares a los utilizados en procesos industriales deberían estar equipados con ciclones o filtros de tela. Hay que señalar que en algunos países existen los convertidores catalíticos, pero no se utilizan con frecuencia.

2.2 Aparatos de cocina y calefacción

En el caso de estufas y hornos particulares, se pueden reducir las emisiones utilizando dispositivos de calentamiento optimizados. Existen diferentes tipos de instalación, que varían por país en función de sus normas técnicas generales, contexto social, cultural y económico y condiciones climáticas.

La tecnología de combustión óptima debería tener las siguientes características:

- Buena mezcla de gas y aire (alta turbulencia o mezclado).
- Suficiente tiempo de residencia en la zona caliente.
- Perturbación mínima del lecho incandescente y distribución homogénea del aire primario.
- Tiempo mínimo de residencia en el rango de temperatura de 180°C a 500°C y capacidad de deposición de polvo mínima.
- La chimenea emisora debería mantenerse limpia y libre de hollín, para lo cual debe asegurarse que la combustión sea completa y realizar una limpieza periódica (por lo menos una vez al año).

3. Mejores prácticas ambientales

3.1 Aparatos de combustión y problemas potenciales

La Tabla 5 describe algunas averías típicas de los aparatos, que pueden ocasionar la liberación de contaminantes. Para los propietarios, muchas de estas averías son difíciles de detectar. El fabricante o vendedor debería proporcionar esta información al vender los aparatos. Usar los medios de comunicación también puede ser una buena estrategia de difusión de esta información entre los usuarios.

■ **Tabla 5. Aparatos de combustión y problemas potenciales**

Aparatos	Combustible	Problemas potenciales comunes
Hornos de calefacción central Calefactores de ambiente Hogares	Gas natural o gas licuado de petróleo	Fisuras en intercambiador de calor Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Ducto de escape defectuoso/tapado Quemador mal ajustado
Hornos de calefacción central	Petróleo	Fisuras en intercambiador de calor Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Ducto de escape defectuoso/tapado Quemador mal ajustado
Calentadores centrales Calefactores de ambiente	Madera	Fisuras en intercambiador de calor agrietado Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Ducto de escape defectuoso/tapado Madera verde o tratada
Hornos de calefacción central Estufas	Carbón	Fisuras en intercambiador de calor Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Parrila defectuosa Ducto de escape defectuoso/tapado Carbón de baja calidad Combustible con alto contenido de humedad
Cocina Hornos	Gas natural o gas licuado de petróleo	Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Quemador mal ajustado Uso indebido como calefactor de ambiente
Calefactores de ambiente Calentadores centrales	Keroseno	Equipo mal ajustado Combustible incorrecto (si no es K-1) Mecha o altura de la mecha incorrectas Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible
Estufas Hogares	Madera Carbón	Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Ducto de escape defectuoso/tapado Madera verde o tratada Fisuras en intercambiador de calor o cámara de combustión Combustible inadecuado como desechos domésticos
Calentadores de agua	Gas natural o gas licuado de petróleo	Falta de aire para quemar adecuadamente el combustible Ducto de escape defectuoso/tapado Quemador mal ajustado

Fuente: CPSC 2004.

3.2 Ventilación

Para reducir la contaminación del aire en interiores, es importante que el aire entre y salga de la vivienda porque esto ayuda a reducir el nivel de contaminantes nocivos en interiores expulsándolos por la chimenea y ductos de escape. Así se garantiza también el aire necesario para una combustión adecuada y con ello se reducen los niveles de contaminantes.

Se puede mejorar la ventilación de la siguiente manera:

- Instalación de campanas extractoras sobre las estufas.
- Asegurándose de que haya suficiente flujo de aire en la vivienda cuando se utilice un ventilador aspirador (ej., entreabriendo una puerta o ventana, sobre todo si se utilizan al mismo tiempo otros aparatos).
- Para el debido funcionamiento de la mayor parte de los aparatos de combustión y sus sistemas de ventilación, la presión de aire dentro de la vivienda debería ser mayor que en el exterior. De no ser así, los aparatos de ventilación podrían liberar los contaminantes de combustión en el interior de la vivienda en lugar de expulsarlos.
- Asegurándose de que el tubo del aparato de ventilación esté conectado, que nada lo bloquee y que no tenga orificios ni fisuras.
- Abrir el regulador de tiro de la estufa o calefactor cuando se introduce la leña permite el paso de más aire hacia el aparato. Esto ayuda a que la madera se queme adecuadamente y evita que los contaminantes queden atrapados en la vivienda en vez de salir por la chimenea. Cuando se está utilizando una estufa de madera, el humo visible, un constante olor a humo en el interior de la vivienda o incluso la deposición de hollín en muebles son signos de que ésta no está funcionando correctamente. El humo y el hollín son indicios de que la estufa está liberando contaminantes en el aire al interior del inmueble.

En ningún caso deberían utilizarse calefactores o estufas sin ventilación en habitaciones donde se duerme, ya que se puede provocar la exposición a niveles peligrosos o mortales de monóxido de carbono.

3.3 Inspección y mantenimiento

Los aparatos de combustión deberían ser inspeccionados y recibir mantenimiento periódicamente (Tabla 6) a fin de reducir la exposición a contaminantes. Es importante limpiar las chimeneas y tubos de ventilación, sobre todo al cambiar los sistemas de calefacción.

■ **Tabla 6. Programa para la inspección y el mantenimiento**

Aparato	Inspección		Mantenimiento	
	Tareas	Frecuencia	Tareas	Frecuencia
Sistema de calefacción de aire a base de gas	Filtros de aire: limpiar/cambiar los filtros. Inspección de herrumbe u hollín en los ductos de escape.	Mensual, cuando sea necesario Anual	Operario calificado verifica/limpia la chimenea, limpia/ajusta los quemadores, inspecciona el intercambiador de calor y su operación.	Anual (al inicio de la temporada de calefacción).
Sistemas de calefacción de gas/petróleo agua/vapor y calentadores de agua	Inspección de herrumbe u hollín en los ductos de escape.	Anual	Operario calificado verifica/limpia la chimenea, limpia la cámara de combustión, ajusta los quemadores, verifica su operación.	Anual (al inicio de la temporada de calefacción).
Calentadores de keroseno	Verificar que la camisa esté bien asentada. Verificar que el depósito de combustible no tenga agua o contaminantes.	Diaria, cuando se utilicen Diaria o antes de agregar el combustible	Verificar y reemplazar la mecha. Limpiar la cámara de combustión. Drenar el depósito de combustible.	Anual (al inicio de la temporada de calefacción). Anual (al inicio de la temporada de calefacción). Anual (al final de la temporada de calefacción).
Estufas de madera/carbón y calderas y hornos domésticos	Inspección de herrumbe u hollín en los ductos de escape.	Mensual	Operario calificado verifica/limpia la chimenea, verifica uniones y juntas, verifica su operación.	Anual (al inicio de la temporada de calefacción).

Fuente: CPSC 2004.

3.4 Uso correcto de los aparatos y el combustible

Es importante comprender y seguir las instrucciones de operación de todos los aparatos y emplear el tipo de combustible recomendado.

Cuando sea posible, se debería utilizar maderas duras curadas (y no maderas blandas) en estufas y hogares de leña. Las maderas duras arden a mayor temperatura y forman menos creosota (un alquitrán aceitoso y negro que se adhiere a las chimeneas y ductos de estufas, presentando peligro de incendio).

Debería evitarse por completo el uso de madera verde, húmeda o impregnada de sal marina. La madera verde y/o húmeda arde con menos eficiencia y puede aumentar las emisiones de PCDD/PCDF. Los estudios comparativos entre madera de zonas costeras y madera de zonas no costeras han demostrado además que, al arder, la madera impregnada de sal marina tiene un contenido más elevado de cloro y emite más PCDD/PCDF (ver también la sección 1.2).

Nunca se debe utilizar madera de desecho pintada ni madera tratada con agentes conservadores porque este material puede liberar contaminantes muy tóxicos, entre ellos los del Anexo C.

Es importante evitar alimentar los aparatos con desechos que contienen un nivel elevado de cloro o bromo, ya sean inorgánicos, como las sales, u orgánicos halogenados, como PVC (Lemieux *et al.* 2003). Con todo, la co-incineración de desechos en aparatos alimentados con combustibles sólidos es una práctica común, a la que habría que poner freno con campañas de sensibilización y medidas de política (ver subsección 3.5 *infra*). Muchos estudios indican que la combustión de cloro contenido en desechos como PVC ocasiona una mayor formación no intencional de contaminantes orgánicos persistentes, tal como se muestra en la Tabla 7 (Gullett *et al.* 1999). Se podría instrumentar una normativa que especifique los combustibles regulares. Lo mismo cabe decir de combustibles como madera tratada, aceite de desecho, aceite de transformadores, plásticos y otros desechos combustibles.

■ **Tabla 7. Relación entre factores de emisión de PCDD/PCDF y contenido de PVC en el material quemado**

Contenido de PVC [%]	0	0.2	1	7.5
Factor de emisión promedio EQT-I/kg [ng]	14	80	200	4,900
Rango EQT-I/kg [ng]	2 - 28	9 - 150	180 - 240	3,500 – 6,700

Fuente: Gullett et al. 1999

3.5 Programas de educación, sensibilización y capacitación

Por lo regular, las emisiones de otros contaminantes (como partículas finas o monóxido de carbono) obligan a emprender esfuerzos de reglamentación para mejorar las emisiones de la combustión doméstica. Los programas de educación, sensibilización y capacitación para mejorar el conocimiento de las mejores prácticas relativas a las sustancias del Anexo C deberían ser un elemento importante de tales esfuerzos (véase los estudios de caso en el Cuadro I anexo a la presente sección).

La participación de comunidades locales en todo programa de educación y sensibilización asegura que sean concretos y útiles. He aquí los componentes clave de un programa efectivo:

- Educación y sensibilización sobre el uso correcto de combustibles. Los factores importantes que hay que considerar son:
 - Uso de madera seca bien curada, que reducirá las liberaciones de PCCD/PCDF y también puede generar hasta 40% más de calor.
 - Uso de combustibles de combustión más limpia, como gas natural, para reducir las liberaciones de las sustancias del Anexo C.
 - Inconveniencia de quemar desechos domésticos como combustibles para estos aparatos.
 - Funcionamiento eficiente de los aparatos que garantice la combustión completa del combustible.
- Información sencilla y fácil de comprender sobre los efectos en la salud humana y el medio ambiente de las sustancias del Anexo C, y sobre la importancia de las liberaciones a partir de fuentes domésticas.
- Programas para los compradores, vendedores, y operadores de aparatos de combustión domésticos en los que se haga hincapié en las cuestiones mencionadas en las subsecciones 3.1 al 3.4.

3.6 Gestión de la combustión doméstica

La combustión completa del combustible es importante para garantizar emisiones bajas y un funcionamiento eficiente del aparato. Esto se puede lograr de la siguiente manera:

- Temperatura de combustión suficiente
- Flujo de aire que proporcione suficiente oxígeno para la combustión
- Evitar la carga excesiva de combustible (más del que puede quemarse con eficiencia)
- Suficiente mezcla de aire y gases calientes producidos por el fuego

Las medidas específicas para lograr los resultados deseados son:

- Combustible de buena calidad, seco
- Recolección y curado de la madera para asegurarse de que esté seca al arder
- Garantizar un flujo de aire adecuado (por ej., impedir que trozos de madera bloqueen el aire entrante)
- Suficiente espacio en la caja de combustión para lograr un flujo de aire óptimo

3.7 Gestión de las liberaciones hacia otros medios

El aire es el principal medio hacia el que la combustión doméstica emite las sustancias químicas del Anexo C. Se liberan cenizas y hollín que, si provienen de la combustión de madera o biomasa limpia, no contienen sino pequeñas cantidades de estos compuestos. Se pueden utilizar sin riesgo cantidades mínimas de ceniza como fertilizante, mientras no sean esparcidas siempre en el mismo lugar. Las cantidades más grandes deberían depositarse en un relleno sanitario.

4 Aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

En la mayoría de los casos, los usuarios finales de aparatos de combustión mejorados saben poco o nada de los efectos adversos en la salud y el medio ambiente de las sustancias del Anexo C. Una mayor sensibilización sobre las preocupaciones puede contribuir a fomentar el manejo efectivo de estos aparatos, y al mismo tiempo impedir prácticas como el uso de desechos domésticos como combustible. Los gobiernos deberían incluir en sus programas de capacitación y sensibilización información sobre los impactos de las liberaciones de las sustancias del Anexo C provenientes de aparatos domésticos de combustión, tales como estufas, hornos y otros artefactos.

En Atikullah S.M. y Eusuf M. (2003) se tratan las posibles opciones y obstáculos para la aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales. Se encuentran resumidos en la Tabla 8.

■ Tabla 8. Posibles opciones y obstáculos para la aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para aparatos de combustión domésticos

Obstáculos	Opciones para la aplicación efectiva de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales
Incompatibilidad entre el diseño del aparato y los tipos de combustibles disponibles y utilizados	El diseño del aparato debería responder a las necesidades de la comunidad. Antes de aplicar cualquier modelo de aparato, se deberían evaluar con detalle las necesidades de la comunidad.
Falta de sensibilización ciudadana sobre tecnologías mejoradas	Los gobiernos y comunidades deberían emplear los medios adecuados (ej., medios de comunicación, campañas de sensibilización) para dar a conocer y divulgar los sistemas mejorados. Los programas de capacitación a nivel comunitario son importantes para asegurar el empleo adecuado de los aparatos y eliminar el uso potencial de combustibles inapropiados como desechos domésticos
Falta de capacidad local para dar mantenimiento y reparar aparatos mejorados	Es importante poner en marcha programas de capacitación para establecer capacidad relativa al mantenimiento y reparación de aparatos
Falta de recursos para adquirir, operar y dar mantenimiento a aparatos	La población de escasos recursos se interesará en adquirir aparatos mejorados sólo si está convencida de que no serán un carga económica adicional y de que su mantenimiento y uso son rentables
Conocimientos insuficientes sobre efectos en la salud de las sustancias químicas del Anexo C y otros contaminantes	Sensibilizar sobre los posibles efectos de la contaminación atmosférica en interiores para la salud (incluidas las sustancias químicas del Anexo C) por el uso inapropiado de aparatos domésticos para calefacción y cocina y combustibles

En el apartado sobre referencias figuran otras fuentes de información sobre quema limpia y diseño mejorado de estufas de madera.

■ Cuadro 1 Sensibilización y educación: estudios de caso

Aunque los enfoques normativos que aquí se exponen tienen como finalidad la reducción de partículas, presentan importantes co-beneficios para la reducción de PCDD/PCDF que pueden formarse por combustión incompleta. La reducción de emisiones de partículas reducirá al mismo tiempo las emisiones de PCDD/PCDF ya que estos compuestos se adsorben a las partículas.

Caso 1: Nueva Zelanda

La contaminación urbana por las emisiones provenientes de la combustión doméstica de madera es un problema generalizado. En Nueva Zelanda, muchos pueblos y ciudades experimentan una baja calidad del aire en invierno por las emisiones de los sistemas domésticos de calefacción. No es excepcional que se rebasen los niveles de la norma ambiental nacional para partículas finas en $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio en un período de 24 horas), y en algunas áreas sucede más de 30 días por año. Este problema puede contribuir a las emisiones nacionales de PCDD/PCDF, y es de carácter histórico por la falta de aislamiento en las casas, que es resultado de la abundancia de madera y carbón (en muchos casos gratuitos). Se trata de consideraciones socioeconómicas importantes para las autoridades locales encargadas de reducir la contaminación atmosférica.

En cuatro pequeñas poblaciones de Nueva Zelanda se emprendió una campaña de sensibilización sobre emisiones de la combustión doméstica entre 2005 y 2006. Una de las conclusiones clave de la campaña fue la importancia de adecuar las soluciones a las características de cada comunidad local (evitando soluciones genéricas, del tipo "talla única"). Se requirió la participación de actores clave, como profesionales del sector salud comunitario y fundaciones y logró crear sinergias positivas para la acción y sensibilización de la comunidad.

Caso 2: Tasmania, Australia

En muchas partes del sur de Australia las estufas de madera se usan comúnmente para calentar los hogares. En Launceston, Tasmania (cuya población es de aproximadamente 10,000 personas), se rebasó en promedio 14 veces la norma mensual invernal para partículas finas del país, sobre todo por las emisiones provenientes de estas estufas.

En 2001 se introdujo un programa de sustitución de estufas de madera para mejorar la calidad del aire. A partir de ese momento aproximadamente 25% de las estufas de madera han sido retiradas gracias a incentivos económicos para reemplazar las antiguas estufas de madera contaminantes por aparatos más limpios. Se emprendió, al mismo tiempo, una campaña de educación específica para la comunidad (sitio Web de Launceston Air Quality), así como una norma que limitó a 4 g/kg las emisiones de partículas de las nuevas estufas (emisión/kilogramo de madera quemada).

Un estudio en 2005 concluyó que el programa aceleró el abandono de las viejas estufas de madera y contribuyó a mejorar la calidad del aire. Aunque no existan datos al respecto, es posible que haya habido una reducción de las emisiones de dioxinas. En 2006, por primera vez, Launceston no rebasó la norma australiana para partículas finas.

Referencias

- Atikullah S.M. and Eusuf M. 2003. "Biomass Crisis and Improved Stoves in Bangladesh." *Renewable Energy Newsletter* 1:2. Bangladesh Centre for Advanced Studies, Dhaka.
- Berdowski J.J.M., Baas J., Bloos J.P.J., Visschedijk A.J.H. and Zandveld P.Y.J. 1997. *The European Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants*. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 104 02 672/03. TNO, Apeldoorn, Netherlands.
- CPSC (Consumer Product Safety Commission). 2004. *What You Should Know about Combustion Appliances and Indoor Air Pollution*. CPSC Document 452. www.cpsc.gov/CPSCPUB/PUBS/452.html.
- Gullet *et al* 1999, *Organohalogen and Compounds* Vol.41, 157-168, 1999.
- Karve P. 2000. *International Conference on Biomass-Based Fuels and Cooking Systems (BFCS-2000): A Report*. solstice.crest.org/discussiongroups/resources/stoves/Karve_Conference/BFCSrprt.htm.
- Lassen C. *et al*. 2002. *Inventory of Dioxin and Furan Releases in Poland*. Report by Danish Cooperation for the Environment in Eastern Europe (DANCEE) and Ministry of the Environment Poland.
- Lassen C., Hansen E., Jensen A.A., Olendrzy ski K., Kołsut W., urek J., Kargulewicz I., D bski B., Sko kiewicz J., Holzer M., Grochowalski A., Brandte E., Poltimae H., Kallaste T. and Kapturauskas J. 2003. "Survey of Dioxin Sources in the Baltic Region." *Environ. Sci. Pollut. Res.* 10:49–56.
- Launceston Air Quality. www.launceston.tas.gov.au/airquality.php.
- Lavric E.D., Konnov A.A. and De Ruyck J. 2004. "Dioxin Levels in Wood Combustion: A Review." *Biomass and Bioenergy* 26:115–145.
- PCIA (Partnership for Clean Indoor Air). www.pciaonline.org/.
- RWEDP (Rural Wood Energy Development Programme in Asia). www.rwedp.org/p-stoves.html.
- Thanner G. and Moche W. 2002. *Emissions of Dioxins, PCBs and PAHs from Domestic Heating*. Monographs Vol. 153. Federal Environmental Agency, Vienna, Austria.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Otras fuentes

- Government of Australia. 2004. *Hot Tips for Cleaner Wood Heating*. Natural Heritage Trust, Australia.
- Pfeiffer F., Struschka M., Baumbach G., Hagenmaier H. and Hein K.R.G. 2000. "PCDD/PCDF Emissions from Small Firing Systems in Households." *Chemosphere* 40:225–232.
- Design principles of wood burning cookstoves, PCIA website (Nov. 2006) http://www.pciaonline.org/assets/20060710-Design_Principles_ES.pdf
- Biomass Energy Technology, http://www.rwedp.org/d_technodc.html (Nov. 2006).



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/8

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

**Combustión de combustibles fósiles
en centrales termoeléctricas
y calderas industriales**



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

ÍNDICE

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.D

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

Categoría de fuentes (d) de la Parte III: Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales

VI.D	Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales	9
1.	Introducción	9
1.1	Información general sobre calderas	9
1.2	Tipos de calderas	10
2.	Generación de PCDD/PCDF, PCB y HCB de la combustión.....	12
2.1	PCDD y PCDF	12
2.2	PCB y HCB	14
3.	Efecto del tipo de combustible en la generación de emisiones	14
3.1	Combustóleo ligero y gas natural.....	15
3.2	Combustóleo pesado	15
3.3	Carbón.....	15
3.4	Lignito.....	15
3.5	Co-combustión con otros tipos de combustibles	16
4.	Estimación de emisiones de contaminantes orgánicos persistentes de calderas	17
5.	Mejores prácticas ambientales	18
6.	Mejores técnicas disponibles.....	19
6.1	Medidas primarias.....	19
6.2	Medidas secundarias: Dispositivos de control de la contaminación atmosférica.....	21
6.3	Otras consideraciones	21
7.	Niveles de desempeño asociados con mejores técnicas disponibles.....	23
	Referencias	24
	Otras fuentes	25
Anexo		
Anexo I.	Factores de emisión de PCDD/PCDF provenientes de la combustión controlada de carbón bituminoso y sub-bituminoso (EQT ng/kg ^b)	23

Tablas

Tabla 1.	Factores de emisión para plantas termoeléctricas del sector que utilizan combustibles fósiles.....	17
Tabla 2.	Concentraciones orgánicas residuales (ng/Sm ³ a 12% de O ₂) ^a de la quema de combustibles derivados de desechos.....	20
Tabla 3.	Síntesis de medidas recomendadas para calderas industriales y de termoeléctricas	22

Figuras

Figura 1.	Partes de la caldera donde se pueden formar PCDD y PCDF.....	13
-----------	--	----

VI.D Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales

■ Resumen

Las calderas industriales y de centrales termoeléctricas queman combustible para calentar agua o producir vapor que se utiliza en la generación de electricidad o en procesos industriales. Las concentraciones volumétricas de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo en las emisiones provenientes de calderas que utilizan combustibles fósiles son, por lo general, muy bajas. Sin embargo, el total de emisiones del sector de calderas puede resultar significativo por la magnitud de la combustión a base de combustibles fósiles, tanto en términos de tonelaje como de distribución, para la generación de electricidad y producción de calor o vapor.

Las medidas que se pueden adoptar para reducir la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C son: mantener condiciones eficientes de combustión en la caldera y garantizar el tiempo necesario para la combustión completa, adoptar medidas para asegurarse de que el combustible no esté contaminado con PCB, HCB o cloro, y de que tenga un bajo contenido de compuestos que actúen como catalizadores en la formación de PCDD y PCDF, utilizar métodos apropiados de depuración de gases para disminuir las emisiones que puedan contener estos contaminantes, y emplear estrategias adecuadas de eliminación, almacenamiento o uso regular de las cenizas recolectadas.

Los niveles de emisión de PCDD/PCDF al aire asociados a mejores técnicas disponibles pueden ser considerablemente inferiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³ (contenido de oxígeno de 6% para combustibles sólidos y de 3% para combustibles líquidos).

1. Introducción

1.1 Información general sobre calderas

Las calderas son instalaciones que queman combustible para calentar agua o producir vapor. La mayoría de las calderas utilizan combustibles fósiles como fuente de energía, pero algunas también están diseñadas para quemar biomasa y desechos. El vapor producido por la caldera puede utilizarse para generar electricidad o para procesos industriales; asimismo, el agua caliente se puede utilizar en procesos industriales o para calefacción doméstica e industrial. Existen diferencias importantes entre las calderas de centrales eléctricas y las calderas industriales, que se reducen a las siguientes tres áreas:

- Tamaño de la caldera
- Usos del vapor y agua caliente producidos por la caldera
- Diseño de la caldera

1.1.1 Tamaños de calderas

Las calderas de centrales son muy grandes en comparación con las calderas industriales modernas (conocidas también como calderas industriales, comerciales o institucionales). Una caldera convencional de central termoeléctrica produce aproximadamente 1,600 toneladas de vapor por hora, mientras que una caldera industrial promedio produce unas 45 toneladas de vapor. Sin embargo, puede haberlas diez veces más pequeñas y diez veces más grandes (CIBO 2002).¹

1.1.2 Usos del vapor producido

Las calderas de las termoeléctricas están concebidas para generar un flujo constante de vapor que impulsa unas turbinas para producir electricidad. Por esta necesidad constante de vapor, las calderas suelen operar de forma continua, en condiciones estables. Sin embargo, ante los cambios en las estructuras del mercado energético, algunas centrales pueden variar sus condiciones operativas para adaptarse a las fluctuaciones de la demanda energética nacional diaria.

Por su parte, las calderas industriales se utilizan para fines muy diferentes, en diversos sectores industriales, y las demandas pueden variar según las actividades y procesos industriales que se realicen en un determinado momento y la cantidad de vapor que requieran. Compárese, por ejemplo, la producción y uso de agua caliente y vapor para procesamiento de alimentos con el ciclo de demanda en una gran caldera de hospital. Estas necesidades de vapor tan fluctuantes significan que la caldera industrial no suele operar en todo momento a su máxima capacidad, aunque el diseño sea optimizado de acuerdo con la planta y su operación. En general, las calderas industriales tienen cargas de operación anuales o factores de capacidad mucho más bajos que las calderas típicas de termoeléctricas.

1.1.3 Diseño de la caldera

Las calderas de centrales son, por lo regular, grandes unidades que queman principalmente carbón pulverizado, combustóleo, o gas natural a presión y temperatura elevadas. Todos los tipos de calderas de termoeléctricas suelen tener un diseño y tecnologías de combustión relativamente similares. Las calderas industriales pueden incorporar una gran variedad de sistemas de combustión, aunque suelen estar concebidas para tipos específicos de combustible. Las termoeléctricas están diseñadas en función de las calderas y de la turbina o turbinas, y su tamaño permite economías de escala importantes en el control de emisiones. Sin embargo, el diseño de las calderas industriales puede verse limitado por la necesidad de flexibilidad de producción de vapor y las limitaciones espaciales de la planta, lo que puede hacer más difícil la aplicación de controles efectivos de emisiones.

1.2 Tipos de calderas

1.2.1 Calderas de centrales de termoeléctricas

Las calderas de termoeléctricas se designan según la configuración del horno de combustión:

- Encendido tangencial: Utilizadas comúnmente para la combustión de carbón pulverizado pero también pueden alimentarse con petróleo o gas; consisten en una única zona de llama, con una mezcla de aire y combustible que se proyecta tangencialmente desde las cuatro esquinas del horno hacia la línea central del mismo.
- Encendido de pared: Varios quemadores colocados en una sola pared o en paredes opuestas del horno que pueden quemar carbón pulverizado, petróleo o gas natural.
- Encendido por ciclón: Por lo general, combustión de carbón triturado; la mezcla de aire y combustible se quema en cilindros horizontales.
- Con hogar mecánico: Son plantas más antiguas que queman todo tipo de combustibles sólidos; los hogares mecánicos esparcidos extienden el combustible sólido sobre una parrilla de combustión y eliminan las cenizas residuales
- De combustión en lecho fluidizado: Temperatura de combustión del horno más baja, combustión eficiente gracias a la mezcla turbulenta en la zona de combustión, alimentación de carbón triturado con el potencial de eliminar contaminantes, principalmente dióxido de azufre, mediante incorporación de sorbentes.
- De combustión en lecho fluidizado presurizado: Similar a la combustión en lecho fluidizado, pero a presiones mayores que la atmosférica y con mayor eficacia.

1.2.2 Calderas industriales/comerciales/institucionales

Las calderas industriales/comerciales/institucionales suelen distinguirse por los métodos de transferencia de calor y el sistema de combustión empleado. En Oland 2002 se describen detalladamente los diversos tipos de calderas. He aquí un resumen de sistemas de transferencia de calor:

- Calderas acuotubulares: Los tubos transportadores de calor que contienen agua entran en contacto directo con gases calientes de combustión. Por lo general se utilizan en instalaciones alimentadas con carbón pero pueden adaptarse para quemar casi cualquier otro tipo de combustible como petróleo, gas, biomasa, desechos sólidos urbanos y combustible derivado de neumáticos.
- Calderas pirotubulares: El agua rodea los tubos, por los que circulan los gases de combustión calientes. En general, este tipo de calderas utiliza carbón pulverizado, gas o petróleo, pero las hay que pueden quemar también biomasa y otros combustibles. Se usan generalmente en aplicaciones para baja presión.
- Calderas de hierro fundido: Las secciones de hierro fundido de la caldera contienen ductos tanto para el agua como para el gas de combustión. Utilizadas para producir vapor a baja presión y agua caliente. Alimentadas generalmente con petróleo o gas y, en menor medida, carbón.

Y los principales sistemas de combustión son:

- Hogares mecánico: Existen diversos tipos y funciones de hogares mecánicos. En los de alimentación inferior, el combustible y el aire de combustión se suministran desde debajo de la parrilla, y las cenizas se descargan por el costado o la parte trasera. Los de alimentación superior, que pueden ser de carga en masa o, el más común, con esparcidor, suministran el aire de combustión desde la parte inferior de la parrilla, y el combustible se distribuye por encima de la misma. El hogar mecánico esparcidor con parrilla estacionaria son muy usados en la industria azucarera para quemar el bagazo.
- Quemadores: Este variado grupo de dispositivos administra el suministro de la mezcla de aire y combustible en el horno en condiciones de velocidad, turbulencia y concentraciones apropiadas para mantener tanto la ignición como la combustión.

2. Generación de PCDD/PCDF, PCB y HCB de la combustión

En un sistema de combustión que funcione debidamente, los compuestos volátiles deberían ser sometidos durante el tiempo correspondiente a altas temperaturas, con el oxígeno suficiente y la mezcla adecuada, a fin de lograr una combustión uniforme y completa. Si estas condiciones no se cumplen, pueden producirse emisiones atmosféricas con potencial tóxico de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB) o sobrevivir al proceso de combustión (Van Remmen 1998; UNEP 2005).

En grandes termoeléctricas, debidamente controladas, que utilizan combustibles fósiles, el índice de formación de PCDD/PCDF (y de otros contaminantes orgánicos persistentes) es bajo porque la eficacia de la combustión suele ser alta, el proceso es estable y los combustibles son, por lo regular, homogéneos. Con todo, es posible que emitan cantidades importantes de contaminantes porque se producen grandes cantidades de gases de salida que contienen pequeñas concentraciones de PCDD/PCDF (UNEP 2005). En sistemas más pequeños y menos controlados, hay potencial de emisión de contaminantes orgánicos persistentes con concentraciones más elevadas pero en caudales globales más pequeños, lo que significa que se producen emisiones en masa más bajas de estos contaminantes.

2.1 PCDD y PCDF

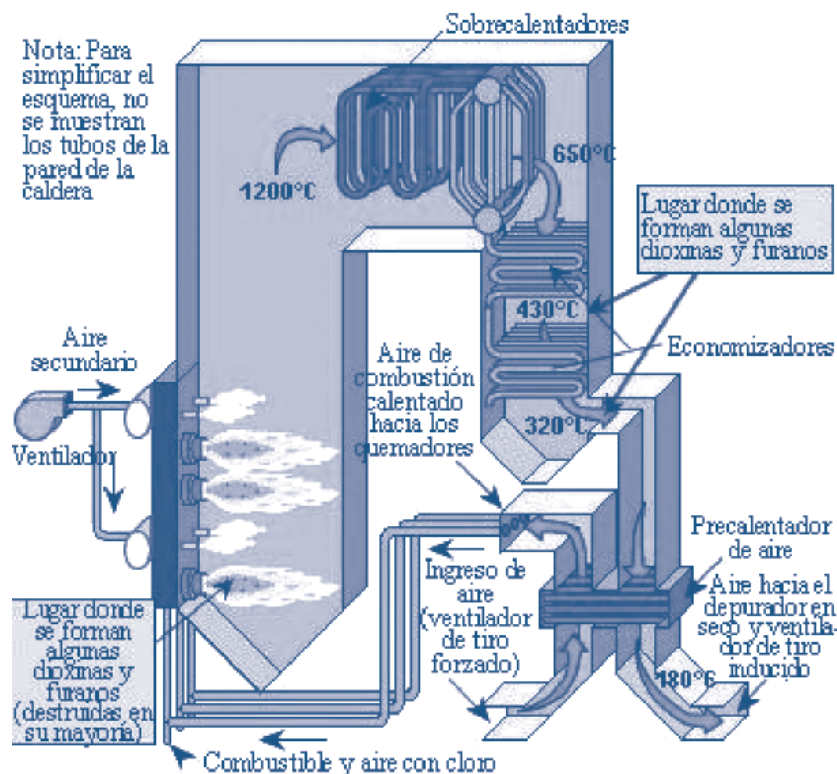
2.1.1 Generación de PCDD/PCDF

Se sabe que la quema de combustibles fósiles en calderas de termoeléctricas o calderas industriales genera mucho menos PCDD/PCDF que la combustión de combustibles derivados de desechos (Sloss and Smith 1993; Sloss 2001; Dyke 2004). En 1986, Griffin, estableció una hipótesis para explicar la formación de PCDD/PCDF como resultado de la razón azufre-cloro en el suministro de combustible (Griffin 1986). Según esta hipótesis, la razón de 5:1 azufre-cloro en el carbón es mayor que la observada en los desechos sólidos urbanos. Este exceso de azufre con respecto al cloro en combustibles fósiles

como carbón, petróleo crudo y gas permite la captura del cloro molecular, lo que evita la formación de compuestos aromáticos clorados que se generan con la combustión de combustibles derivados de desechos, donde el contenido de cloro es mayor que el de azufre.

Los PCDD/PCDF se forman por diversos mecanismos. La Figura 1 muestra esquemáticamente las partes de una caldera en las que se pueden formar PCDD/PCDF. La sección III.C (i) de estas directrices contiene más información sobre la formación de PCDD/PCDF.

■ **Figura 1. Partes de la caldera donde se pueden formar PCDD y PCDF**



Fuente: Modificado de Richards 2004.

2.1.2 Mecanismos de control de PCDD/PCDF

Las condiciones de la combustión, calidad del combustible, diseño de la planta y condiciones de operación pueden tener una incidencia importante en la formación de PCDD/PCDF. Se ha demostrado (Williams 1994; Eduljee and Cains 1996) que se pueden mejorar las condiciones de combustión para reducir las emisiones de PCDD. Lemieux (1998) reseña el trabajo realizado por la Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos, que muestra, en orden decreciente de importancia, los parámetros que pueden controlarse para reducir las emisiones de PCDD/PCDF:

1. Calidad de la combustión, indicada por los siguientes elementos:
 - Formación de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales y hollín
 - Arrastre y quema de partículas

2. Temperaturas del sistema de control de contaminación atmosférica.
3. Parámetros de los combustibles/desechos:
 - Azufre
 - Metales
 - Cloro

Este control se puede lograr con las siguientes condiciones (Lemieux 1998):

- Temperatura del combustor elevada y uniforme
- Buena mezcla, con suficiente aire
- Reducir al mínimo el material particulado arrastrado y no quemado.
- Uniformidad en la velocidad de alimentación
- Monitoreo y control activos de CO e hidrocarburos totales

Por último, he aquí algunos parámetros operativos identificados para dispositivos de control de contaminación atmosférica que propician emisiones más bajas de PCDD/PCDF:

- Baja temperatura en la entrada del dispositivo de control de partículas
- Reducción del tiempo de residencia de los gases o partículas en la ventana de temperatura de 200°C a 400°C

Como ya se ha mencionado, también se ha demostrado que la presencia de azufre inhibe la formación de PCDD, tal como lo indican las emisiones habitualmente bajas de centrales alimentadas con carbón, y los resultados obtenidos de la co-combustión de carbón con alto contenido de azufre con combustible derivado de desechos (Tsai *et al.* 2002). Por consiguiente, mantener una razón azufre alto-cloro bajo puede ser conveniente (Luthe, Karidio and Uloth 1997), aunque hay que reconocer que el uso de combustibles con alto contenido de azufre puede generar otra serie de problemas de contaminación atmosférica.

2.2 PCB y HCB

Se pueden emitir PCB al utilizar aceites recuperados y otros aceites provenientes de desechos. La combustión de carbón es la tercera fuente mundial de emisiones de HCB (Bailey 2001). La sección III.C (i) de las presentes directrices contiene más información sobre la formación de estos compuestos. Para controlar las emisiones de PCB y HCB se pueden utilizar estrategias similares a las de reducción de emisiones de PCDD/PCDF.

3. Efecto del tipo de combustible en la generación de emisiones

Para la generación de vapor en calderas se utilizan combustibles fósiles –carbón, petróleo y gas–, solos o combinados con combustibles de otros procesos que contienen

energía. El tipo de combustible que se va a emplear depende de su disponibilidad y de la economía del proceso.

3.1 Combustóleo ligero y gas natural

El combustóleo ligero y el gas natural se queman siempre en quemadores especialmente concebidos, y es improbable que generen grandes cantidades de PCDD/PCDF, pues ambos combustibles tienen un alto poder calorífico, son de combustión limpia y dejan poca ceniza. Un mayor uso de gas para la generación de energía (en sustitución del carbón y el petróleo) implicará reducciones de PCDD/PCDF en el sector energético (UNECE 1998).

3.2 Combustóleo pesado

El combustóleo pesado se utiliza para generar vapor así como energía eléctrica y suele quemarse en combustores especiales instalados en las paredes de la caldera. El combustóleo libre de contaminantes producirá generalmente bajos niveles de emisiones orgánicas.

3.3 Carbón

La combustión eficiente de carbón en grandes termoeléctricas genera niveles muy bajos de emisiones (Rentz, Gütling and Karl 2002). El uso del carbón en sectores menos eficientes podría constituir una fuente importante de emisiones locales (Sloss 2001). En UNECE (1998) se recomienda mejorar la eficiencia y conservación energéticas de las calderas industriales y termoeléctricas de más de 50 MW, como estrategia de reducción de emisiones, ya que así disminuye el consumo energético. Sin embargo, si bien es cierto que las técnicas de reducción de partículas, óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x) pueden contribuir a reducir o eliminar los PCDD/PCDF (y es de suponer que también PCB y HCB), las eficiencias de eliminación serán variables (véase también la sección III.C (iii) sobre co-beneficios). La eliminación del cloro de las cargas de combustibles fósiles no se considera una medida rentable para reducir PCDD/PCDF (UNECE 1998).

3.4 Lignito

Las termoeléctricas alimentadas con lignito suelen encontrarse cerca de las zonas de extracción. Por su poder calorífico considerablemente más bajo que el del carbón, se usan bandas transportadoras para transportar el lignito desde la zona de la mina a la planta. La combustión con lignito pulverizado y de lecho fluidizado son dos técnicas adecuadas para la generación de energía a base de lignito. Debido a sus temperaturas de combustión más bajas, las calderas alimentadas con lignito pulverizado pueden cumplir las normas actuales de emisión de NO_x aplicando medidas primarias. Por lo tanto, no usan la reducción catalítica selectiva.

Se han registrado emisiones de PCDD/PCDF de plantas termoeléctricas alimentadas con lignito del orden de 0.0002 a 0.04 ng EQT-I/Nm³ (Detzel *et al.* 1998).²

3.5 Co-combustión con otros tipos de combustibles

Casi todas las centrales termoeléctricas utilizan un solo combustible, pero es posible modificar la caldera y el equipo que procesa el combustible de tal forma que se puedan incorporar otros materiales, por ejemplo desechos, en la mezcla de combustible. Este proceso de co-combustión significa que se puede utilizar simultáneamente más de un tipo de combustible.

Sin embargo, las calderas suelen tener una capacidad limitada para utilizar desechos o combustibles derivados de desechos a falta de un control de emisiones de cloruro de hidrógeno y, a veces también, por las limitaciones en las condiciones de combustión y riesgo de corrosión de la caldera. La práctica de la co-combustión podría incrementar el potencial de emisión de contaminantes orgánicos persistentes si no se mantiene la eficiencia de la caldera, reconfigurándola o aplicando un sistema de control apropiado.

Los desechos (también conocidos como combustibles derivados de desechos) son materiales ricos en energía, tales como aceites, neumáticos, desechos de madera y solventes usados, que se pueden emplear para sustituir los combustibles fósiles como fuente de energía térmica. Sin embargo, en muchos casos, hay fracciones de desecho con bajo poder calorífico (por ejemplo, lodos de depuración deshidratados) que también se co-incineran para su eliminación. El potencial de contaminación de los desechos con sustancias no deseadas o contaminantes es un problema que tiene que ver con el origen de estos combustibles. En particular, debería evitarse o restringirse la presencia de PCB, HCB y cloro en los desechos. Las secciones sobre incineración de desechos, desechos peligrosos de hornos de cemento, instalaciones de combustión alimentadas con madera y otras biomásas combustibles y refinerías de aceites de desecho (secciones V.A, V.B, VI.E y VI.M de estas directrices) contienen más orientación sobre los problemas e implicaciones del uso de desechos.

El control de calidad del combustible y unas óptimas condiciones de combustión, así como el uso de un recolector efectivo parecen ser las mejores estrategias de control para la reducción de contaminantes orgánicos persistentes cuando se utiliza material de desecho en la carga de combustible. Para que el funcionamiento sea más efectivo, los desechos deberían ser específicamente excluidos del proceso durante el arranque, el apagado, o en condiciones de operación estacionaria, cuando es menos probable que las condiciones de combustión sean estables y estén controladas.

La co-incineración de desechos debería realizarse de tal forma que no afecte las opciones de eliminación de residuos sólidos (ej., cenizas volantes, cenizas gruesas, residuos del tratamiento de gases de escape) (véase sección V.A (incineradores de desechos) de estas directrices).

Si no se logra el valor de emisión de 0.1 ng/Nm^3 , se pueden y deben aplicar medidas secundarias.

4. Estimación de emisiones de contaminantes orgánicos persistentes de calderas

Medir los niveles bajos de PCDD, PCDF, PCB y HCB provenientes de la combustión de combustibles fósiles en calderas implica dificultades técnicas, y es una práctica costosa en comparación con la medición de contaminantes de referencia como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas. Si bien se recomienda la medición directa de contaminantes orgánicos persistentes en cada planta, para así contribuir a la base de conocimientos sobre las emisiones de estos compuestos tóxicos, hay que reconocer que en algunos casos puede no ser posible, salvo tratándose de grandes instalaciones muy tecnificadas.

En un proceso de combustión eficiente, los niveles de contaminantes pueden encontrarse muy por debajo de las normas de referencia (Brain *et al.*, citados en Sloss 2001). Por lo tanto, es posible que los PCDD, PCDF, PCB y HCB estén presentes pero no alcanzan los límites de detección de los métodos de análisis actuales.

Una alternativa a la medición directa es estimar las emisiones a partir de información del tipo de combustible, capacidad y condiciones del proceso. Los factores de emisión de PCDD/PCDF (EQT-I) para algunos procesos de calderas se presentan en la Tabla 1, y la información adicional sobre emisiones de congéneres específicos figura como anexo I a la presente sección (UNEP 2005).

■ **Tabla 1. Factores de emisión para plantas termoeléctricas del sector que utilizan combustibles fósiles**

Clasificación	Factores de emisión - mg EQT/TJ de combustible fósil quemado		
	Aire	Agua	Residuos
1 Calderas de co-incineración a base de combustible fósil/desechos	35	s.d.	s.d.
2 Calderas a base de carbón	10	s.d.	14
3 Calderas a base de combustible pesado	2.5	s.d.	s.d.
4 Centrales a base de aceite de esquisto	1.5	s.d.	*
5 Calderas a base de combustóleo ligero/gas natural	0.5	s.d.	s.d.

* Las liberaciones con residuos pueden calcularse en masa

Fuente: UNEP 2005

s.d. Sin determinar.

a. Estos factores de emisión de referencia se basan en el supuesto de que los combustibles consumidos generan liberaciones de PCDD/PCDF asociados a la eliminación de cenizas volantes. Las emisiones por cenizas depositadas de fondo son deleznable. La eficiencia de eliminación de material particulado también mejora cuando la calidad del sistema de control de contaminación atmosférica utilizado en la planta es mejor (UNEP 2003).

b. Base para calcular la capacidad energética: μg EQT/TJ de combustible consumido.

Se dispone de más información sobre emisiones de PCDD/PCDF que de PCB y HCB. En los casos en que los combustibles provenientes de desechos constituyan una proporción importante del combustible, quizás sea conveniente determinar factores de emisión del sector de incineración de desechos (UNEP 2003). Respecto a emisiones de PCB y HCB en el sector de combustión en calderas, los datos son escasos o poco fiables.

5. Mejores prácticas ambientales

Las mejores prácticas ambientales descritas en esta sección constituyen una orientación general aplicable a todo tipo de calderas, independientemente de su tamaño o tipo.

- Identificar los parámetros principales del proceso, ya sea mediante investigaciones realizadas en un sitio en particular o investigaciones hechas en instalaciones similares
- Introducir medidas que permitan el control de los parámetros principales del proceso
- Introducir protocolos de monitoreo y notificación para parámetros principales del proceso
- Introducir y dar seguimiento a ciclos de planeación, poner en marcha ciclos apropiados de inspección y mantenimiento
- Introducir un sistema de gestión ambiental que defina claramente las responsabilidades en todos los niveles
- Garantizar los recursos necesarios para poner en marcha y continuar con mejores prácticas ambientales
- Introducir mejoras en el proceso para reducir los escollos técnicos y demoras
- Asegurarse de que todo el personal esté debidamente capacitado para aplicar las mejores prácticas ambientales relacionadas con sus tareas
- Determinar la especificación del combustible en función de parámetros clave del proceso e introducir un protocolo de monitoreo y registro
- Garantizar la gestión ambientalmente adecuada de cenizas volantes, cenizas gruesas y residuos de tratamiento de gases de salida
- En la co-combustión de biomasa o desechos, asegurarse de que éstos no sean incorporados hasta que las condiciones de combustión del horno sean estables y se haya alcanzado su temperatura de operación.

6. Mejores técnicas disponibles

Para reducir la emisión de contaminantes orgánicos persistentes de calderas industriales y termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles se deben reducir las vías de generación y liberación de estos contaminantes en el diseño y operación del proceso, lo que puede lograrse atendiendo los siguientes factores:

- Calidad del combustible
- Condiciones de combustión
- Instalación de los dispositivos de control de contaminación atmosférica más adecuados.

6.1 Medidas primarias

6.1.1 Especificación y monitoreo del combustible

Si bien en la mayoría de los combustibles se generan niveles bajos de precursores que propician la formación de las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo, por la formación de gases por encima de los 500°C, se deben adoptar medidas para reducir, en lo posible, la introducción no intencional de combustibles contaminados, que pueden promover la formación de contaminantes orgánicos persistentes. Es de particular importancia importante cuando se co-combustionan combustibles fósiles y de otros tipos. Se deberían introducir controles que garanticen que los combustibles utilizados cumplen las especificaciones requeridas (ej., medición del contenido de cloro en el combustóleo para evitar la introducción de aceites de desechos contaminados con PCB).

6.1.2 Condiciones de combustión

Para lograr la combustión completa de los contaminantes orgánicos persistentes presentes en el combustible se debe prestar particular atención a los cuatro factores fundamentales de la destrucción efectiva: temperatura, tiempo, turbulencia y exceso de oxígeno (McKay 2002). De esta forma, también se garantizará la destrucción de precursores, se reducirá la formación de hollín y, como consecuencia, habrá menos posibilidad de catálisis por sólidos en el efluente de gases de enfriamiento. La Tabla 2 muestra la influencia de las condiciones de combustión en la emisión de contaminantes derivados de combustibles de desecho. Si bien los valores indicados en esta tabla son más elevados de lo que cabría esperar de la combustión de combustibles fósiles, ilustran la gran influencia de las condiciones de combustión (Environment Canada, citado en Dyke 2004).

■ Tabla 2. Concentraciones orgánicas residuales (ng/Sm³ a 12% de O₂)a de la quema de combustibles derivados de desechos

Especie	Buena combustión	Combustión deficiente
PCDD (total)	70–230	200–600
PCDF (total)	220–600	700–1,300
Cl ₃₋₆ bencenos ^b	4,000–6,000	7,000–16,000

a. Sm³ = metro cúbico estándar, volumen de gas seco medido a 15°C y 101.3 kPa (compárese con Nm³, metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa).

b. Comprende todos los congéneres de tri, tetra y penta, así como los hexa totalmente sustituidos.

En general, es sabido que una temperatura superior a los 900°C (McKay 2002) y un tiempo de residencia de los gases de 2 segundos bastan para lograr la oxidación completa de los PCDD, siempre y cuando el flujo de gases tenga la suficiente turbulencia y haya exceso de O₂. McKay (2002) sugiere que en el horno se debería mantener una temperatura superior a los 1,000°C para garantizar la oxidación de todos los contaminantes orgánicos persistentes.

Otros factores importantes son el exceso de aire y las condiciones de turbulencia en el horno. Una intensa turbulencia impedirá la formación de bolsas de aire frío que no alcancen las temperaturas de oxidación. Una elevada turbulencia también propiciará una distribución uniforme del oxígeno, lo que garantiza la combustión total, y evita zonas subestequiométricas, siempre y cuando haya exceso de aire. Para evaluar la eficiencia de la combustión, se puede recurrir al monitoreo en tiempo real del CO. Una buena combustión implica emisiones bajas de CO (o sea, 30–50 mg/Nm³, 6% de oxígeno para carbón pulverizado; <100 mg/Nm³ para la combustión en lecho fluidizado) (European Commission 2003). Los niveles elevados de CO son signo de una combustión incompleta y de condiciones en las que pueden generarse o sobrevivir contaminantes orgánicos persistentes.

Cuando se utiliza un combustible sólido, a fin de aprovechar al máximo la mezcla y las condiciones de combustión se deben preferir los combustibles pulverizados con poca humedad en lugar de combustibles gruesos triturados o en trozos. La evaporación es una reacción endotérmica, y si se introduce humedad en el horno la temperatura de combustión desciende. En buenas condiciones de turbulencia, la introducción de combustible pulverizado propiciará condiciones isotérmicas en todo el horno y una mezcla óptima con oxígeno.

6.2 Medidas secundarias: Dispositivos de control de la contaminación atmosférica

Se pueden instalar dispositivos para el control de contaminación atmosférica a fin de controlar y limitar mejor las emisiones, pero en el caso de calderas de termoeléctricas e industriales que utilizan combustibles fósiles, estos dispositivos constituyen medidas complementarias o secundarias. La sección III.C (iv) de las presentes directrices contiene más información sobre dispositivos para el control de contaminación atmosférica.

6.3 Otras consideraciones

Hay que señalar que la formación de PCDD, PCDF, PCB y HCB es compleja y que la eliminación de partículas de los gases de salida no significa que no habrá emisión de contaminantes orgánicos persistentes. Aunque de cualquier manera son de gran importancia para nuestro medio ambiente, estas técnicas de limpieza no deberían considerarse como la única solución. Como ya se ha señalado, la calidad del combustible y el control de la combustión son los factores más importantes en la reducción de las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes.

La captura de partículas de gases de salida puede producir cierta cantidad de desechos de polvo contaminados que deben manejarse con precaución, como producto con contenido potencial de contaminantes orgánicos persistentes (UNECE 1998). En general, los productos de la combustión de carbón pulverizado, como cenizas volantes y cenizas de fondo, contienen niveles muy bajos de contaminantes orgánicos persistentes, con un nivel de PCDD inferior a 1 pg EQT-I/g (Meij and te Winkel 2001). Por consiguiente, más que por los contaminantes orgánicos persistentes que pudiera haber, es probable que se prescriban métodos de eliminación para prevenir la liberación de otros posibles contaminantes presentes en el material. En el caso de residuos que contienen niveles elevados de contaminación, antes de eliminarlos se sugiere la aplicación de diversas técnicas de reducción de contaminantes orgánicos persistentes. Ejemplo de ellas son el tratamiento catalítico a bajas temperaturas y con concentraciones reducidas de oxígeno, la extracción de metales pesados y la combustión para destruir materia orgánica, la vitrificación y tecnología de plasma (UNECE 1998).

La Tabla 3 contiene una síntesis de las medidas consideradas como mejores prácticas ambientales y mejores técnicas disponibles.

■ **Tabla 3. Síntesis de medidas recomendadas para calderas industriales y de termoeléctricas**

Aspecto	Mejores prácticas ambientales	Mejores técnicas disponibles	Ventajas ambientales
Combustible	Abastecimiento del combustible. Monitoreo del combustible. Especificaciones del combustible.	Control de la entrada de combustible para verificar cumplimiento de especificaciones, mediante rechazo, sustitución, purificación o mezcla.	Reducción de los contaminantes orgánicos persistentes introducidos en el sistema de combustión.
Condiciones de combustión	Diseñar el reactor apropiado para el uso del combustible especificado. Monitorear las condiciones de combustión, en particular: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura (>900°C) • Tiempo (>1 segundo) • Turbulencia (alta) • Oxígeno (en exceso) Operación y mantenimiento para lograr las condiciones establecidas. Establecer las condiciones y procedimientos de operación específicos para la co-combustión, sobre todo en los procesos de encendido y apagado del horno.	Sistema de control de la combustión automatizado o computarizado para mantener las condiciones ideales de combustión. Óptima oxidación manteniendo una mezcla ideal de combustible/oxígeno.	Destrucción de compuestos de contaminantes orgánicos persistentes en el combustible. Reducción de la formación de contaminantes orgánicos persistentes durante la combustión.
Recolección	Operación y mantenimiento de dispositivos existentes para el control de contaminación atmosférica.	Evaluar la posibilidad de mejoras ambientales instalando dispositivos para el control de contaminación atmosférica. Instalar dispositivos para el control de contaminación atmosférica cuando se puedan demostrar ventajas ambientales.	Reducción del contenido de contaminantes orgánicos persistentes en los gases.
Eliminación de desechos	Recolectar desechos sólidos y líquidos de los procesos de combustión y dispositivos para el control de contaminación atmosférica. Manipularlos y almacenarlos debidamente para reducir al mínimo las liberaciones ambientales.	Evaluar la posibilidad de reducción y reciclado del volumen de desechos. Eliminación segura.	Reducción y control de las liberaciones en el medio ambiente.

7. Niveles de desempeño asociados con mejores técnicas disponibles

Los datos existentes sugieren que para una caldera efectiva que utiliza únicamente carbón, petróleo o gas como combustible, los niveles alcanzables de desempeño de emisiones volumétricas de PCDD/PCDF en calderas industriales y de centrales termoeléctricas que queman combustibles fósiles están en general muy por debajo de 0.1 ng EQT-I/Nm³. (Contenido de oxígeno de 6% para combustibles sólidos y de 3% para combustibles líquidos).

■ Anexo I. Factores de emisión de PCDD/PCDF provenientes de la combustión controlada de carbón bituminoso y sub-bituminoso (EQT ng/kg^b)

Congénera	Absorbedor secador por atomización y filtro de tela para la desulfuración de gases de salida ^c	Precipitador electrostático o filtro de tela ^d
2,3,7,8-TCDD	s.d.	0.0072
TCDD total	0.197	0.046
PeCDD total	0.353	0.022
HxCDD total	1.50	0.014
HpCDD total	5.00	0.042
OCDD total	14.4	0.208
PCDD^e total	21.4	0.333
2,3,7,8-TCDF	s.d.	0.026
TCDF total	1.25	0.202
PeCDF total	2.42	0.177
HxCDF total	6.35	0.096
HpCDF total	22.0	0.038
OCDF total	68.5	0.033
PCDF^e total	101	0.545
PCDD/PCDF TOTAL	122	0.880

s.d. Sin determinar.

a. Datos de la EPA (1998) convertidos de libras/toneladas de carbón quemado a ng/kg.

b. El factor de emisión debería aplicarse a la alimentación de carbón, al quemarse. Las emisiones se expresan en ng de contaminante por kg de carbón quemado.

c. Los factores se aplican a calderas equipadas con absorbedor secador por atomización y filtro de tela para la desulfuración de gases de salida. CFS= calderas de fondo seco

alimentadas con carbón pulverizado, 1-01-002-02/22, 1-02-002-02/22 y 1-03-002-06/22.

d. Los factores se aplican a calderas equipadas con precipitadores electrostáticos o filtros de tela. CFS = Calderas de fondo seco alimentadas con carbón pulverizado, 1-01-002-02/22, 1-02-002-02/22, y 1-03-002-06/22; y calderas ciclónicas, 1-01-002-03/23, 1-02-002-03/23 y 1-03-002-03/23.

e. El PCDD total es la suma de TCDD total hasta OCDD total. El PCDF total es la suma de TCDF total hasta OCDF total.

Referencias

Bailey R.E. 2001. "Global Hexachlorobenzene Emissions." *Chemosphere* 43:2.

CIBO (Council of Industrial Boiler Owners). 2002. *Submission to USEPA by Council of Industrial Boiler Owners*. www.epa.gov/airmarkets/fednox/mar99/bessette.pdf.

Detzel A., Patyk A., Fehrenbach H., Franke B., Gingrich J., Lell M. and Vogt R. 1998. *Investigation of Emissions and Abatement Measures for Persistent Organic Pollutants in the Federal Republic of Germany*. UBA-Texte 75/98. IFEU, Heidelberg.

Dyke P. 2004. *PCB and PAH Releases from Incineration and Power Generation Processes*. R&D Technical Report P4-052. Environment Agency, Bristol, UK. www.pops.int/documents/implementation/nips/guidance/en/techrep.pdf.

Eduljee G.H. and Cains P. 1996. "Control of PCDD and PCDF Emissions from Waste Combustors." In: *Chlorinated Organic Micropollutants* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Environment Canada. 2004. *Controlling PCBs: The Options Available*. Canadian Council of Resource and Environment Ministers. www.ec.gc.ca/pcb/ccme_fs4/eng/pcb33_e.htm.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *External Combustion Sources: Bituminous and Subbituminous Coal Combustion*. Background Report AP-42, 5th Edition, Vol. I.

European Commission. 2003. *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. Draft BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain.

Griffin R.D. 1986. "A New Theory of Dioxin Formation in Municipal Solid Waste Combustion." *Chemosphere* 15:1987–1990.

Lemieux P.M. 1998. *Polychlorinated Dioxins and Furans: Sources, Emissions, Formation and Control*. Presented at UNEP Regional Awareness Raising Workshop on POPs, Puerto Iguazu, Argentina, 1–3 April 1998.

Luthe C., Karidio I. and Uloth V. 1997. "Towards Controlling Dioxins Emissions from Power Boilers Fuelled with Salt-Laden Wood Waste." *Chemosphere* 35:3.

McKay G. 2002. "Dioxin Characterization, Formation and Minimization during Municipal Solid Waste (MSW) Incineration: Review." *Chemical Engineering Journal* 86:343–368.

Meij R. and te Winkel H. 2001. *Health Aspects of Coal Fly Ash*. Paper No. 21, 2001 International Ash Utilization Symposium, Kentucky, USA.

Oland C.B. 2002. *Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection*. Report No. ORNL/TM-2002/19. United States Department of Energy, Office of Industrial Technologies. www.oit.doe.gov/cfm/fullarticle.cfm/id=653.

Rentz O., Gütling K. and Karl U. 2002. *Exemplary Investigation into the State of Practical Realization of Integrated Environmental Protection with Regard to Large Combustion Plants in Germany*. Project 200 46 317. German Federal Environment Agency. www.umweltdaten.de/nfp-bat-e/feuerungsanlagen-e.pdf.

Richards J. 2004. *Basic Concepts in Environmental Sciences*. www.epin.ncsu.edu/apti/ol_2000/module6/dioxins/control/contfram1.htm.

Sloss L.L. 2001. *Organic Compounds from Coal Utilisation*. International Energy Agency Coal Research, London. www.enel.it/ambiente/directory/iea_VOC_pf01-08.pdf.

Sloss L.L. and Smith I.M. 1993. *Organic Compounds from Coal Utilization*. International Energy Agency Coal Resources Report IEACR/63. London.

Tsai M.-Y., Wu K.-T., Huang C.-C. and Lee H.-T. 2002. "Co-firing of Paper Mill Sludge and Coal in an Industrial Circulating Fluidized Bed Boiler." *Waste Management* 22:4.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). 1998. *Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution on Persistent Organic Pollutants*. New York and Geneva. www.unece.org/env/lrtap/full%20text/1998.POPs.e.pdf.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Guidelines on BAT and BEP for Municipal Waste Incineration*. Draft. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/meetings/bat_bep/2nd_session/inf10/EGB2_INF10_munwaste_incineration.pdf.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases Edition 2.1*. UNEP, Geneva. www.chem.unep.ch/pops/pcdd_activities/toolkit/Toolkit%20-%20version/Toolkit-2005_2-1_en.pdf.

Van Remmen T. 1998. "Evaluation of the Available Air Pollution Control Technologies for the Achievement of the MACT Requirements in the Newly Implemented New Source Performance Standards (NSPS) and Emission Guidelines (EG) for Hospital and Medical/Infectious Waste Incinerators." *Waste Management* 18:393–402.

Williams P.T. 1994. "Pollutants from Incineration: An Overview." In: *Waste Incineration and the Environment* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Otras fuentes

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2004. www.atsdr.cdc.gov/.

BREDL (Blue Ridge Environmental Defence League). 2000. *Clean Air Campaign*. www.bredl.org/air/riverbend-danriver.htm.

Buekens A. and Huang H. 1998. "Comparative Evaluation of Techniques for Controlling the Formation and Emission of Chlorinated Dioxins/Furans in Municipal Waste Incineration." *Journal of Hazardous Materials* 62:1–33.

Eduljee G.H. 1994. "Organic Micropollutant Emissions from Waste." In: *Waste Incineration and the Environment* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Egyptian Environmental Affairs Agency. 2004. *National Implementation Plan Project of POPs Convention*. www.eeaa.gov.eg/English/NIPP/NIPP_conv.asp.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Dioxins and Furans*. EPA-454/R-97-003. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.

- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1998. *The Inventory of Sources of Dioxin in the United States*. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/ttnchie1/le/dioxin.pdf.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Exposure and Health Assessment for 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds*. Draft. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin/part2/fm-chap9.pdf.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. *PCDD and PCDF: Sources and Regulations Addendum*. EPA, Washington, D.C. epa.gov/bns/dioxin/PCDD_DF_regs.PDF.
- EPRI (Electric Power Research Institute). 1994. *Electric Utility Trace Substances Synthesis Report*. TR-104614. EPRI, Palo Alto, California.
- Hagenmaier H., Kraft M., Haag R. and Brunner H. 1988. In: *Energy Recovery through Waste Combustion* (eds. Brown A., Evemy P. and Ferrero G.L.) Elsevier Applied Science.
- Harrad S. 1996. "Sources and Fates of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins, Dibenzofurans and Biphenyls: The Budget and Source Inventory Approach." In: *Chlorinated Organic Micropollutants* (eds. Hester R.E. and Harrison R.M.) Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- IPEN (International POPs Elimination Network). 2003. *Information Relevant to the Basel Convention's Hazardous Characteristic H11*. www.ciel.org/Publications/POPs_Basel_Sep03.pdf.
- Kreis S., Hunsinger H. and Seifert H. 2000. "Polypropylene as Regenerable Absorber for PCDD/F Emission Control." *Chemosphere* 40:1029–1031.
- Lohmann R. and Jones K.C. 1998. "Dioxins and Furans in Air and Deposition: A Review of Levels, Behaviour and Processes." *The Science of the Total Environment* 219:53–81.
- Magasiner N. 1996. "Bagasse-Fired Boiler Design with Reference to Co-generation." *International Sugar Journal* 98:100.
- Magasiner N., van Alphen C., Inkson M.B. et al. 2002. "Characterising Fuels for Biomass: Coal-Fired Cogeneration." *International Sugar Journal* 104:251.
- Manno J., Riedel D. and Trembley N. 1995. *Effects of Great Lakes Basin Environmental Contaminants on Human Health*. SOLEC Working Paper presented at State of the Great Lakes Ecosystem Conference. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/grtlakes/solec/94/health.
- New Zealand Ministry for the Environment. 2000. *New Zealand Inventory of Dioxin Emissions to Air, Land and Water, and Reservoir Sources*. www.mfe.govt.nz/publications/hazardous/dioxin-emissions-inventory-mar00.pdf.
- Oberg T. and Bergstrom J. 1985. "Hexachlorobenzene as an Indicator of Dioxin Production from Combustion." *Chemosphere* 14:1081–1086.
- Olsen A. 2001. *Co-burning Biomass Opportunities in Wisconsin: A Strategic Assessment*. Final Report. Contract No. 80081, Division of Energy. www.doa.state.wi.us/docs_view2.asp?docid=56.
- Rigo H.G., Chandler A.J. and Lanier W.S. 1995. *The Relationship between Chlorine in Waste Streams and Dioxin Emissions from Waste Combustor Stacks*. American Society of Mechanical Engineers. www.heartland.org/pdf/23143b.pdf.
- Ruuskanen J., Vartiainen T. et al. 1994. "Formation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Co-combustion of Mixed Plastics with Coal: Exploratory Principal Component Analysis." *Chemosphere* 28:11.
- Tillman D.A. 2000. "Biomass Co-firing: The Technology, the Experience, the Combustion Consequences." *Biomass and Bioenergy* 19:6.

Van den Berg M., Birnbaum L., Bosveld B.T.C., Brunstrom B., Cook P., Feeley M., Giesy J.P., Hanberg A., Hasegawa R., Kennedy S.W., Kubiak T., Larsen J.C., van Leeuwen F.X.R., Liem A.K.D., Nolt C., Peterson R.E., Poellinger L., Safe S., Schrenk D., Tillitt D., Tysklind M., Younes M., Waern F. and Zacharewski T. 1998. "Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife." *Environmental Health Perspectives* 106:775–792.

WHO (World Health Organization). 1998. *Assessment of the Health Risks of Dioxins: Re-evaluation of the Tolerable Daily Intake (TDI)*. Executive Summary of the WHO Consultation, 25–29 May 1998. WHO, Geneva.

Yan J.Y., Alvfors P., Eidensten L. and Svedberg G. 1997. "A Future for Biomass." *Mechanical Engineering* 119:10.

Zevenhoven R. and Kilpinen P. 2001. *Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases*. www.hut.fi/~rzevenho/gasbook.

- ¹ Para obtener una estimación aproximativa, se puede utilizar un factor de conversión de 0.8–0.9 (MWh por tonelada de vapor de alta presión).
- ² 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para más información sobre mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de estas presentes directrices.

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

**Instalaciones de quema de madera
y otras biomásas como combustible**



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.E

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

Categoría de fuentes (e) de la Parte III: Instalaciones de combustión de madera u otros combustibles de biomasa

VI.E	Instalaciones de quema de madera y otras biomásas como combustible	9
1.	Introducción	9
2.	Tecnologías de combustión de biomasa	11
2.1	Selección de la tecnología y tipos de hornos	11
2.2	Hornos de parrilla	12
2.3	Combustión en lecho fluidizado	13
2.4	Otras tecnologías de combustión de madera	13
2.5	Técnicas de conversión de energía	14
2.6	Co-combustión de madera (no tratada) y biomasa asociada a la madera	15
2.7	Gasificación de la madera	15
2.8	Combustión de otras biomásas	16
2.9	Calderas de recuperación en la industria de la pulpa y el papel	16
2.10	Combustión de turba	16
3.	Medidas para el control de emisiones	17
3.1	Medidas primarias y secundarias pertinentes	17
3.2	Características del combustible	18
4.	Productos del proceso	19
4.1	Formación de PCDD y PCDF en procesos de combustión	19
4.2	Emisiones de PCDD/PCDF	19
5.	Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	22
5.1	Medidas primarias y optimización de procesos para reducir las emisiones de PCDD/PCDF	22
5.2	Medidas secundarias	23
6.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles	23
7.	Monitoreo y registro del desempeño	24
	Referencias	24

Lista de tablas

Tabla 1.	Tipos de biomásas utilizadas como combustible	10
Tabla 2.	Tipos de hornos de biomasa con usos y combustibles típicos	11

Tabla 3.	Medidas para el control de emisiones de PCDD/PCDF para plantas de combustión de biomasa.....	18
Tabla 4.	Concentraciones de PCDD/PCDF para diversos tipos de maderas combustibles	20
Tabla 5.	Emisiones de PCDD/PCDF a partir de diversos tipos de biomasa	21
Tabla 6.	Emisiones de PCDD/PCDF de calderas de recuperación de licor negro del proceso Kraft	21

Lista de figuras

Figura 1.	Esquema general de un horno de parrilla vibratoria	13
Figura 2.	Esquema general de un horno de combustión en lecho fluidizado circulante.....	14

■ Resumen

El objetivo principal de las instalaciones de combustión de madera y otras biomasas es la conversión de energía. Las grandes instalaciones de combustión de madera y otras biomasas utilizan principalmente hornos de lecho fluidizado y hornos de parrilla. Entre las tecnologías empleadas en plantas pequeñas se encuentran los hornos de alimentación por la parte inferior y hornos de suspensión de ciclones. Las calderas de recuperación de la industria de la pulpa y el papel siguen determinadas condiciones de combustión. La selección de la tecnología depende de las propiedades del combustible y la capacidad térmica requerida.

Durante la combustión de madera y otras biomasas se pueden formar las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo, sobre todo si el combustible está contaminado. En el caso de plantas alimentadas con biomasa, en especial instalaciones que queman madera, los niveles de emisión asociados a mejores técnicas disponibles por lo general son inferiores a 0.1 ng EQT-I/Nm³. Dentro de las medidas primarias, el control de la calidad del combustible es un factor clave (que comprende la exclusión de madera tratada). Las medidas de control de biomasa no contaminada implican técnicas optimizadas de combustión y eliminación de polvos. La combustión de paja incrementa el ensuciamiento de superficies y requiere técnicas de combustión que no sean sensibles a la escorificación de cenizas.

En este tipo de instalaciones se debería evitar la combustión de biomasa contaminada, como desechos de madera. Las cenizas volantes (especialmente las fracciones más finas) producidas por la combustión de biomasa deben ser depositadas en rellenos sanitarios por su elevado contenido de metales pesados. En muchos países (entre ellos los de la Unión Europea), la madera tratada con compuestos clorados o metales pesados se considera como desecho y está sujeta a las directivas o reglamentos sobre incineración de desechos.

Otros beneficios ambientales derivados de la aplicación de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales son la conservación de recursos y la no emisión de dióxido de carbono proveniente de combustibles fósiles (en caso de sustitución).

1. Introducción

En la actualidad, cerca del 12% de las necesidades mundiales de energía se cubren con la quema de combustibles de biomasa, que pueden ser madera y desechos de madera, materiales de cultivos y licor negro de las plantas de celulosa. La Tabla 1 muestra algunos tipos de materiales utilizados. Para transformar esta biomasa en energía útil se emplea una gran variedad de dispositivos. En países en desarrollo, aproximadamente el 35% de la energía utilizada proviene de biomasa que, en su mayor parte, no tiene un uso comercial, sino tradicional, en las cocinas (véase la sección VI.C de estas directrices). En

un país como Nepal, más del 90% de la energía primaria se produce con combustibles de biomasa tradicionales, principalmente madera de los bosques.

En esta sección se exponen las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para usos a gran escala, por ejemplo en la industria, la generación de energía eléctrica y calefacción residencial, que queman combustibles de biomasa como fuente de energía.

La madera contaminada y otras biomásas contaminadas pueden provenir de numerosas actividades antropogénicas, principalmente de industrias procesadoras de madera (ej., materiales de construcción, muebles, material de embalaje, juguetes, astilleros y construcción en general). Los desechos de madera/biomasa pueden contener pintura, revestimientos, plaguicidas, conservadores, agentes anti-incrustantes y muchos otros contaminantes. Cuando se queman, estos materiales pueden acrecentar la formación de PCDD/PCDF. Por eso, se debería evitar el uso de estos materiales en instalaciones de combustión para conversión de energía y sólo deberían quemarse en incineradores de desechos peligrosos correspondientes. Para más información, véase la sección V.A de las presentes directrices.

■ **Tabla 1. Tipos de biomásas utilizadas como combustible**

Madera: aserrín, corteza, astillas, pellets de viruta de madera
Madera de construcción y troncos
Paja
Pellets de cítricos
Cáscara de coco
Cáscara de nuez (ej., almendra, maní)
Cáscara de granos de café
Cascarilla de arroz
Turba
Bagazo de caña de azúcar
Estiércol
Licor negro de plantas de celulosa

En países industrializados, la contribución total de la biomasa a la mezcla primaria de energía es de tan solo 3%, pero se estima que este porcentaje aumentará porque cada vez más países usan biomásas como combustible en vez de quemar combustibles fósiles para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Esta tendencia implica principalmente la combustión de combustibles de biomasa comerciales en dispositivos modernos (ej., plantas de co-generación alimentadas con astillas para producir calor y energía). También se emplean para calefacción y cocinas residenciales, suministro industrial de calor y generación de energía eléctrica a gran escala en plantas alimentadas con carbón (IEA Bioenergy 2004).

2. Tecnologías de combustión de biomasa

2.1 Selección de la tecnología y tipos de hornos

En la selección de la tecnología, el ingreso total de calor y la cantidad de madera combustible son de gran importancia. Para las grandes plantas, la combustión en lecho fluidizado y los hornos de parrilla son los más apropiados. Entre las tecnologías para plantas pequeñas se encuentran los hornos alimentados por la parte inferior y hornos ciclónicos por suspensión. En la Tabla 2 se exponen las capacidades térmicas típicas así como las propiedades del combustible requeridas para diversos tipos de técnicas de combustión de madera.

■ **Tabla 2. Tipos de hornos de biomasa con usos y combustibles típicos**

Uso	Tipo	Tamaño típico ^a	Combustibles	Cenizas %	Contenido de agua %
Manual	Calderas de troncos de madera	5 kW–50 kW	Tronco, residuos pegajosos de madera	<2	5–30
Automático	Hornos mecánicos de alimentación inferior	20 kW–2.5 MW	Astillas y residuos de madera	<2	5–50
	Hornos de parrilla móvil	150 kW–15 MW	Todos las maderas y la mayoría de las biomasa	<50	5–60
	Pre-horno con parrilla	20 kW–1.5 MW	Madera seca (residuos)	<5	5–35
	Horno de alimentación inferior con parrilla giratoria	2 MW–5 MW	Astillas de madera con alto contenido de agua	<50	40–65
	Quemador simple	3 MW–5 MW	Fardos de paja	<5	20
	Hornos para fardos enteros	3 MW–5 MW	Fardos enteros	<5	20
	Hornos para paja	100 kW–5 MW	Fardos de paja con cortador de fardos	<5	20
	Lecho fluidizado estático	5 MW–15 MW	Biomasa diversa d <10 mm	<50	5–60
	Lecho fluidizado circulante	15 MW–100 MW	Biomasa diversa d <10 mm	<50	5–60
	Quemador de polvo con flujo de arrastre	5 MW–10 MW	Biomasa diversa d <5 mm	<5	<20

Uso	Tipo	Tamaño típico ^a	Combustibles	Cenizas %	Contenido de agua %
Co-combustión ^b	Lecho fluidizado estático	Total 50 MW–150 MW	Biomasa diversa d <10 mm	<50	5–60
	Lecho fluidizado circulante	Total 100 MW–300 MW	Biomasa diversa d <10 mm	<50	5–60
	Quemador en cascada	Paja 5 MW–20 MW	Fardos de paja	<5	20
	Combustor de polvo en calderas de carbón	Total 100 MW–1 GW	Biomasa diversa d <2–5 mm	<5	<20

a. kW = kilovatio; MW = megavatio; GW = gigavatio.

b. La biomasa constituye por lo general menos del 10% del aporte total de combustible.

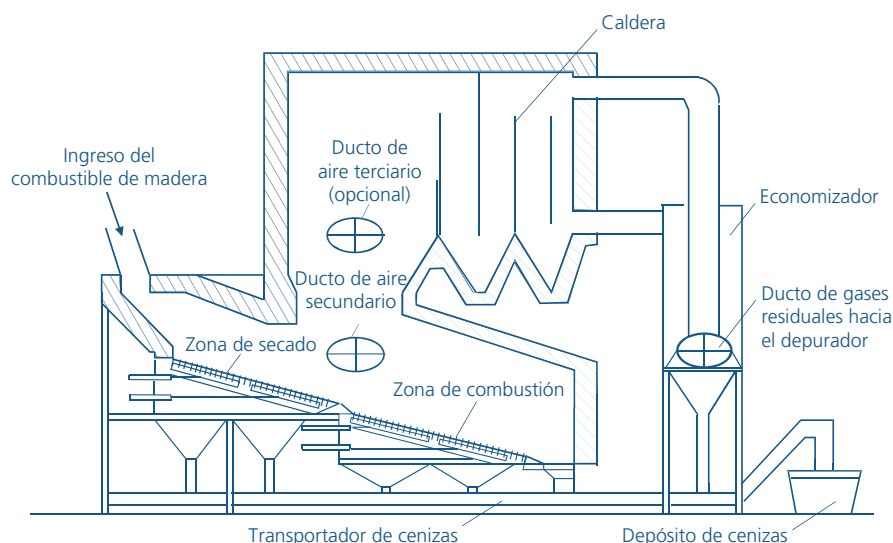
Fuente: Nussbaumer 2003.

La biomasa típica proveniente de la madera tiene un contenido de ceniza inferior a 5%; un mayor contenido de ceniza puede atribuirse a otro tipo de biomasa como los lodos de alcantarillado. Es importante eliminar el contenido de cenizas ya que pueden contener contaminantes orgánicos persistentes producidos accidentalmente y otras sustancias tóxicas, según el material quemado (más información en la sección III.C, iv, subsección 2.1, de estas directrices).

2.2 Hornos de parrilla

Hoy en día, los hornos de parrilla constituyen la tecnología de combustión más común para desechos y residuos de madera. Con esta técnica, la madera se desplaza por la cámara de combustión con la ayuda de parrillas estáticas en rampa, parrillas giratorias, parrillas vibratoras (Figura 1) o parrillas móviles. Los sistemas de combustión de parrilla son adecuados para todo tipo de residuos y desechos de tamaños entre 20 y 300 mm. No obstante, las partículas finas, como madera pulverizada, se pueden inyectar mediante quemadores de tipo lanza adicionales. La dirección del combustible y del aire en las parrillas desplazables y parrillas vibratoras inciden en la eficiencia de la combustión. En lo que respecta a generación de vapor, el diseño del horno de los sistemas de combustión de parrilla ofrece diversas opciones para reducción primaria de emisiones, por ejemplo, la combustión por etapas y la recirculación de gases de salida. La inversión en sistemas de combustión de parrilla depende considerablemente de la tecnología de la parrilla y de la tecnología para depurar los gases de salida. Si se compara con las plantas de combustión de lecho fluidizado, sobre todo para capacidades menores, la inversión específica en relación con el aporte calorífico total es considerablemente más baja (CSTB 2000).

■ **Figura 1. Esquema general de un horno de parrilla vibratoria**



2.3 Combustión en lecho fluidizado

La combustión en lecho fluidizado se utiliza para diversos tipos de combustibles sólidos. En una unidad convencional de lecho fluidizado, el combustible sólido se mantiene fluidizado inyectando aire junto con un material de lecho inerte, principalmente a base de piedra caliza o arena, y la ceniza combustible. Para quemar madera se utilizan principalmente dos tecnologías de lecho fluidizado: combustión en lecho fluidizado atmosférico con burbujeo y combustión en lecho fluidizado circulante atmosférico (Figura 2). La combustión en lecho fluidizado es adecuada para una gran variedad de combustibles, incluso los de muy baja calidad. Para la combustión de madera se pueden utilizar casi todos los tipos de residuos y desechos de madera. También se puede quemar madera con 60% de humedad. Los sistemas de lecho fluidizado son adaptables incluso a cargas de operación bajas. Por lo general, se puede realizar un ciclo entre cargas altas y bajas sin suministrar combustible auxiliar y a una velocidad mayor que en otras tecnologías de combustión.

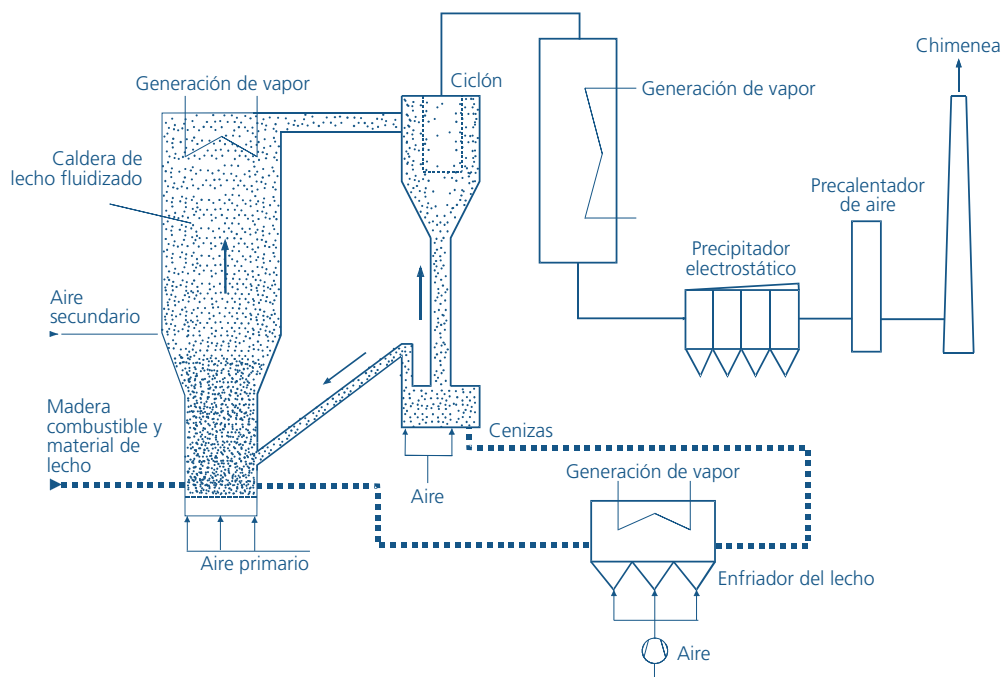
Se puede suprimir la corrosión inducida por cloro a altas temperaturas instalando el último sobrecalentador en el lecho. En comparación con muchas otras tecnología de combustión, la baja temperatura de combustión en los sistemas de lecho fluidizado ofrece varias ventajas operativas para el control de emisiones. La inversión en plantas de combustión con lecho fluidizado depende en gran medida de la tecnología utilizada y el tipo de sistema de depuración de gases de salida instalado. Para plantas por debajo de 30 MW, la combustión en lecho fluidizado circulante requiere una inversión específica considerablemente mayor que la de lecho burbujante (CSTB 2000).

2.4 Otras tecnologías de combustión de madera

Otras tecnologías de combustión de madera son los hornos de alimentación por la parte inferior, hornos ciclónicos (hornos de mufla), hornos giratorios, hornos de turbulencia, hornos con ventilador y quemadores de polvo. Los hornos de alimentación inferior u hornos con hogar automático de alimentación inferior son particularmente adecuados para la combustión de partículas de madera secas y no muy gruesas con bajo contenido

de ceniza. Esta técnica se utiliza para potencias caloríficas totales hasta de 5 MW. En comparación con los hornos convencionales de parrillas, la inversión específica suele ser más baja. Dado que los hornos de suspensión requieren un contenido de polvo por lo menos de 50%, su aplicación se limita sobre todo a la industria de tratamiento de madera. Los quemadores de polvo se usan para polvo de madera de granulometrías hasta 1 mm. Este tipo de quemador se utiliza para el secado de astillas de madera e inyección de polvo de madera en hornos de cemento (CSTB 2000).

■ **Figura 2. Esquema general de un horno de combustión en lecho fluidizado circulante**



2.5 Técnicas de conversión de energía

Respecto a la conversión de energía en etapas posteriores a los hornos de combustión de madera, es preciso distinguir entre los sistemas de intercambio de calor (calderas) y los sistemas posteriores de producción combinada de calor y energía (ej., turbinas de vapor, motores de vapor). El tipo de caldera que se utilice dependerá del medio de transferencia del calor, el tamaño de la planta y la calidad requerida de la energía. Las calderas pirotubulares se utilizan para la producción ulterior de agua caliente o vapor en hornos pequeños y medianos alimentados con madera. La transferencia de calor se produce únicamente por convección. Las calderas acuotubulares se utilizan en plantas de combustión grandes y medianas alimentadas con madera. El agua que se va a evaporar fluye por tubos rodeada de los gases de salida calientes. La transferencia de calor se produce principalmente por radiación. En comparación con las calderas pirotubulares, se pueden alcanzar presiones de operación considerablemente mayores –hasta de 100 bar. En general, a partir de los hornos alimentados con madera se produce únicamente calor y electricidad, por lo que puede obviarse la generación de electricidad de condensación. Sin embargo, las plantas combinadas de calor y electricidad también pueden requerir capacidades de condensación cuando no utilicen el calor generado (CSTB 2000).

2.6 Co-combustión de madera (no tratada) y biomasa asociada a la madera

La co-combustión significa la quema de desechos y residuos de madera junto con otros materiales de desecho o con combustibles fósiles. El objetivo es obtener efectos de sinergia entre dos procesos de combustión. La co-combustión tiene como ventaja el ahorro en los costos de operación por el uso de combustibles secundarios más baratos, y una eficiencia de combustión del proceso combinado mayor que la que se obtiene con los dos procesos efectuados por separado. En cuanto a los residuos y desechos de madera, las prácticas respectivas son la co-combustión en hornos de cemento, co-combustión en plantas alimentadas con carbón, co-gasificación con combustibles fósiles y desechos y la co-incineración en plantas de incineración de desechos (CSTB 2000). Las secciones V.A, V.B, y VI.D de las presentes directrices contienen más información sobre este tema.

2.7 Gasificación de la madera

La gasificación de la madera y desechos de madera consiste en convertir en un combustible gaseoso los residuos sólidos y líquidos producidos por la descomposición termoquímica de la materia orgánica de la madera a altas temperaturas, mediante la adición de reactivos oxidantes. El objetivo principal de la gasificación de la madera es transferir la mayor cantidad posible de energía química del material leñoso a una fracción gaseosa (gas productor), compuesta principalmente de productos combustibles gaseosos de bajo peso molecular.

La técnica de gasificación por lo general está ligada al tipo de reactor. Las dos técnicas fundamentales de gasificación existentes son la de lecho fijo y de lecho fluidizado. Para aportes caloríficos totales inferiores a 5 MW, suelen preferirse los gasificadores de lecho fijo; los de lecho fluidizado se emplean principalmente en plantas de mayor capacidad.

El contenido de energía del gas productor derivado de la gasificación puede emplearse ya sea térmicamente, para encender una caldera, o para otro proceso térmico (por separado o mediante co-combustión, por ejemplo, en una caldera electrotérmica existente o en un horno de cemento), o bien, mecánicamente, para la generación de energía en motores de gas o turbinas de gas. El gas productor también puede utilizarse para la síntesis de metanol o en celdas de combustible.

El sistema de depuración del gas productor se determina en función de la concentración de impurezas y de las condiciones que requiera la técnica de uso de gas que se esté empleando. Según sea esta técnica, la depuración de gas se efectuará para evitar la erosión, la corrosión y las deposiciones, y para garantizar el cumplimiento de los límites de emisión. Cabe distinguir dos conceptos de depuración de gas distintos: depuración en frío (o húmeda) y depuración en caliente. La depuración en caliente se considera preferible para sistemas avanzados de gran eficiencia, ya que se alcanzan eficiencias eléctricas y globales más altas y no se generan aguas residuales o condensados contaminados. Aunque la gasificación puede considerarse una técnica comprobada y fiable, en el caso de todas las plantas generadoras de electricidad, ya sea en turbinas de gas o motores de gas, la depuración de gases sigue siendo una restricción crucial. El proceso de depuración de gases implica algunos problemas como el control del proceso, el costo de eliminación de residuos de gasificación y lo elevado de la inversión y de los costos operativos del sistema mismo de depuración (CSTB 2000).

2.8 Combustión de otras biomásas

Otras biomásas combustibles son los biocombustibles sólidos, como la paja y los restos de cultivos, y combustibles líquidos, como el aceite de canola. La combustión de paja incrementa el ensuciamiento de superficies y requiere técnicas de combustión que no sean sensibles a la escorificación de las cenizas. Como hay mayores ingresos de materia mineral y de cloro que con la combustión de madera, también hay un incremento de emisiones de polvo, cloruro de hidrógeno (HCl), dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) (LfU 2002). En la subsección 4 *infra* se presentan ejemplos de resultados de pruebas de emisión.

2.9 Calderas de recuperación en la industria de la pulpa y el papel

La pulpa se produce con métodos mecánicos, termomecánicos, químico-mecánicos y químicos (véase sección V.C de estas directrices). En el pulpaje químico, las fibras se desintegran por procesos químicos. En el proceso de cocción se emplean sustancias químicas para penetrar el lumen de la fibra y disolver la lignina de las paredes de la célula para llegar a la capa intercelular o lamela media. La lignina tiene que ser retirada de la lamela para liberar las fibras. Para ello, la lignina y muchas otras sustancias orgánicas se ponen en solución. Las sustancias químicas utilizadas para el pulpaje con sulfato (proceso Kraft) y sulfito se recuperan de esta solución por combustión en calderas, lo que también permite la recuperación de energía.

Las calderas de recuperación en el pulpaje con sulfato (proceso Kraft) operan, en una primera fase, en condiciones reductoras, con lo que se forma sulfuro de sodio. Queda un residuo fundido compuesto de sulfuro de sodio y carbonato de sodio. En la segunda y tercera fases del proceso de combustión, se suministra aire de combustión por etapas para garantizar una combustión completa. En ese proceso pueden incorporarse los gases odoríferos recolectados.

Las calderas de recuperación en el proceso con sulfito no funcionan por etapas. La lejía se quema en condiciones de oxidación con poco exceso de aire.

2.10 Combustión de turba

En la Unión Europea, Irlanda y Finlandia se utiliza considerablemente la turba (considerada como combustible fósil) como combustible. Las tecnologías de combustión de turba son similares a las de combustión de carbón (véase sección VI.D de estas directrices). Hoy en día la turba se quema, sobre todo, en calderas de lecho fluidizado (combustión con lecho fluidizado de burbujeo o circulante). El aporte típico de combustible de estas calderas es de menos de 200 MW, y en ellas se produce electricidad o una combinación de electricidad y calor para la industria local o el sistema de calefacción de la región. Las calderas alimentadas con turba suelen estar diseñadas para quemar otros combustibles de bajo poder calorífico, y a veces también carbón. El aceite pesado se utiliza comúnmente como combustible auxiliar de encendido.

Por sus características, la turba es susceptible de co-incinerarse con la madera. Técnicamente sería más difícil que las plantas existentes utilizaran sólo madera como combustible, por problemas de corrosión y ensuciamiento. La capacidad para quemar turba también garantiza un suministro continuo de combustible en zonas donde la madera es insuficiente para satisfacer la demanda (European Commission 2006).

3. Medidas para el control de emisiones

3.1 Medidas primarias y secundarias pertinentes

La reducción de emisiones de PCDD/PCDF comprende las medidas primarias y secundarias que se resumen en la Tabla 3 (Baumbach and Zuberbühler 2002; CSTB 2000; LfU 2002).

Las medidas primarias pertinentes son similares a las que se aplican al sector de incineración de desechos. En el caso de la biomasa no tratada, las medidas secundarias se reducen a la eliminación de polvo. Los hornos más pequeños pueden utilizar multiciclones para lograr concentraciones de polvo de 100–150 mg/Nm³ en los gases de salida depurados. Los filtros de tela o precipitadores electrostáticos logran concentraciones de polvo en un orden de <5 a 25 mg/Nm³ (Para una orientación general sobre la depuración de gases de salida, véase la sección III.C (iv) de estas directrices).

En los procesos posteriores a la combustión de desechos de madera, la depuración de gases de salida puede realizarse con procesos de absorción o adsorción. En términos generales, por ser de menor costo, sólo se emplean procesos de adsorción. Como parte del proceso de combustión de madera, la inyección de sorbentes secos (reactor de flujo de arrastre) ha ganado terreno por su simplicidad técnica y bajo costo. Como agente de adsorción se suele utilizar una mezcla de sustancia cálcica y carbón activado o carbón activado a base de lignito. Los posibles agentes cálcicos son piedra caliza (CaCO₃), cal (CaO) y cal hidratada (Ca(OH)₂). Los agentes cálcicos eliminan dióxido de azufre (SO₂), cloruro de hidrógeno (HCl) y fluoruro de hidrógeno (HF), y los diversos tipos de carbono activado reducen las emisiones de metal pesado (mercurio, cadmio y arsénico), emisiones de PCDD/PCDF y emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos. La mezcla comúnmente utilizada en un reactor de flujo de arrastre está compuesta por 85%–95% de agentes cálcicos y 5%–15% de carbón activado. Como medida secundaria para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), en particular al final de los procesos de grandes instalaciones de combustión de desechos de madera, se puede recurrir a la reducción no catalítica selectiva, aunque también puede utilizarse la reducción catalítica selectiva. La reducción catalítica selectiva ha sido empleada en combustores de lecho fluidizado alimentados con biomasa. Esta técnica plantea el problema de la desactivación del catalizador, que es más rápida cuando se quema biomasa que al quemar carbón, sobre todo en hornos de parrilla, y en el caso de la paja.

■ **Tabla 3. Medidas para el control de emisiones de PCDD/PCDF para plantas de combustión de biomasa**

Opciones de gestión	Nivel de emisión (%)	Costos estimados	Riesgos de gestión
Medidas primarias			
Control de la calidad del combustible (ej., valor calorífico, contenido de agua, contaminantes)	Nivel de emisión resultante no cuantificado	Combustible más costoso	El alto contenido de agua aumenta la formación de PCDD/PCDF
Combustión total optimizada (ej., reducción del exceso de aire)		Sin costos adicionales para las nuevas instalaciones	
Tiempo de residencia suficiente de los gases de salida en la zona caliente del horno			
Medidas secundarias			
Eliminación eficiente de polvo	Eficiencia media		Temperatura del filtro <200°C
Inyección de sorbente seco Reducción catalítica selectiva	Eficiencia alta	Inversión adicional. ^a reducción catalítica selectiva entre 110% y 180%	Se precisa la eliminación de los sorbentes usados; poco común en plantas de combustión de biomasa virgen

a. Porcentaje relativo a la inversión para horno, caldera y recolector de polvos de plantas de combustión de madera con capacidad térmica de 1–10 MW.

3.2 Características del combustible

Durante la combustión de biomasa, la calidad del combustible desempeña un papel importante en la formación de PCDD/PCDF. Los PCDD/PCDF se forman siempre durante la combustión de madera con ayuda de precursores como los fenoles y la lignina, o por reacciones *de novo* en presencia de partículas de carbono y cloro. Cabe esperar altos niveles de emisión al quemar madera tratada (desechos de madera). Los residuos de madera (de desecho e industrial) a menudo contienen diversos tipos de contaminantes (arsenato de cobre cromado, pentaclorofenol, creosota, adhesivos, resinas, pintura y otros revestimientos de superficies). Otra fuente importante de PCDD pueden ser los desechos de madera salina quemados en calderas generadoras de energía para la fabricación de pulpa y papel (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

La combustión de madera contaminada, como desechos de maderas municipales y de demolición, debería realizarse únicamente en instalaciones que tienen sistemas eficientes de control de emisiones, como las plantas de incineración de desechos (véase sección V.A de estas directrices) (Nussbaumer 2003).

La biomasa puede tener un elevado contenido de humedad; por eso se deben utilizar secadores antes de la combustión. Se considera que los secadores a base de vapor son seguros, de bajo impacto ambiental. Otro método es el de secado con los gases de salida, que luego son enviados a la chimenea. En este caso es posible que se emitan compuestos orgánicos, como parafinas, o compuestos aromáticos (European Commission 2006).

4. Productos del proceso

4.1 Formación de PCDD y PCDF en procesos de combustión

La reacción predominante que da lugar a la formación de PCDD/PCDF en procesos de combustión es la síntesis *de novo*. La sección III.C (i) de estas directrices proporciona información general sobre mecanismos de formación de PCDD/PCDF. A continuación se exponen las consideraciones específicas relativas a la combustión de biomasa.

Los PCDD se pueden formar en ausencia de compuestos orgánicos clorados; basta la presencia de carbono particulado y una fuente de cloro. Algunas investigaciones en una combustor estático de parrilla han demostrado que la cantidad total formada de PCDD/PCDF y bifenilos policlorados coplanares (PCB) es proporcional al contenido de cloro de las muestras de combustión, cuando la temperatura de la cámara de combustión se sitúa por debajo de los 700°C. En cambio, cuando la temperatura de la parrilla de la cámara de combustión es superior a 800°C, hay tan solo una ligera formación de PCDD/PCDF y PCB coplanares, independientemente del contenido de cloro del combustible (Yasuhara, Katami and Shibamoto 2003).

Las mejores condiciones de combustión en grandes instalaciones suelen incidir en la concentración de PCDD/PCDF. Algunas pruebas han demostrado que, aunque se procese material con alto contenido de halógenos, las concentraciones siguen siendo inferiores a las obtenidas en pequeñas instalaciones que utilizan madera natural. Al incorporar materiales halogenados, se observó una relación muy clara entre monóxido de carbono (CO) y concentraciones de PCDD/PCDF. La gran incidencia de la calidad de la combustión sobre las concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF se hizo evidente al incrementarse las concentraciones de CO y disminuir, simultáneamente, la temperatura de los gases de salida (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

4.2 Emisiones de PCDD/PCDF

4.2.1 Combustión de madera o desechos de madera

La incidencia de la calidad del combustible y de las condiciones de combustión en la emisión de PCDD/PCDF se muestra en la Tabla 4.

■ **Tabla 4. Concentraciones de PCDD/PCDF para diversos tipos de maderas combustibles**

Tipo de madera	PCDD/PCDF min. ng EQT-I/m ³ (a 11% O ₂) ^a	PCDD/PCDF máx. ng EQT-I/m ³ (a 11% O ₂)
Madera en trozo (natural)	0.02	0.13
Astillas (natural)	0.004	0.88
Desechos de madera	0.03	18.00
Placa aglomerada sin cloro/metales pesados	0.03	0.10
Placa aglomerada con PVC o cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	0.05	12.28
Placa aglomerada con pentaclorofenol	0.21	5.14

a. 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo). Para información sobre mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3 de estas directrices.

Fuente: Nussbaumer 2004.

Lavric, Konnov y De Ruyck (2004) presentan una reseña completa de resultados de pruebas de PCDD/PCDF en instalaciones que queman madera.

4.2.2 Combustión de otras biomásas

Launhardt y Thoma realizaron pruebas en diferentes biocombustibles herbáceos (paja, cereales de plantas enteras y desperdicios de heno) y en madera de abeto para evaluar su potencial de formación de PCDD/PCDF, fenoles policlorados, bencenos policlorados e hidrocarburos aromáticos policíclicos durante la combustión. Los ensayos fueron realizados en un horno de carga automática que quema diversos combustibles para usos domésticos, de una potencia de 50 kW. Los resultados de emisión de CO indicaron condiciones de combustión relativamente uniformes. Se analizaron los gases de salida y diferentes fracciones de cenizas. La concentración de PCDD fue del rango de 0.052 a 0.891 ng EQT-I/Nm³ a 13% de O₂ (Tabla 5). Todas las emisiones de la madera fueron relativamente bajas. Al utilizar combustibles herbáceos se detectó un incremento de emisiones, entre 10 y 25 veces más elevadas, de PCDD/PCDF, fenoles policlorados y bencenos policlorados (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

■ Tabla 5. Emisiones de PCDD/PCDF a partir de diversos tipos de biomasa

Tipo de combustible	PCDD/PCDF ng EQT-I/m ³
Madera (abeto)	0.052
Paja (trigo)	0.656
Heno	0.891
Triticale	0.052
Pellets de canola	0.245

Fuente: LfU 2002.

Los datos de emisiones de PCDD/PCDF de la combustión de biomasa líquida son escasos. Algunas pruebas en un motor de aceite de canola utilizado para producir calor y energía (90 kW) arrojaron concentraciones de PCDD/PCDF de 4–7 pg EQT-I/m³. Las concentraciones de PCB fueron de a 40–81 ng/m³ (LfU 2002).

4.2.3 Combustión de licor negro

La Tabla 6 presenta ciertos factores de emisión de calderas de recuperación de licor negro del proceso Kraft.

■ Tabla 6. Emisiones de PCDD/PCDF de calderas de recuperación de licor negro del proceso Kraft

Combustible	Factor de emisión (EQT-I)	Factor de emisión (EQT- OMS)	Referencia
Sólidos de licor negro ^a	0.10–0.15 ng/kg	0.10–0.16 ng/kg	EPA 2000
	0.029–0.065 ng/kg	0.028–0.072 ng/kg	EPA 2000
	0.07 ng/kg		UNEP 2005

a. En general, 1 kg de licor negro (70 % de contenido de agua) corresponde a un volumen de gas de salida de 5–8 m³ (entre 5% y 8% de contenido de oxígeno).

4.2.4 Combustión de turba

En European Commission (2006) se registran emisiones de PCDD de una caldera de lecho fluidizado atmosférico equipada con un filtro de tela, a base de 50% de turba y 50% de corteza. Estas emisiones de PCDD/PCDF fueron de 0.008 ng EQT-I/Nm³ (nivel de emisión de polvo: 10 mg/Nm³).

4.2.5 Otras liberaciones de PCDD/PCDF derivadas de la combustión de biomasa

Los PCDD/PCDF son descargados junto con residuos sólidos de combustión, como cenizas de fondo y cenizas volantes. En general, las concentraciones de PCDD/PCDF aumentan cuando el tamaño de las partículas disminuye (LfU 2002). Por lo tanto, las concentraciones de contaminantes en cenizas volantes tienden a ser mayores que en las cenizas de fondo.

Pohlandt y Marutzky analizaron el horno, la caldera y las cenizas volantes. Se recolectaron muestras de diferentes plantas del sector maderero, de una planta de ahumados y de la combustión de madera impregnada con conservadores inorgánicos a base de boro, cromo y cobre en un horno de laboratorio de dos etapas. Los autores observaron que las cenizas volantes presentaban los niveles más elevados de PCDD/PCDF. Las concentraciones de PCDD/PCDF en cenizas provenientes de madera impregnada eran mayores que las de las cenizas provenientes de la combustión de madera impregnada diluida, pero inferiores a las de cenizas volantes provenientes de plantas industriales alimentadas con madera. La concentración de PCDD era mayor en las cenizas volantes que en las cenizas de fondo. Esta observación fue confirmada por Wunderli *et al.* y Yamamura *et al.* (Lavric, Konnov and De Ruyck 2004).

Particularmente en el caso de la combustión de desechos de madera, las cenizas volantes recolectadas tienen que ser eliminadas de manera ambientalmente adecuada (véase subsección 2.1 de la sección III.C (iv) de estas directrices).

Las cenizas volantes procedentes de unidades de combustión de paja deberían ser depositadas en un relleno sanitario, sobre todo por su alto contenido de cadmio. Las cenizas de fondo por lo general regresan a los campos o se utilizan como material de construcción de carreteras si cumplen con determinados requisitos en cuanto a sus propiedades físicas y químicas (European Commission 2006).

La fracción más fina de cenizas volantes debe ser enviada a rellenos sanitarios por su alto contenido de metales pesados y contaminantes orgánicos persistentes. El adsorbente utilizado también debe confinarse en rellenos.

5. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

5.1 Medidas primarias y optimización de procesos para reducir las emisiones de PCDD/PCDF

Las mejores técnicas disponibles para reducir emisiones de PCDD/PCDF pueden implicar las siguientes medidas (Nussbaumer and Hasler 1998):

1. Prevención de la incineración ilegal de desechos.
2. La combustión de madera contaminada, como la madera de desecho de los sistemas de recolección urbana y la madera de demolición, debería ser exclusiva de las instalaciones que tengan un control eficiente de emisiones – es preferible que no se utilice este material en calderas y que, en cambio, sea tratado como desecho.
3. Control de la calidad del combustible (ej., valor calorífico, contenido de agua, contaminantes).
4. Tecnología de combustión optimizada: Mejora de la combustión total de gases y cenizas volantes y reducción del contenido de polvo:

- Optimizar la razón de exceso de aire a $<1.5-2$, pero hay que proceder con cuidado, ya que cualquier cambio en la proporción de aire puede afectar la cantidad de otras emisiones.
 - Buena calidad de la mezcla de gas y aire (alta turbulencia).
 - Suficiente tiempo de residencia en la zona caliente.
 - Perturbación mínima del lecho incandescente y distribución homogénea del aire primario.
 - Incorporación opcional de un sistema de reducción selectiva no catalítica para la reducción de NO_x .
5. Medidas en la caldera:
- Tiempo de residencia mínima en el rango de temperatura de 180°C a 500°C , y capacidad mínima de deposición de polvo.
6. Funcionamiento óptimo de la planta:
- Aplicación de tecnologías avanzadas de control de la combustión para garantizar la combustión total óptima en la práctica.
 - Funcionamiento estacionario, sin interrupciones reiteradas, previniendo cambios rápidos de calor y demanda.
 - Limpieza de los gases de salida en la zona caliente a intervalos regulares.

5.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias de control son técnicas de control de la contaminación y comprenden las siguientes medidas:

1. Depuración óptima de gases:
 - Enfriamiento brusco de los gases de combustión ($<200^\circ\text{C}$) antes de que pasen por los filtros, para evitar la ventana de formación *de novo* (o síntesis).
 - Separación de PCDD/PCDF en separadores de polvo (precipitadores electrostáticos, filtros de tela) en combinación con inyección de sorbente (si es necesario).
2. Destrucción optativa de PCDD/PCDF por oxidación catalítica, es decir, en combinación con un sistema de reducción catalítica selectiva, para la reducción de NO_x .

6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles

Para las plantas que queman biomasa, en particular instalaciones alimentadas con madera, los niveles de emisión asociados a mejores técnicas disponibles son generalmente inferiores a 0.1 ng EQT-I/m^3 .

7. Monitoreo y registro del desempeño

Las emisiones de PCDD/PCDF deberían ser monitoreadas siguiendo métodos internacionales estandarizados.

Para garantizar la combustión completa, los hornos deberían estar equipados con instrumentos de medición que calculen constantemente las concentraciones en masa de las emisiones de monóxido de carbono.

Para garantizar el buen desempeño del equipo de control de emisiones, los hornos deberían estar equipados con instrumentos de medición que midan constantemente las concentraciones en masa de las emisiones, en términos cualitativos y cuantitativos (según los requisitos de los diferentes tamaños de plantas). Para más información sobre monitoreo véase la sección III (vi) de las presentes directrices.

Además, se deberían aplicar procedimientos de control de calidad en cuanto a la composición del combustible.

Referencias

Baumbach G. and Zuberbühler U. 2002. *Entwicklung eines Feuerungskonzeptes zur Verbesserung des Ausbrandes bei gleichzeitiger NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung im gewerblichen Bereich*. Report BWPLUS 3 96 007. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, University of Stuttgart.

CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). 2000. *Energy-Efficient Technologies from Demolition, Packaging and Industrial Wood Waste*. Final Report. Programme THERMIE, Type B Action (STR-1965-98-FR), Phase I. CSTB with Quasco, CTBA, La Calade and DFIU/IFARE.

EPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds, Part I: Estimating Exposure to Dioxin-Like Compounds Vol. 2: Sources of Dioxin-Like Compounds in the United States*. Draft Final Report. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/ncea/pdfs/dioxin/part1/volume2/volume2.pdf.

European Commission. 2006. *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. Formally adopted BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm>.

IEA Bioenergy. 2004. *Biomass Combustion and Co-firing: An Overview*. IEA Bioenergy Task 32. www.ieabioenergy-task32.com.

Lavric E.D., Konnov A.A. and De Ruyck J. 2004. "Dioxin Levels in Wood Combustion: A Review." *Biomass and Bioenergy* 26:115–145.

LfU (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz). 2002. *Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe*. Zusammenfassender Bericht zu 15 Teilprojekten.

Nussbaumer T. 2003. "Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction." *Energy and Fuels* 17:1510–1521.

Nussbaumer T. 2004. *Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung*. Umwelt-Materialien Nr. 172. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Nussbaumer T. and Hasler P. 1998. *Emissions of PCDD/F from Biomass Combustion*. Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, 8–11 June 1998, Würzburg (Germany).

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Yasuhara A., Katami T. and Shibamoto T. 2003. "Formation of PCDDs, PCDFs, and Coplanar PCBs from Incineration of Various Woods in the Presence of Chlorides." *Environ. Sci. Technol.* 37:1563–1567.

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Procesos específicos de producción de
productos químicos que liberan sustancias
que figuran en el Anexo C



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.F

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

**Categoría de fuentes (f) de la Parte III:
Procesos de producción de productos químicos determinados
que liberan sustancias químicas que figuran en el Anexo C**

VI.F	Procesos específicos de producción de productos químicos que liberan sustancias que figuran en el Anexo C	9
1.	Descripción de los procesos	9
1.1	Introducción a procesos químicos orgánicos	9
1.2	Cloruro de hidrógeno como co-producto	11
1.3	Cloración directa	11
1.4	Oxicloración	11
1.5	Aislamiento del producto principal	14
1.6	Destrucción de subproductos	15
1.7	Resumen: Aspectos comunes de los procesos orgánicos	16
1.8	Procesos químicos inorgánicos	17
2.	Fuentes potenciales de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C	19
2.1	Proceso de oxicloración	21
2.2	Otros contactos con cloro elemental	22
2.3	Dióxido de titanio, proceso de cloro	22
2.4	Destrucción de subproductos	22
2.5	Productos	23
3.	Procesos alternativos que impiden la formación de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C	23
3.1	Consideraciones generales	23
3.2	Dióxido de titanio, proceso con sulfato	23
4.	Medidas primarias y secundarias	25
4.1	Métodos de producción que reducen la emisión de sustancias que figuran en el Anexo C	25
4.2	Medidas primarias	26
4.3	Medidas secundarias: Mejores técnicas disponibles para prácticas de tratamiento de desechos	28
5.	Resumen de medidas	29
6.	Normas y medidas de desempeño	29
6.1	Normas de desempeño	29
6.2	Medidas de desempeño	30
Referencias		34

Anexos

Anexo I. Síntesis de productos químicos de consumo	31
--	----

Ilustraciones

Figura 1. Esquema general del proceso	10
Figura 2. Procesos de C_1 y C_2	12
Figura 3. Diagrama de flujo de la oxiclорación.....	13
Figura 4. Destrucción de subproductos.....	16
Figura 5. Diagrama de bloques del proceso orgánico genérico.....	17
Figura 6. Proceso del cloruro para producción de dióxido de titanio.....	19

■ Resumen

La presente sección trata de los procesos de fabricación de productos químicos industriales que teóricamente podrían generar contaminantes orgánicos persistentes (en particular las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo). La mayor parte de los procesos aquí descritos implican las mismas etapas, como cloración de materias primas orgánicas e inorgánicas, purificación de las sustancias, separación de corrientes de sustancias (generalmente por destilación), destrucción de subproductos de alto peso molecular y reciclado o comercialización de cloruro de hidrógeno. Separar y destruir con eficiencia los subproductos orgánicos clorados, que pueden contener contaminantes orgánicos persistentes, así como seguir las correspondiente orientaciones para cualquier procedimiento de incineración, son factores importantes de las mejores técnicas disponibles aplicables a estos procesos. También se describen los procesos modernos de producción de ciertos productos que reducen la formación de contaminantes orgánicos persistentes. Se presentan asimismo diversas normas de desempeño asociadas a mejores técnicas disponibles para procesos específicos.

1. Descripción de los procesos

1.1 Introducción a procesos químicos orgánicos

Esta sección se centra en los procesos de producción de productos químicos industriales que podrían, teóricamente, generar las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo. Los procesos de cloración se utilizan en la síntesis de cientos de sustancias químicas industriales y de especialidad (Wiley Interscience 2000; World Chlorine Council 2002). La química del cloro también puede utilizarse en procesos cuyo producto final no contiene átomos de cloro. No obstante, en las condiciones modernas de producción, estos procesos no suelen ser una fuente importante de emisión de las sustancias químicas del Anexo C (UNEP 2003; EPA 2001).

Muchos de los principios generales aquí expuestos –incluido el uso más eficiente de materias primas y reducción de subproductos y desechos– contribuyen a un mejor rendimiento económico y desempeño ambiental, que son compatibles con los principios modernos de lo que se conoce como química e ingeniería verdes. También pueden aplicarse a la gama mucho más grande de procesos utilizados para producir muy diversas sustancias químicas finas (de especialidad, producción reducida), incluidos los plaguicidas y fármacos. Esta producción depende de las propiedades singulares del cloro que lo hacen una valiosa herramienta de síntesis.

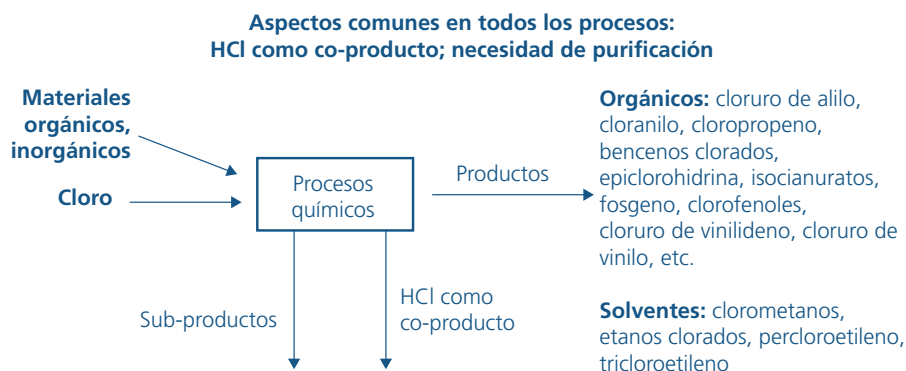
El Anexo I de la presente sección contiene la lista de algunos procesos para producir químicos industriales (Wiley Interscience 2000). Rebase el ámbito de la presente sección describir las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para cada uno de los procesos; así, pues, se examinarán los procesos por sus elementos comunes y se analizará cómo puede hacerse frente a estas prácticas comunes para reducir la formación y, sobre todo, la liberación de las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo.

En la mayor parte de los procesos está presente un hidrocarburo, saturado o no saturado, tratado con cloro elemental y, en la mayoría, también un catalizador. Las reacciones que se pueden generar son adiciones electrofílicas a olefinas, cloración de aromáticos o ruptura homolítica de enlaces carbón-hidrógeno, con formación posterior de cloruro alifático. En muchos casos se encuentran átomos de cloro en el producto final; en otros (procesos de adición de un alcohol o amina al fosgeno para producir, por ejemplo, plásticos de policarbonato y poliuretano) no es así. Además, la mayoría de los procesos conlleva la generación de cloruro de hidrógeno (HCl) como co-producto por medio de la deshidrohalogenación o reacción de radicales libres del cloro con hidrógeno alifático (Figuras 1 y 2).

Los productos brutos de estas reacciones varían en cuanto a rendimiento general y pureza y, al igual que en prácticamente todos los procesos químicos industriales, es necesario purificar el producto final antes de su venta u otro uso interno. La purificación puede implicar la separación de una mezcla de productos comercializables –en muchos casos, un sólo tratamiento de reacción produce toda una gama de productos útiles– o la separación de los productos comercializables de los subproductos de alto peso molecular que inevitablemente se forman. En el caso de la mayoría de los compuestos orgánicos y de algunos inorgánicos, la purificación implica destilación.

Por lo general, los subproductos de alto peso molecular no son comercializables como tales. En algunos casos, son oxidados térmicamente y de este proceso se obtiene HCl, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂). El HCl es recuperado y reutilizado como parte integrante del proceso. En algunos casos se consideran como desechos para destrucción, normalmente por medio de incineración de desechos peligrosos, aunque es común reciclar el HCl.

■ Figura 1. Esquema general del proceso



1.2 Cloruro de hidrógeno como co-producto

El cloruro de hidrógeno (HCl) se manipula de una o varias de las siguientes maneras. Puede ser, sencillamente, neutralizado y descargado como sal (cloruro de sodio). Sin embargo, en algunos procesos, puede constituir una parte importante del uso efectivo del aporte de cloro, de modo que su neutralización y descarga puede representar un gran costo de oportunidad por la pérdida de materia prima potencial.

El HCl puede ser recuperado, hidratado y posteriormente comercializado como ácido muriático (hidroclórico), o se puede utilizar para nivelar el pH en celdas cloroalcalinas. Por esta razón, una parte del HCl es reciclada electrolíticamente para obtener cloro. En los Estados Unidos de Norteamérica se ha analizado el ácido muriático derivado de la producción de cloruro de vinilo y se detectaron niveles de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) de aproximadamente 20 pg EQT-/L (0.004 g EQT-/año en la producción comercial de los Estados Unidos) (Carroll et al. 1997).¹

El HCl puede ser secado, oxidado catalíticamente y, en presencia de materia prima orgánica, reactivarse como cloro elemental para generar más cantidad del producto deseado. Este proceso se llama oxiclорación y constituye un método de recuperación de un valioso material de cloro dentro del proceso mismo.

1.3 Cloración directa

La adición de radicales libres de cloro a hidrocarburos alifáticos, generalmente metano, y la adición electrofílica directa de un halógeno a un alqueno son procedimientos conocidos en química orgánica elemental. En la industria, el primero se cataliza por la luz y el segundo, en general, a bajas temperaturas con cloruro férrico (FeCl₃) (sitio Web de OxyVinyls). Con el primer procedimiento se procura un mecanismo de radicales libres; en el segundo los radicales libres provocan reacciones secundarias no productivas, que pueden ser inhibidas con concentraciones bajas de oxígeno.

El potencial de formación de contaminantes orgánicos persistentes como subproductos de los procesos de cloración directa de hidrocarburos alifáticos puros es bajo, o incluso nulo. Las materias primas aromáticas también pueden ser cloradas directamente con un catalizador de ácidos de Lewis. La presencia de cloruros aromáticos como productos del proceso conlleva la posibilidad de formación de contaminantes orgánicos persistentes en ciertas condiciones.

1.4 Oxiclорación

En la oxiclорación, un compuesto orgánico como el etileno reacciona con HCl seco y aire u oxígeno puro, en una reacción catalítica heterogénea (Figura 3). Un ejemplo es la reacción por la que el HCl, oxígeno y etileno forman dicloruro de etileno y agua.



Existen diversos procesos comerciales de oxiclорación y en todos ellos la reacción se efectúa en la fase gaseosa sobre un catalizador del tipo Deacon modificado. A diferencia del proceso Deacon (que utiliza aire u oxígeno para oxidar el HCl a cloro (Cl₂) y H₂O con calor y catálisis) la oxiclорación de etileno se produce fácilmente a

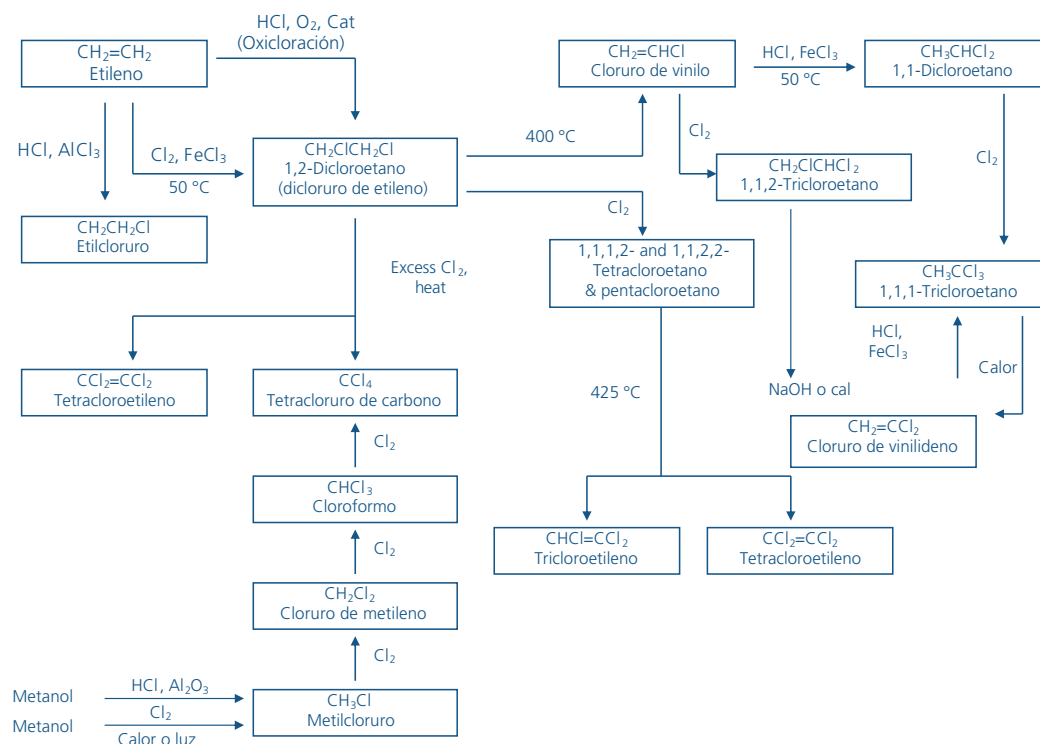
temperaturas muy por debajo de las requeridas para la oxidación del HCl. El catalizador por lo regular contiene cloruro cúprico (CuCl_2) como ingrediente activo primario, impregnado en una base porosa como alúmina, y también puede contener muchos otros aditivos.

La reacción de oxiclación genera calor y por lo tanto requiere enfriamiento para controlar la temperatura, indispensable para la producción efectiva de dicloruro de etileno. Si bien las reacciones necesitan una temperatura mínima efectiva, las temperaturas excesivamente elevadas del reactor provocan la formación de más subproductos, sobre todo por incremento de la oxidación de etileno a óxidos de carbono, y un mayor craqueo del dicloruro de etileno. El craqueo del dicloruro de etileno produce cloruro de vinilo monómero y las etapas posteriores de oxiclación y craqueo pueden generar progresivamente subproductos de peso molecular más alto y con niveles más elevados de sustitución de cloro. Las temperaturas excesivas ($>300^\circ\text{C}$) también pueden desactivar el catalizador mediante una mayor sublimación del CuCl_2 . Existe un fuerte incentivo comercial para evitar estas condiciones de reacción (sobrecalentamiento) que tienen el potencial de generar subproductos policlorados.

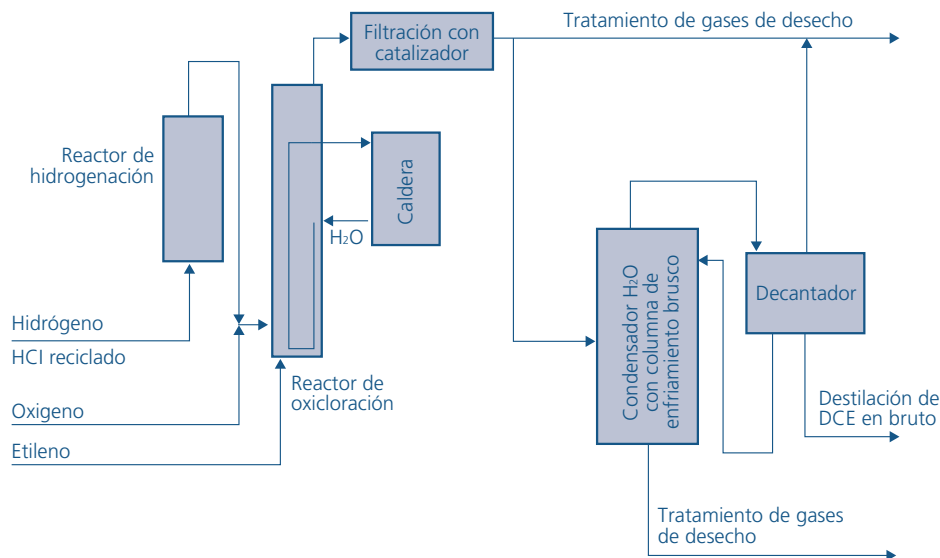
Dos son los sistemas catalizadores que se utilizan en la oxiclación: lecho fijo y lecho fluidizado. Ambos pueden considerarse mejores técnicas disponibles (European Commission 2003).

El uso de ciertas materias primas en un proceso de oxiclación puede provocar una mayor formación de contaminantes orgánicos persistentes. Por ejemplo, la oxiclación de fracciones pesadas en una planta de cloruro de vinilo puede generar cantidades importantes de PCDD/PCDF (UK Environment Agency 1997).

■ **Figura 2. Procesos de C_1 y C_2** (Wiley Interscience 2000)



■ Figura 3. Diagrama de flujo de la oxícloración



Fuente: sitio Web de Vinnolit

1.4.1 Oxícloración de lecho fijo

Los reactores de lecho fijo se parecen a termointercambiadores multitubulares con el catalizador envasado en tubos verticales sujetos por una envoltura tubular en la parte superior e inferior. Es importante que el envasado del catalizador dentro de los tubos sea uniforme para que la caída de presión, el flujo y el tiempo de residencia sean iguales en cada tubo. El calor de la reacción es eliminado generando vapor en el lado de la cubierta del reactor, o haciendo pasar algún otro fluido de transferencia de calor a través de él.

En estas reacciones es importante controlar la temperatura. La tendencia a que surjan puntos calientes en el reactor de lecho fijo puede reducirse llenando los tubos con un catalizador activo y mezclas de diluyente inerte en proporciones que varíen a lo largo de los tubos, de tal manera que la actividad del catalizador sea baja en la entrada y que se incremente paulatinamente hasta alcanzar el punto máximo en la salida.

Otra alternativa es llenar los tubos con un catalizador formulado para que tenga un gradiente de actividad a lo largo de los tubos. Para la oxícloración con lecho fijo también se pueden utilizar varios reactores en serie, lo que proporciona un gradiente de actividad similar. La sustitución de aire por oxígeno puro como materia de alimentación permite operar a temperaturas más bajas, lo que reduce la formación de subproductos clorados; sin embargo, el costo de este procedimiento se debe comparar con el costo de la energía necesaria para producir oxígeno puro. Introducir el aire u oxígeno por etapas y graduar la actividad del catalizador aplanan el perfil de temperatura y permite un mejor control de la misma (sitio Web de OxyVinyls).

1.4.2 Oxícloración de lecho fluidizado

Los reactores de lecho fluidizado para oxícloración típicos son tubos cilíndricos verticales equipados con una rejilla de soporte y un sistema de aspersion del material de alimentación concebido para proporcionar una buena fluidización y distribución del

material de alimentación. Contienen serpentines de enfriamiento para eliminar el calor y utilizan ciclones internos o externos para reducir el arrastre del catalizador. La fluidización del catalizador garantiza un contacto íntimo entre los vapores del material de alimentación y el producto, el catalizador y la superficie de transferencia de calor y produce una temperatura uniforme en el reactor. El calor de reacción se elimina generando vapor en los serpentines de enfriamiento o haciendo pasar algún otro medio de transferencia de calor a través de ellos.

Las temperaturas de 220°C a 245°C y una presión manométrica de 150–500 kPa (22–73 psig) son típicas de la oxidación con reactor de lecho fluidizado. La oxidación con reactor de lecho fijo por lo regular se realiza a temperaturas más elevadas (230°C–300°C) y presiones manométricas de 150–1,400 kPa (22–203 psig). Los subproductos clorados que comúnmente se obtienen de la oxidación de etileno son 1,1,2-tricloroetano, cloroformo, tetracloruro de carbono, cloruro de etilo, cloral, 2-cloroetanol, todos los congéneres del cloroetileno y compuestos con puntos de ebullición más elevados (sitio Web de OxyVinyls).

1.5 Aislamiento del producto principal

Otra faceta común en estos procesos es la de purificación necesaria de los productos que se comercializarán o utilizarán posteriormente. Prácticamente en todos los casos se destilan los productos orgánicos de las reacciones. La destilación fraccional separa las corrientes de productos deseados y también los aísla de los compuestos de alto peso molecular no deseados, conocidos como fracciones pesadas o alquitranes.

La Directiva sobre Control y prevención de la contaminación integrados (IPPC, por sus siglas en inglés) de la Unión Europea exige a las plantas productoras el uso de mejores técnicas disponibles para extender la autorización correspondiente. Para facilitar el cumplimiento de este requisito, y de conformidad con la Directiva, la Oficina Europea de la IPPC elabora documentos de referencia sobre mejores técnicas disponibles (BREF, por sus siglas en inglés). Varios de estos documentos son pertinentes para la aplicación de mejores técnicas disponibles para procesos que utilizan la cloración: por ejemplo, el BREF sobre procesos químicos orgánicos de grandes volúmenes, elaborado de conformidad con la Directiva IPPC, describe el proceso de destilación (European Commission 2003).

La destilación es un procedimiento de ingeniería estándar. Se basa en la evaporación y la condensación secuenciales del líquido en una columna, y por lo regular contiene empaquetamientos o bandejas para maximizar su superficie interna. El vapor que llega a la parte superior de la columna se enriquece en el material de menor punto de ebullición presente en la mezcla de destilación.

El diseño y la operación de unidades de destilación son muy conocidos, tanto en teoría de las separaciones como en la práctica. En el caso de compuestos no azeotrópicos con puntos de ebullición muy distantes entre sí –por ejemplo, cloruro de vinilo y PCDD/PCDF– se pueden obtener separaciones prácticamente completas con una columna bien diseñada y operada (sitio Web de ChEResources).

Los materiales deseados se aíslan y transportan como líquidos. Para materiales con puntos de ebullición superiores a la temperatura ambiente (ej., dicloruro de etileno), se

utilizan contenedores cerrados pero no presurizados. Para materiales con puntos de ebullición inferiores a la temperatura ambiente (ej., cloruro de vinilo, cloro) se utilizan contenedores presurizados.

Algunos aislamientos de productos no se prestarán a destilación. En principio, para determinados materiales se pueden concebir técnicas igualmente útiles y rigurosas (ej., recristalización). En algunos casos, y en la medida en que puedan arrojar resultados similares, como por ejemplo aislamiento de supproductos en una corriente separada, estas prácticas también podrán considerarse como mejores técnicas disponibles.

1.6 Destrucción de subproductos

Los compuestos no deseados, incluidas las fracciones pesadas, generalmente son destruidos por procesos térmicos, con o sin oxígeno. La Figura 4 muestra una cadena prototípica de destrucción de fracciones pesadas con recuperación de HCl.

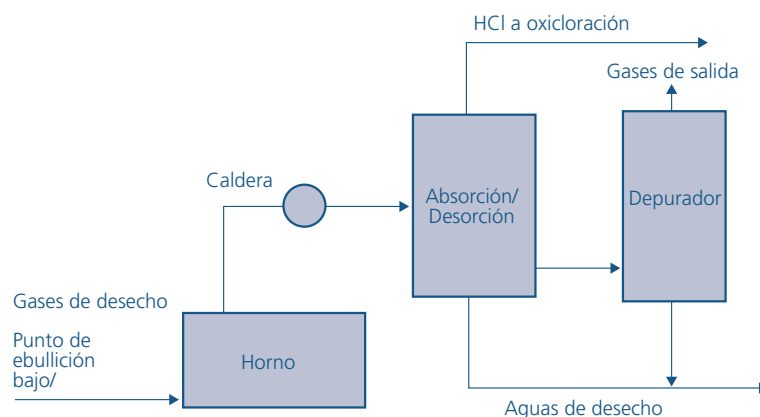
La gestión ambientalmente racional de las corrientes de subproductos y desechos generados en las operaciones químicas es un aspecto fundamental para prevenir la liberación en el medio ambiente de las sustancias del Anexo C. Esta gestión implica la destrucción efectiva y de alto rendimiento de los desechos dentro de un proceso, y la aplicación de métodos efectivos de final de proceso para impedir las liberaciones de contaminantes. Por lo regular, estos sistemas de destrucción y de final de proceso para la industria química y otras industrias están bien definidos por la reglamentación, y deberían ser objeto de monitoreo acucioso de parte de los operadores y autoridades.

Las emisiones de aire, agua y sólidos de estos procesos pueden ser analizadas para detectar sustancias del Anexo C y de este modo tratarlas como corresponda. El documento BREF de la Unión Europea contiene más información sobre procesos químicos orgánicos de grandes volúmenes y el tratamiento de aguas y gases de salida del sector químico. En la sección III.C sobre cuestiones transectoriales de las presentes directrices se presenta una reseña básica de las tecnologías para el tratamiento de aire, agua y sólidos.

En general, las mejores técnicas disponibles para corrientes de aire pueden consistir en la recuperación y reciclado de HCl, combustión de volátiles residuales, depuración con agua de las corrientes de salida del incinerador, soluciones alcalinas o álcali seco y adición de carbón activado y filtros de manga para eliminar partículas. Pueden emplearse solas o combinadas. El tratamiento de corrientes de agua puede implicar la extracción y recuperación (condensación o adsorción) de materiales volátiles del agua.

La purificación biológica posterior de las corrientes de agua con eliminación de sólidos se realiza en un sistema especial de tratamiento de aguas. Para la emisión de permisos para instalaciones que incineran fracciones pesadas, se considerarán las mejores técnicas disponibles para los dos tipos de corrientes.

■ Figura 4. Destrucción de subproductos



1.7 Resumen: Aspectos comunes de los procesos orgánicos

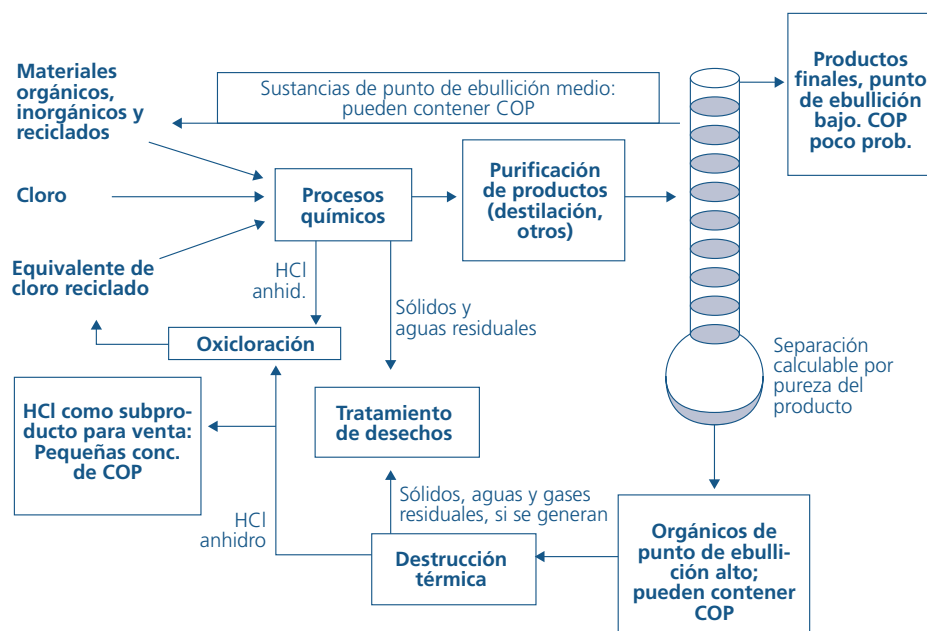
La Figura 5 resume muchos de los procesos que se han descrito, por ejemplo la cloración de materias primas orgánicas e inorgánicas, purificación de productos, separación de corrientes para reciclado (HCl, sustancias con punto de ebullición medio), destrucción de subproductos (compuestos orgánicos de alto punto de ebullición) y comercialización de productos (sustancias de bajo punto de ebullición, HCl, productos finales).

La Environmental Protection Agency, de los Estados Unidos, señala: “Se han postulado cuatro mecanismos de formación de dioxinas y furanos halogenados en la producción de sustancias químicas halogenadas: (1) halogenación directa de dioxinas y furanos ..., (2) reacción de un orto-halógeno con un fenato, (3) pérdida del halógeno (ej., cloro o bromo) de un fenato halogenado para formar furanos halogenados ... y (4) reacciones entre halógenos orto y metasustituidos” (EPA 1997).

El mecanismo (1) presupone una estructura de anillo preformada de PCDD o PCDF, posiblemente no halogenados. Los mecanismos 2, 3 y 4 describen las reacciones de haluros aromáticos o fenoles halogenados. Ciertos factores inciden en la cantidad de PCDD y PCDF que se puede formar en un proceso de manufactura determinado, como la temperatura, el pH, el catalizador, y la cinética de la reacción (EPA 1997). La influencia de estos factores puede estar modulada por la química particular del caso, por ejemplo, por la presencia de materiales orgánicos aromáticos o alifáticos.

Asimismo, Fiedler *et al.* (2000) señalan que la probabilidad de generación de PCDD/PCDF en procesos químicos de fabricación de materiales que contienen cloro generalmente disminuye en el siguiente orden: clorofenoles > clorobenzenos > cloruros alifáticos > cloruros inorgánicos. Otras condiciones de reacción también pueden modular la generación de PCDD/PCDF. La generación total de PCDD/PCDF dependerá tanto de la propensión a la formación como del volumen de producto, de modo que un proceso de grandes volúmenes, como es la producción de cloro, puede generar un flujo en masa más grande que un proceso de altas concentraciones y alto rendimiento, pero de pequeño volumen.

■ **Figura 5. Diagrama de bloques del proceso orgánico genérico**



1.8 Procesos químicos inorgánicos

El cloro se utiliza para generar compuestos inorgánicos, y puede estar presente en el producto final (NaOCl , ClO_2 , FeCl_3 , AlCl_3 , ZnCl_2 , etc.) o únicamente en el proceso de producción (TiO_2 , Si). Estos compuestos inorgánicos pueden utilizarse con fines estequiométricos (NaOCl , ClO_2) o catalíticos (FeCl_3 , AlCl_3 , ZnCl_2 , etc.). Existen dos procesos inorgánicos de producción de sustancias químicas que se ha determinado que producen ciertas sustancias del Anexo C: la producción de dióxido de titanio (TiO_2) a base de cloro, en ciertas plantas productoras, y la producción de cloruro de magnesio anhidro (MgCl_2), intermediario en la producción de metal magnesio. Otros procesos de carbocloración de metales para purificación de menas también pueden implicar condiciones similares.

1.8.1 Cloro e hidróxido de sodio/potasio

El cloro y el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio se producen por electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de sodio o de potasio, respectivamente. Son numerosas las tecnologías asociadas a este proceso pero su descripción detallada queda fuera del ámbito de estas directrices. Varias obras de referencia general contienen una panorámica de ellas (European Commission 2001, Appendix 1; Wiley Interscience 2000).

Se conoce por datos anecdóticos, confirmados por informes de liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes provenientes de instalaciones cloroalcalinas, que existe la posibilidad de generación de dioxinas y furanos en algún punto del proceso de producción cloroalcalina.

Se sabe que el uso de electrodos de grafito en este proceso constituye una fuente de sustancias químicas del Anexo C. En términos generales, se trata de un proceso obsoleto para las instalaciones modernas (véase subsección 4.2.2 *infra*). Con respecto a otras fuentes en el proceso, hace falta comprender mejor la mecánica de formación; sin

embargo, se cree que el contacto del cloro elemental con las estructuras preformadas de tipo furano en empaquetaduras y juntas orgánicas son una posible fuente (véase subsección 2.2). Incluso en procesos modernos se ha detectado la formación y liberación de PCDD/PCDF.

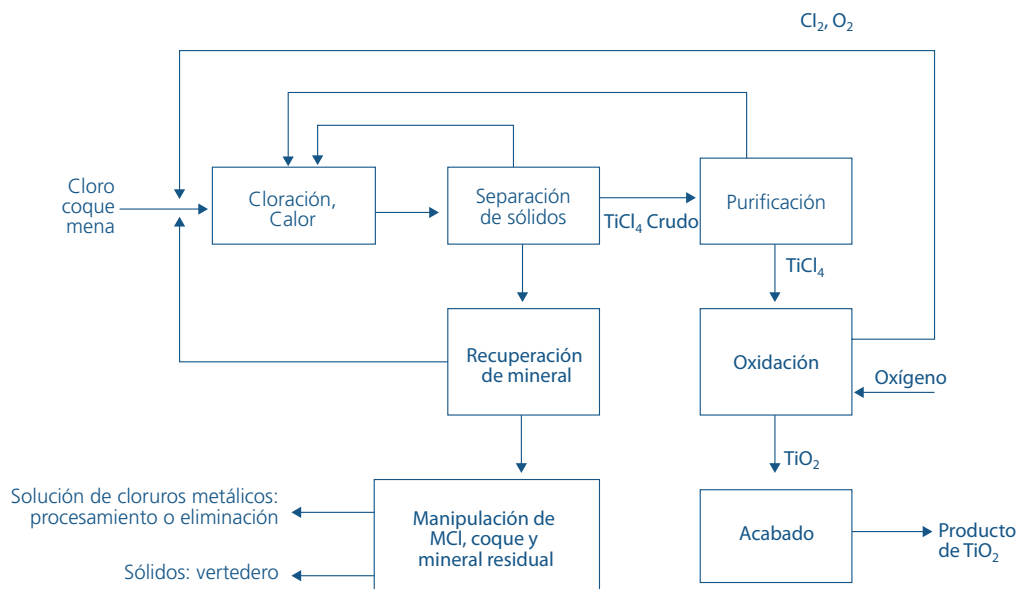
1.8.2 Dióxido de titanio

Hay dos procesos de producción de dióxido de titanio (TiO_2): el proceso con cloruro y el proceso con sulfato. Constituyen un caso interesante: el proceso del cloruro produce mucho menos desechos pero puede ser fuente de contaminantes orgánicos persistentes. El proceso de sulfato genera muchos más desechos de otros tipos, lo que representa un problema pues el dióxido de titanio es un producto químico de gran volumen.

La producción de dióxido de titanio con el proceso de sulfato genera grandes cantidades de diferentes concentraciones de ácidos usados contaminados. Anteriormente, esos ácidos usados no podían reciclarse y utilizarse en otros procesos de producción. Durante las últimas décadas se han desarrollado diversos métodos de reutilización y reciclado de ácidos usados y, actualmente, en los países industrializados son habituales en la producción de dióxido de titanio.

Durante los últimos treinta años se ha ido consolidando el uso del proceso de cloruro como alternativa al proceso de sulfato, que generaba grandes cantidades de ácidos usados. La alternativa del cloruro es un proceso relativamente compacto que permite reciclar compuestos del proceso de manera directa, sin productos secundarios, elaborando productos de mejores propiedades y generando mucho menos desechos. La mena de TiO_2 , como rutilo o ilmenita –que contiene otros óxidos de metal– es clorada a altas temperaturas para producir tetracloruro de titanio (TiCl_4), un líquido estable y destilable. Otros haluros de metal son eliminados después del enfriamiento. Luego, se purifica el TiCl_4 y se oxida con O_2 , liberando cloro que se recicla en el proceso. Este proceso de oxidación se propicia termodinámicamente a temperaturas superiores a los 600°C . En la Figura 6 se muestra un panorama general del proceso de cloruro y en la subsección 3.1 figura una descripción más completa del proceso alterno, de sulfato.

■ **Figura 6. Proceso del cloruro para producción de dióxido de titanio**



1.8.3 Cloruro de magnesio anhidro

Se puede producir cloruro de magnesio ($MgCl_2$) por la reacción de óxido de magnesio (MgO) y coque con cloro elemental a $700-800^\circ C$. La descripción de este proceso y sus liberaciones figuran en la sección VI.B (iii) de estas directrices (producción de magnesio).

2. Fuentes potenciales de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C

La presencia o generación de compuestos aromáticos es fundamental para la formación de la estructura básica de los PCDD, PCDF, bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB). Estos compuestos deben clorarse en algún momento. En UNEP (2003) se indica que en los procesos químicos, la generación de PCDD/PCDF puede favorecerse en procesos que utilizan, juntos o por separado, cloro elemental, alta temperatura, condiciones alcalinas y una fuente de radicales libres.

Para que se formen los PCDD/PCDF debe haber una fuente de oxígeno o estructuras no cloradas de dioxinas/furanos o estructuras similares. Aunque resulta difícil imaginar situaciones en las que se generen PCDD/PCDF sin ninguna posibilidad de generar PCB o HCB, se facilita la producción de PCDD/PCDF como subproductos en los procesos en que los fenoles clorados son un substrato o si los fenoles reaccionan con cloro, sobre todo tratados con álcali (véanse subsecciones 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5 *infra*). La combustión es una fuente probable de formación de todos estos compuestos; la formación de subproductos depende de la tecnología exacta empleada en los procesos de combustión, sobre todo los que implican la combustión no controlada. Las reacciones de carbocloración (ej., MgO a $MgCl_2$) también son fuentes potenciales (véase subsección 1.8 *supra*).

Se puede formar HCB sobre todo en reacciones similares a las antes mencionadas si se excluye oxígeno o materiales oxigenados. Las reacciones de electrólisis con electrodos

de grafito entran en esta categoría. Se puede obtener un resultado similar cuando hay anillos alifáticos clorados y puede haber deshidrohalogenación, como en las reacciones con hexaclorociclohexano como material inicial.

En algunos casos, la fuente de carbono aromático puede ser adventicia. El benceno como impureza de la materia prima de casi todas las reacciones de cloración podría generar HCB como subproducto, incluso cuando no cabe esperarlo de la química de la reacción deseada. Algunos trabajos sobre patentes se refieren a la reducción de los aromáticos en las corrientes de alimentación de otras síntesis de sustancias químicas como medio para reducir la producción accidental de contaminantes orgánicos persistentes como subproductos (véase subsección 4.2.8). Por último, cuando el HCB es materia prima en un proceso, su arrastre hasta el producto final será causa de contaminación (véase subsección 4.2.5).

Existen muchos inventarios nacionales de estimaciones de emisiones de PCDD/PCDF y PCB. En el caso de los PCDD/PCDF, los inventarios incluyen la generación no intencional. El Instrumental del PNUMA (UNEP 2003) abarca este tipo de emisiones. En el caso de los PCB, los inventarios, si existen, son sobre todo de productos antiguos que todavía se utilizan, desechos almacenados, o producción reciente. Existen pocos datos sobre la generación accidental de PCB.

Es importante señalar que existen fuentes de emisión de todos estos subproductos que no tienen relación con procesos químicos, pero su liberación sólo puede impedirse instalando tecnologías de alto rendimiento, cerrando los ciclos e instalando controles internos y externos de las corrientes de subproductos y desechos y de las emisiones asociadas con su destrucción.

En cuanto a HCB como producto y subproducto, la situación es similar a la de los PCB; sin embargo, existen algunos inventarios de HCB como subproducto. El punto máximo de producción y liberación mundial de HCB se dio a finales de los años 1970 y principios de los años 1980. De 1978 a 1981, se produjeron aproximadamente 10,000 toneladas por año (Rippen and Frank, 1986), de las cuales el 80% se considera corresponde a Europa. Su uso como plaguicida representó un considerable ingreso al medio ambiente, sobre todo como fungicida para semillas de cebolla y sorgo, y cultivos de trigo, cebada, avena y centeno, así como fungicida para el control de la caries del trigo.

Desde entonces, gracias a diversos reglamentos y prohibiciones, la producción y liberación de HCB ha disminuido significativamente. Bailey (2001) publicó una reseña de las fuentes y emisiones mundiales de HCB a mediados de los años 1990. La emisión total mundial en este período fue de 10 a 90 toneladas por año. En los años 1990, la contribución de diferentes fuentes a las emisiones totales mundiales fue del siguiente orden: quema de combustibles, 3.7%; industria del hierro y el acero, 0.3%; industria de metales no ferrosos, 36%; industria de sustancias químicas orgánicas, 5.8%; uso de otros solventes, 0.004%; incineraciones de desechos, 26%; y uso de plaguicidas, 28%. Se observaron diferencias importantes en la distribución en Europa, los Estados Unidos y Canadá.

Recientemente se compiló una amplia reseña de publicaciones sobre emisiones de HCB con el título de Euro Chlor Science Dossier (Barber, Sweetman and Jones 2005). El documento proporciona un panorama muy exhaustivo de toda la información

pertinente publicada hasta 2004. Presenta información detallada sobre la producción y liberaciones en diferentes períodos, en diversas regiones y para distintos usos, y además abarca fuentes secundarias e históricas. Una versión abreviada de este trabajo fue objeto de una publicación arbitrada (Barber *et al.* 2005).

2.1 Proceso de oxiclорación

La presencia de factores como calor, cloro elemental, un catalizador de cloruro de cobre y compuestos orgánicos hacen del proceso de oxiclорación una fuente potencial de sustancias químicas del Anexo C, en particular de PCDD/PCDF y HCB. En los procesos a altas temperaturas se pueden formar compuestos aromáticos, que también pueden estar presentes en materiales de alimentación, incluido el HCl o el aire. Las condiciones en un reactor de oxiclорación son, hasta cierto punto, similares a las de las zonas de un incinerador posteriores a la zona de combustión, donde se pueden o no acumular cantidades similares de carbono elemental-hollín o hidrocarburos aromáticos policíclicos, que pueden contribuir a la formación *de novo* de PCDF (Lenoir *et al.* 2001; sitio Web de OxyVinyls). Sin embargo, las sustancias químicas del Anexo C que se forman en este proceso pueden ser eliminadas del producto prácticamente por completo y, con el proceso de destilación, pueden aislarse en materiales de alto puntos de ebullición (fracciones pesadas).

Algunas sustancias se adhieren a las partículas de catalizador. En el caso de los sistemas de lecho fijo, pueden quedar en el catalizador usado que se retira del proceso. Este material puede ser tratado con procedimientos térmicos para destruir orgánicos adsorbidos o puede ser depositado en rellenos sanitarios. En los reactores, las partículas del catalizador de lecho fluidizado se desgastan y pueden ser arrastradas en la corriente de vapor y, de este modo, terminar apareciendo en los desechos sólidos o en sólidos biológicos eliminados al final del tratamiento de aguas.

2.1.1 Formación de cloruro de vinilo a partir de acetileno

Durante los últimos cincuenta años, el empleo del proceso equilibrado de producción de dicloruro de etileno y el craqueo posterior en cloruro de vinilo ha sustituido mayormente, aunque no por completo, la producción de cloruro de vinilo con el proceso de acetileno. En el proceso de acetileno, se calientan óxido de calcio y coque o carbón hasta aproximadamente 2000°C para producir carburo cálcico (CaC_2). Cuando el CaC_2 reacciona con agua, se produce acetileno. El cloruro de vinilo resulta de una adición de HCl al acetileno mediante un catalizador de mercurio. Las escasas pruebas de efluentes del proceso de cloruro de vinilo arrojan bajo o nulo contenido de las sustancias del Anexo C. No está caracterizado el proceso de producción de carburo cálcico, pero el incremento de capacidad que se ha observado recientemente en este proceso amerita más estudio.

2.1.2 Solventes clorados

Como el proceso de producción de tricloroetileno, percloroetileno y tetracloruro de carbono implica cloración, oxiclорación y pirólisis, entre sus subproductos se encuentran sustancias del Anexo C. Estos subproductos pueden ser separados del producto final por destilación, y aislados en una fracción conocida como fracción pesada. Hace muchos

años, las fracciones pesadas solían ser depositadas en rellenos, pero desde los años 1970 los procedimientos más comunes han sido, por mucho, la incineración como desechos peligrosos y la destrucción térmica con recuperación y reutilización de HCl.

Hay unos pocos casos de grandes remanentes de materiales con HCB producto de los primeros procesos de producción de solventes o de prácticas deficientes de fabricación más recientes. El Anexo II de la presente sección contiene un estudio de caso de una fábrica checa (IPEN 2006a). En el expediente Euro Chlor figura una descripción de un caso antiguo en Australia (Barber, Sweetman and Jones 2005). Conviene precisar que ninguno de estos casos representa mejores técnicas disponibles ni mejores prácticas ambientales; de hecho, son ejemplos de lo contrario.

2.2 Otros contactos con cloro elemental

Hay evidencia anecdótica de que el contacto del cloro elemental con el equipo utilizado en procesos orgánicos (sellos, juntas, equipo de fibra de vidrio), que puede contener aromáticos, hidrocarburos aromáticos policíclicos o carbono elemental, puede ocasionar la formación de las sustancias químicas del Anexo C, sobre todo PCDF. En ciertos casos en que el material condensado o con elevado punto de ebullición se separa del cloro elemental producido y no se recicla en el proceso, las sustancias del Anexo C pueden aparecer en efluentes sólidos o líquidos.

2.3 Dióxido de titanio, proceso de cloro

La presencia de coque, cloro, metales y una temperatura elevada pueden generar la formación de PCDD y PCDF análogos a los generados por oxiclорación. Si se forman, se presume que los PCDD/PCDF se fraccionan en una corriente o corrientes que contienen coque residual. Si el coque residual se utiliza para producir energía, se debe tomar en cuenta su posible contenido de PCDD/PCDF.

Las emisiones a la atmósfera provenientes del proceso de cloración contienen trazas de $TiCl_4$, Cl_2 , HCl, CO y COS, incluso después de la condensación del $TiCl_4$. El $TiCl_4$, Cl_2 y HCl son eliminados mediante lavado ácido de gases de salida en varias fases. Los licores de lavado son reciclados en el proceso o recuperados y en parte se venden como ácido clorhídrico puro (28%).

2.4 Destrucción de subproductos

Funcionan habitualmente tres tipos de tratamiento de desechos, sobre todo para fracciones pesadas: combustión de desechos peligrosos, oxidación térmica y oxidación catalítica. En el capítulo sobre dicloruro de etileno y cloruro de vinilo de European Commission (2003) se describen ciertos aspectos de estos tratamientos. Cuando se incineran fracciones pesadas se forman algunas de las sustancias químicas del Anexo C, como en cualquier combustión de desechos peligrosos. La Oficina Europea de la IPPC está preparando un BREF sobre procesos de combustión de desechos; no obstante, en los Estados Unidos, la Unión Europea y Japón, por ejemplo, ya se están aplicando requisitos jurídicos y mejores tecnologías disponibles. Las alternativas para la incineración de desechos sólidos urbanos, desechos peligrosos y lodos de alcantarillado que se describen en la sección V.A de las presentes directrices (por ejemplo, reducción

química de la fase gaseosa, descloración de base catalizada y deshalogenación mecanoquímica) también podrían emplearse para ciertos tipos de destrucción de subproductos. El proceso Catoxid® es un proceso catalítico con lecho fluidizado para la oxidación de orgánicos. Genera una corriente de HCl y CO₂ que se envía en su totalidad al reactor de oxiclорación para reciclado interno (Randall 1994).

Las alternativas para la incineración descritas en las presentes directrices también pueden utilizarse para ciertos tipos de destrucción de subproductos.

2.5 Productos

Muchos productos de estos procesos han sido analizados para detectar sustancias del Anexo C, en particular de PCDD/PCDF. En general, los productos de la cadena cloro-álcali-cloruro de vinilo tienen un contenido muy bajo de estos contaminantes; sin embargo, la concentración de contaminantes orgánicos persistentes en estos y otros productos puede estar en función de la eficiencia de la destilación u otro tipo de purificación.

En IPEN (2006b) y referencias en incluidas en el mismo se registra la presencia de PCDD y PCDF residuales en diversos productos. Ni *et al.* (2005) también detectaron PCDD/PCDF en cinco productos químicos clorados, entre ellos el triclosán. El contenido de HCB en plaguicidas se describe en Barber, Sweetman y Jones (2005) y las referencias que ahí figuran. Se han analizado solventes clorados preparados con técnicas modernas de purificación para detectar HCB, y se han encontrado en rangos bajos, de µg/kg (partes por miles de millones) (<20 para el tricloroetileno y <10 para el percloroetileno). En UNEP 2003 se proporciona información similar. Es evidente que la efectividad en las fases de purificación contribuye a garantizar un bajo contenido de contaminantes residuales en los productos.

3. Procesos alternativos que impiden la formación de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C

3.1 Consideraciones generales

En muchos casos hay procesos alternativos con los que se pueden producir las sustancias químicas deseadas. En el caso de los procesos en los que se forman sustancias químicas del Anexo C, puede haber procesos alternativos que no impliquen la generación de estos contaminantes. Siguiendo las disposiciones del Convenio, la guía de alternativas que ofrecen estas directrices y las buenas prácticas empresariales, es preciso realizar una revisión exhaustiva de los procesos y tecnologías alternativos antes de construir nuevas instalaciones de producción o de efectuar cambios importantes en ellas.

3.2 Dióxido de titanio, proceso con sulfato

En el caso del TiO₂, existe un proceso comercial alternativo que utiliza ácido sulfúrico en vez de cloro.

En el proceso con sulfato para producir TiO_2 , el mineral se seca, pulveriza y clasifica para asegurar la sulfatación efectiva por agitación con ácido sulfúrico concentrado en una reacción de digestión exotérmica por partidas o continua. Las condiciones controladas maximizan la conversión del TiO_2 en sulfato de titanilo soluble en agua utilizando la mínima cantidad de ácido. La torta de sulfatos metálicos resultante, seca y de color marrón-verdáceo, se disuelve en agua o ácido débil, y la solución es tratada para garantizar que sólo contenga hierro en estado ferroso. Para evitar una hidrólisis prematura, se reduce la temperatura de la solución, y ésta se purifica por sedimentación y floculación química. Luego, la solución limpia se sigue enfriando para cristalizar el sulfato ferroso heptahidratado de polvo grueso (conocido como vitriolo verde, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), que durante el proceso se separa para comercializarse como producto secundario.

El “lodo” insoluble se lava para recuperar licor de sulfato de titanilo. Para eliminar las impurezas insolubles finales, el líquido se filtra y luego se evapora hasta obtener una composición precisa. Le sigue una hidrólisis para producir una suspensión (“pulpa”) compuesta principalmente de conglomerados de óxido de titanio hidratado coloidal.

La precipitación se controla cuidadosamente a fin de obtener el tamaño de partículas necesario, sobre todo mediante una técnica de nucleación o *seeding*. Luego, la pulpa es separada del licor madre y lavada para eliminar trazas residuales de impurezas metálicas utilizando, en caso necesario, agentes quelantes. La pulpa lavada es tratada con sustancias químicas que ajustan la textura física y actúan como catalizadores en la fase de calcinación. Este proceso puede producir formas cristalinas de anatasa o de rutilo, según los aditivos utilizados antes de la calcinación (sitio Web de la Millennium Chemical Corporation).

El proceso con sulfato requiere entre 2.4 y 3.5 toneladas de H_2SO_4 concentrado por tonelada de TiO_2 , según la materia prima que se utilice. El ácido sulfúrico se descarga del proceso como sulfato, sobre todo sulfato de hierro (II), o ácido sulfúrico libre, en el ácido usado. El volumen total de ácido usado generado por este proceso es de aproximadamente 6–9 toneladas por tonelada de pigmento. La recuperación del ácido sulfúrico a partir del ácido usado se realiza en dos fases:

- Recuperación del ácido libre por evaporación
- Descomposición térmica de los sulfatos y producción de H_2SO_4 a partir del dióxido de azufre.

El ácido usado es concentrado hasta 70% aproximadamente, por evaporación, donde la solubilidad del sulfato de hierro es mínima. Luego, el ácido es enfriado. Después de su cristalización, las sales son separadas del ácido por filtración. El ácido, prácticamente libre de sales, puede reciclarse directamente o sometiéndolo a una nueva concentración. También puede utilizarse en otros procesos químicos o bien ser descompuesto en SO_2 .

Los sulfatos separados, con fuertes cargas de ácido sulfúrico, se descomponen térmicamente en dióxido de azufre y óxido de hierro en reactores de lecho fluidizado, a temperaturas de 800°C – $1,000^\circ\text{C}$ (empleando azufre, carbón o petróleo como combustibles). Después de limpiarlo, el dióxido de azufre obtenido se procesa para

obtener ácido sulfúrico virgen. El óxido de hierro residual puede reutilizarse en la industria del cemento.

El proceso del cloro no genera ácidos usados, lo que implica una generación mucho menor de desechos. Sin embargo, cabe la posibilidad de que se formen algunas de las sustancias del Anexo C, en especial furanos altamente clorados (EPA 2006). La generación de desechos en el proceso con sulfato, incluido el ácido sulfúrico y otros desechos minerales, es mucho más elevada, pero no parece contener las sustancias del Anexo C. Optar por la eliminación de pequeñas cantidades de estas sustancias en lugar de generar mayores cantidades de otros materiales de desecho quizás no sea el mejor enfoque ambiental. Las mejores técnicas disponibles pueden variar de una planta a otra y pueden analizarse caso por caso.

4. Medidas primarias y secundarias

4.1 Métodos de producción que reducen la emisión de sustancias que figuran en el Anexo C

Rebasa el ámbito de esta orientación básica exponer detalladamente la concepción de los procesos y plantas que fabrican productos químicos. Sin embargo, una operación responsable implica reconocer que los procesos químicos, si bien son necesarios en la vida moderna, comportan riesgos. Para mitigar al máximo estos riesgos, los procesos deben ser diseñados siguiendo las normas de seguridad y medio ambiente más avanzadas como, por ejemplo, las expuestas en los BREF de la Unión Europea y reglamentos equivalentes de los Estados Unidos y Japón. El diseño de procesos químicos específicos debe encomendarse a ingenieros experimentados.

Un diseño adecuado debe tener en cuenta el potencial de formación de subproductos y desechos y prever su manejo y destrucción seguros. Se debe reconocer que, si el proceso implica la posibilidad de generación de las sustancias del Anexo C, las cuatro corrientes que se emitan en la planta – aire, agua, sólidos y productos– también tendrán ese potencial. Los procesos de diseño modernos toman en cuenta este potencial, verifican su concreción, lo controlan e incorporan métodos para reducir o eliminar la emisión de estos materiales, de conformidad con los requisitos del Convenio. Una gestión moderna de la seguridad implica la capacitación exhaustiva de los operarios, y los instrumentos de análisis y control necesarios para que la planta en su conjunto opere con criterios de responsabilidad.

Los principales requisitos para una producción moderna y segura de productos químicos pueden exponerse de la siguiente forma:

- Aplicación de mejores técnicas disponibles, incluidas las tecnologías de alto rendimiento, al diseñar y construir una planta.
- Ciclos cerrados efectivos para el control de subproductos y la destrucción de desechos y emisiones.
- Gestión efectiva de subproductos y desechos.

- Instalaciones especiales para la destrucción de desechos y emisiones, a cargo de la empresa misma y sujetas a control externo.
- Compromiso de respetar el nivel de referencia de 0.1 ng EQT-l/m³ en las emisiones al aire derivadas de la destrucción de todo subproducto, desecho y emisión.²
- Establecimiento de un régimen claramente definido para la vigilancia interna y externa de los principales parámetros de operación.

4.2 Medidas primarias

4.2.1 Destilación y reciclado interno de subproductos

La destilación se utiliza principalmente para generar un producto con la pureza adecuada para procesamiento posterior. Por ejemplo, el cloruro de vinilo se produce por oxiclорación y se purifica por destilación. Se realiza una rigurosa destilación ante el potencial de que las impurezas causen alguna perturbación en el posterior proceso de polimerización. Los compuestos no saturados que pueden actuar como co-monómeros, que compiten en la polimerización, así como los compuestos aromáticos saturados, susceptibles de reacciones de radicales libres además de la polimerización, pueden incidir negativamente en la cinética de las reacciones de polimerización.

Destilación y gran pureza son dos elementos importantes de una buena producción. Se pueden desarrollar sistemas de destilación para facilitar la separación de compuestos con puntos de ebullición poco o muy distantes. Los puntos de ebullición de los productos derivados de la clорación directa y los puntos de ebullición de las impurezas presentes facilitan su separación. Sus puntos de ebullición también son lo suficientemente diferentes de las sustancias del Anexo C, lo que permite una separación prácticamente total. La Comisión Europea (2003) señala que el dicloruro de etileno purificado no contiene cantidades importantes de PCDD/PCDF.

La destrucción de subproductos clорados permite recolectar y reutilizar el HCl (sitio Web de Vinnolit). Se considera que ello tiene un impacto mayor porque los pequeños cambios en la generación de contaminantes orgánicos persistentes antes de la destilación no se reflejan en la calidad de los productos deseados después de la destilación.

La destilación constituye una forma de separar el producto deseado de los subproductos no intencionales que se encuentran en la industria de fabricación de productos químicos, desde bienes de consumo hasta plaguicidas. Adaptar el diseño y operación del sistema de destilación es, en principio, relativamente sencillo. El subproducto residual presente en el producto comercial puede reducirse al mínimo gracias a un diseño y funcionamiento adecuados del sistema de destilación. Lograr una separación más completa de los compuestos con puntos de ebullición que no son muy diferentes, como es el caso, por ejemplo, del cloruro de vinilo y los diversos subproductos de menor peso molecular, depende, en la mayoría de los casos, de un diseño apropiado y de los costos de construcción y operación. Las diferencias de concentración de las sustancias del Anexo C residuales en los productos comerciales pueden deberse a las diferencias en la reglamentación local de estos productos.

4.2.2 Eliminación de los electrodos de carbono en la producción cloroalcalina

En las primeras tecnologías para producir cloro y sosa cáustica se empleaban ánodos de grafito. Los residuos encontrados en celdas construidas con esta tecnología contenían cantidades importantes de PCDD y en especial de PCDF (UNEP 2003). En muchas partes del mundo este problema se resolvió gracias a la invención del ánodo de titanio recubierto, de H.B. Beer, en 1965, y la posterior sustitución del grafito en estos procesos (European Commission, 2001). Aunque esta tecnología todavía se utiliza, el uso de electrodos de grafito no constituye una mejor técnica disponible.

4.2.3 Eliminación del tratamiento con álcali del 1,2,4,5-tetraclorofenol para la producción de 2,4,5-triclorofenol

El 2,4,5-triclorofenol se producía por tratamiento con álcali del 1,2,4,5-tetraclorobenceno. Este fenol clorado, en presencia de exceso de álcali, podía generar cantidades importantes de tetraclorodibenzoparadioxinas (TCDD) como subproducto. Por tal motivo, no constituye una mejor técnica disponible.

4.2.4 Eliminación del método con fenol para producir cloranilo

Este proceso se describe en UNEP 2003. El cloranilo (2,3,5,6-tetracloro-2,5-ciclohexadieno-1,4-diona) es el precursor para la producción de pigmentos de dioxazina. Cuando se prepara por cloración de fenol o anilina, mediante cloro elemental, se generan cantidades importantes de PCDD/PCDF como subproductos. Este proceso no es una mejor técnica disponible. Con la cloración de hidroquinona con HCl se obtiene un producto mucho más limpio.

4.2.5 Producción modificada de pentaclorofenol y pentaclorofenato de sodio

Estos procesos también se describen en UNEP 2003. Existen tres procesos comerciales para producir pentaclorofenol: cloración de fenol con Cl₂ sobre un catalizador, hidrólisis de HCB con hidróxido de sodio y termólisis de HCB. El más común en la actualidad es el primero. El pentaclorofenato de sodio puede producirse por hidrólisis de HCB o, con mayor frecuencia, por tratamiento de pentaclorofenol con hidróxido de sodio.

Para ambos productos, el cuidadoso control de las condiciones de reacción (ej., temperatura, velocidad de alimentación del cloro, y pureza del catalizador) permite reducciones importantes de microcontaminantes de PCDD. En los Estados Unidos, las emisiones de estos materiales pasaron de 3–4 mg EQT-I/kg, a mediados a fines de la década de 1980, a aproximadamente 1 mg EQT-I/kg a partir de 1988 (EPA 2001).

Las instalaciones que utilizan productos generados con los procesos antes descritos deberían también analizar la necesidad de adoptar medidas secundarias propias, en particular prácticas de eliminación de desechos con mejores técnicas disponibles.

4.2.6 Uso de hidrógeno en la oxiclорación

La pureza del material de alimentación en el proceso de oxiclорación puede incidir en la formación de subproductos, aunque por lo general el problema sólo se da con los niveles bajos de acetileno, que suelen estar presentes en el HCl en el proceso de craqueo del dicloruro de etileno. El acetileno introducido en el reactor de oxiclорación podría, en principio, transformarse en productos de C_2 altamente clorados, y los productos clorados de C_2 podrían llevar a la formación de aromáticos clorados mediante ciclotrimerización (sitio Web de OxyVinyls, sección Oxychlorination Technology and Hydrogenation Technology). La hidrogenación selectiva de este acetileno a etileno y etano en un reactor previa a la reacción de oxiclорación se utiliza generalmente como medida para evitar la síntesis de subproductos, sobre todo de alifáticos policlorados (ver Figura 2).

4.2.7 Mantenimiento del catalizador y control de la uniformidad de la temperatura

Los reactores de lecho fluidizado tienden a un mejor control de temperatura y un desempeño más uniforme, aunque el desgaste ante mencionado de partículas de catalizador puede permitir el arrastre hacia otras corrientes dentro de la planta. En el caso de catalizadores de oxiclорación con lecho fijo, un llenado y mantenimiento adecuados pueden reducir situaciones problemáticas, ensuciamiento del lecho, pérdida de productividad y potencial de generación de productos de elevado peso molecular. El lecho del catalizador se reemplaza regularmente para mantener el nivel de eficiencia.

4.2.8 Reducción de hidrocarburos aromáticos en la alimentación de procesos de oxiclорación

En dos patentes se especifica pretratamiento del aire o de los reactivos de HCl utilizados en la oxiclорación para eliminar aromáticos, supuestos precursores de diversos contaminantes orgánicos persistentes (Cowfer, Johnston and Popiel 1998, 2001). Esta tecnología patentada está sujeta a derechos de propiedad intelectual y, por lo tanto, puede que no sirva para cualquier aplicación necesaria de mejores técnicas disponibles, pero apunta hacia otro método de carácter primario.

Debería haber un control del material que se alimenta a los oxiclорadores para reducir o eliminar el ingreso de compuestos orgánicos y aromáticos superiores que podrían llevar a una elevada formación de sustancias del Anexo C. Como las fracciones pesadas brutas de dicloruro de etileno o corrientes de solventes pueden contener estos compuestos, deberían ser tratadas antes de utilizarlas en la producción de solventes.

4.3 Medidas secundarias: Mejores técnicas disponibles para prácticas de tratamiento de desechos

El propósito de la destilación y demás procesos de purificación es separar el producto deseado de los subproductos y concentrar las sustancias químicas del Anexo C en la corriente de subproductos. Hay diversos procesos que pueden tratar corrientes de subproductos, y muchos de ellos se describen en la sección V.A de estas directrices. En

este contexto, es posible que los procesos alternativos a la incineración que se describen en esta sección sirvan también para la destrucción de las sustancias del Anexo C.

5. Resumen de medidas

Las medidas para la reducción de las sustancias químicas del Anexo C que se generan en procesos químicos pueden resumirse de la siguiente manera:

- Modificar los procesos para reducir la generación de las sustancias del Anexo C.
- Incorporar procesos de tratamiento de impurezas en la materia prima y realizar mantenimientos operativos rigurosos.
- Si sus propiedades físicas lo permiten, purificar los productos mediante destilación.
- Como parte integral del proceso, reciclar dentro de la planta los subproductos de alto peso molecular generados accidentalmente.
- Gestionar los desechos de forma adecuada tomando en cuenta la liberación potencial de las sustancias del Anexo C en aire, agua y suelo, y evitar toda formación accidental.

6. Normas y medidas de desempeño

6.1 Normas de desempeño

Se pueden establecer normas de desempeño a nivel local, en cada permiso de operación, y estas normas serán variables. La emisión de PCDD/PCDF como subproductos se menciona en la Carta del Consejo Europeo de Productores de Vinilo, y se refleja en la Decisión 98/4 de la OSPAR (Convenio Oslo-París para la protección del medio ambiente marino del Atlántico Nordeste), así como en la adopción de mejores técnicas disponibles por la Recomendación 96/2 de PARCOM (Comisión de París). Esta norma de límite de liberación al agua es de 1 g EQT-I/tonelada anual de la capacidad de oxiclорación. Los límites de emisión al aire establecidos en la Carta del Consejo Europeo de Productores de Vinilo son de 0.1 ng EQT-I/Nm³ (sitio Web del ECVM). Este límite corresponde al límite reglamentario de la Unión Europea para emisiones de PCDD/PCDF al aire provenientes de incineradores.

En la Unión Europea, la Directiva 69/61/CE del Consejo sobre control y prevención integrados de la contaminación establece los requisitos para la industria química. Cuatro documentos BREF sobre mejores técnicas disponibles para la producción de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas en grandes volúmenes y de especialidad describen requisitos globales para el funcionamiento ambientalmente adecuado de todas las instalaciones de la industria química, incluidas las normas de emisiones de PCDD/PCDF (European Commission 2001, 2003, 2006a, 2006b). Cualquier planta o sección de planta de combustión en la industria química dentro de la Unión Europea debe respetar el valor límite de 0.1 ng EQT-I/Nm³.

En Japón, los límites requeridos de emisiones atmosféricas provenientes de combustores dependen del tamaño de la planta y de si se trata de una planta nueva o renovada. Los grandes incineradores nuevos deben alcanzar límites de emisión por debajo de 0.1 ng EQT- I/Nm^3 . El límite de emisiones de estos procesos al agua es de 10 pg EQT- I/L de efluente. Los límites en otras regiones o países concordarán con la reglamentación local sobre incineradores de desechos peligrosos.

En los Estados Unidos y en otras regiones se han propuesto reglamentos basados en la Tecnología de máximo control alcanzable (MACT, por sus siglas en inglés) para el control de emisiones de HCB y otros contaminantes atmosféricos provenientes de incineradoras, incineradoras de desechos médicos, hornos de cemento y hornos de agregados livianos que incineran desechos peligrosos.

La Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) regula las concentraciones máximas permisibles de HCB como contaminantes en determinados plaguicidas. El nivel establecido de microcontaminantes para HCB en determinados plaguicidas es del orden de 40–50 partes por millón. Como se señala en Bailey 2001, gracias a las mejoras en el proceso, las concentraciones reales de HCB en productos plaguicidas pueden ser considerablemente más bajas.

En Canadá, al igual que en muchos países, el HCB es una sustancia prohibida. La legislación canadiense prohíbe su producción, uso, venta o importación. Sin embargo, estas restricciones no se aplican al HCB en los siguientes casos:

- Cuando es un producto generado accidentalmente en un proceso de producción, y su concentración en el producto no rebasa las 20 partes por mil millones.
- Cuando está presente en un producto controlado (plaguicidas, herbicidas, etc.), según se define en la sección 2 de la Canadian Pest Control Products Act.

6.2 Medidas de desempeño

Entre las medidas de desempeño cabe señalar la química analítica de corrientes de emisiones y, en algunas áreas, la inscripción de contaminantes orgánicos persistentes en un registro de liberaciones y transferencia de contaminantes, como el Toxics Release Inventory de los Estados Unidos (EPA 2006; sitio Web de la CCC).

■ Anexo I. Síntesis de productos químicos de consumo

Producto químico	Proceso	Uso del proceso	Co-productos
Cloro, sosa cáustica	$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{NaOH} + \text{H}_2$	Más común	
	Véase European Commission 2001, 2003		
Orgánicos			
Cloruro de alilo	Cloración directa de propileno >300°C	Más común	HCl
	Pirólisis de 1,2-dicloropropano	Menos común	Olefinas cloradas, HCl
Tinte de cloranilo	Véase UNEP 2003		
Cloropreno (2-cloro-1,3-butadieno)	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CuCl}/\text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow \text{vinilacetileno} + \text{HCl} \rightarrow \text{cloropreno}$	Menos común	
	Fase gaseosa: butadieno + $\text{Cl}_2 \rightarrow$ 1,4- & 3,4-dicloro; isomerizado (catalizador de Cu) a 3,4-dicloro; HCl vía NaOH; destilado para separar mono-Cl de bajo punto de ebullición; 3,4-di; 1,4-di; pesados	Más común	NaCl; productos sobreclorados
Bencenos clorados	Fase gaseosa: benceno + cloro + HCl	Menos común	Producto mixto
	Fase líquida: $\text{Cl}_2/\text{FeCl}_3$ para obtener mezcla; controlada por la cantidad de agente (mono) clorante; otros procesos especializados para determinados isómeros; los materiales altos en Cl pueden precipitarse. Purificados por destilación y cristalización; difíciles de separar	Más común	HCl
Epiclorhidrina	Cloruro de alilo + HOCl (agua de cloro) \rightarrow clorhidrinas de glicerol + NaOH/(CaOH) ₂ \rightarrow epiclorhidrina	Más común	Producto hidrolizado; polímeros
	Vapor extraído y luego destilado		
	También: propileno + O ₂ (catalizador de Pd) \rightarrow acetato de alilo \rightarrow alcohol alílico + Cl ₂ \rightarrow cloruro de alilo		
Desinfectantes de isocianurato	Ácido isocinaúrico + NaOH + Cl ₂		
Fosgeno	CO + Cl ₂ de uso prácticamente inmediato para producir policarbonato y poliuretano		
Fenoles clorados	Fenoles menos clorados; fenol + Cl ₂ ; diversos catalizadores de ácidos de Lewis; FeCl ₃ , ZnCl ₂	Más común	
Pentaclorofenol (PCP)	Fenol + Cl ₂ ; AlCl ₃ como principal catalizador industrial; 100°C–180°C	Más común	HCl
	Hexaclorobenceno (HCB) + NaOH	Menos común	NaCl

Producto químico	Proceso	Uso del proceso	Co-productos
Pentaclorofenato de sodio	PCP + NaOH	Más común	NaCl
	HCB + NaOH	Menos común	NaCl
Cloruro de vinilideno (ViCl ₂)	1,1,2-tricloroetano + NaOH o Ca(OH) ₂ ; también puede ser un co-producto de la cloración de materiales de C ₂ a altas temperaturas	Más común	NaCl o CaCl ₂
Cloruro de vinilo (VCM)	Acetileno + HCl → cloruro de vinilo; catalizador de Hg	Menos común	
	Etileno + Cl ₂ → EDC (directo; catalizador de Fe); HCl + O ₂ + etileno → EDC (oxicloro; catalizador de Cu)	Más común	
	Véase European Commission 2001, 2003		
Productos de C₁			
Cloruro de metilo	CH ₄ + Cl ₂ por calor o luz	Más común	
	CH ₃ OH + HCl → CH ₃ Cl	Más común	
Otros metanos clorados	CH ₃ Cl + Cl ₂ por calor o luz → CH ₂ Cl ₂ , CHCl ₃ , CCl ₄	Más común	
	CS ₂ + Cl ₂ → S ₂ Cl ₂ + CCl ₄	Menos común	
	CS ₂ + S ₂ Cl ₂ → S + CCl ₄		
Productos de C₂			
Etanos clorados			
1,1-di	VC + HCl/FeCl ₃	Más común	
1,2-di (EDC)	Etileno + Cl ₂ → EDC (catalizador de Fe) (cloración directa)	Más común	
	Etileno + HCl + O ₂ (catalizador de Cu) → EDC (oxicloración)		
1,1,1-tri	1,1-di + Cl ₂ (fotoquímico)	Más común	HCl
	1,1,2-tri → 1,1,1-tri	Más común	
	Etano + Cl ₂	Menos común	
1,1,2-tri	VC + Cl ₂	Más común	
	EDC + Cl ₂	Más común	HCl
1,1,1,2-tetra, 1,1,2,2-tetra	EDC + Cl ₂ (puede incluir oxicloro)	Más común	HCl
	C ₂ H ₂ + Cl ₂		
	C ₂ H ₄ + Cl ₂	Más común	HCl
1,1,1,2,2-penta	TCE + Cl ₂ → penta		

Producto químico	Proceso	Uso del proceso	Co-productos
Etilenos clorados			
Tricloroetileno (TCE) y percloroetileno (PCE)	$EDC + Cl_2 \rightarrow TCE + PCE$	Más común	HCl
	$EDC + Cl_2 \rightarrow PCE + CCl_4$	Más común	HCl
	$2 CCl_4 \rightarrow PCE$	Más común	
	$EDC + Cl_2 + O_2 \rightarrow PCE/TCE$	Más común	
	Tetracloroetanos + calor \rightarrow TCE	Más común	HCl
	Pentacloroetano + calor \rightarrow PCE	Menos común	HCl
Inorgánicos			
HCl	Subproducto; sal + ácido sulfúrico; hidrógeno + cloro; recuperación de la combustión de compuestos orgánicos clorados	Más común	
TiO ₂	$C, Cl_2, TiO_2 \text{ ore} \rightarrow TiCl_4 + O_2 \rightarrow TiO_2$	Más común	Cl ₂ , reciclado
	Mena de TiO ₂ + H ₂ SO ₄ \rightarrow Ti(SO ₄) ₂ \rightarrow TiO ₂	Menos común	Sulfatos
FeCl ₃	Hierro u óxido de hierro + HCl \rightarrow FeCl ₃		
Hipocloritos	Na: $2NaOH + Cl_2 \rightarrow NaOCl$		NaCl
	Ca: $Ca(OH)_2 + 2Cl_2 \rightarrow Ca(OCl)_2$ también por NaOCl utilizado como ingrediente para eliminar cloruros; recuperado y luego secado		CaCl ₂
ZnCl ₂	$Zn + HCl \rightarrow ZnCl_2$		
ClO ₂	Generado a partir de HClO ₂ o NaClO ₃		

Referencias

- Bailey R.E. 2001. "Global Hexachlorobenzene Emissions." *Chemosphere* 43:2.
- Barber J., Sweetman A. and Jones K. 2005. *Hexachlorobenzene: Sources, Environmental Fate and Risk Characterisation*. Euro Chlor. www.eurochlor.org/upload/documents/document187.pdf; annexes: www.eurochlor.org/upload/documents/document72.pdf
- Barber J., Sweetman A., van Wijk D. and Jones K. 2005. "Hexachlorobenzene in the Global Environment: Emissions, Levels, Distribution, Trends and Processes." *Science of the Total Environment* 349:1–44.
- Carroll W.F., Borrelli F.E., Jacobs R.A., Lewis J.W., McCreedy R.L., Tuhovak D.R. and Weston A.F. 1997. "Characterization of Emissions of Dioxins and Furans from Ethylene Dichloride (EDC), Vinyl Chloride (VCM) and Polyvinyl Chloride (PVC) Facilities in the United States: II, Ila Wastewater Treatment Solids and Aqueous Hydrochloric Acid." *Organohalogen Compd.* 32:447–450.
- CCC (Chlorine Chemistry Council). *Total Releases (of PCDD/F) for 2000 and 2001*. www.trifacts.org/table.html.
- ChEResources. *Distillation: ChE Links*. www.cheresources.com/I_distillation.shtml.
- Cowfer J.A., Johnston V.J. and Popiel L. 1998. *Method for Reducing Formation of Polychlorinated Aromatic Compounds during Air Oxychlorination of C₁-C₃ Hydrocarbons*. US Patent 5,750,812.
- Cowfer J.A., Johnston V.J. and Popiel L. 2001. *Method for Reducing Formation of Polychlorinated Aromatic Compounds during Oxychlorination of C₁-C₃ Hydrocarbons*. US Patent 6,177,599.
- ECVM (European Council of Vinyl Manufacturers). *Industry Charter for the Production of VCM and PVC*. www.ecvm.org/img/db/SPVCcharter.pdf.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Dioxins and Furans*. EPA-454/R-97-003. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2001. *Database of Sources of Environmental Releases of Dioxin-Like Compounds in the United States*. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/ncea/dioxindb.htm.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2006. *TRI Explorer*. EPA, Washington, D.C. www.epa.gov/triexplorer/.
- European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing Industry*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/BActivities.cfm.
- European Commission. 2003. *Reference Document on Best Available Techniques in the Large Volume Organic Chemicals Industry*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/BActivities.cfm.
- European Commission. 2006a. *Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals: Solid and Others*. Draft BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/BActivities.cfm.
- European Commission. 2006b. *Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Speciality Inorganic Chemicals*. Draft BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es/pages/BActivities.cfm.

- Fiedler H., Hutzinger O., Welsch-Paulsch K. and Schmiedinger A. 2000. *Evaluation of the Occurrence of PCDD/PCDF and POPs in Wastes and Their Potential to Enter the Foodchain*. Final Report. Study on behalf of the European Commission, DG Environment. University of Bayreuth.
- IPEN (International POPs Elimination Network). 2006a. *The Spolchemie Chlor-Alkali and Chlorine-Based Chemical Production Plant in Usti nad Labem (Czech Republic): Case Study for Hexachlorobenzene Unintentional Production*.
- IPEN (International POPs Elimination Network). 2006b. *Unintentional POPs in Pesticides*. (www.ipen.org)
- Lenoir D., Wehrmeier A., Sidhu S.S. and Taylor P.H. 2001. "Formation and Inhibition of Chloroaromatic Micropollutants Formed in Incineration Processes." *Chemosphere* 43:107–114.
- Millennium Chemical Corporation. *Titanium Dioxide Manufacturing Processes*. www.millenniumchem.com/.
- Ni Y., Zang Z., Zang Q., Chen J., Wu Y. and Liang X. 2005. Distribution Patterns of PCDD/Fs in Chlorinated Chemicals. *Chemosphere* 60(6):779-84.
- OxyVinyls. *Direct Chlorination*. www.oxyvinyls.com/tech_licensing/DirectChlorination.html.
- OxyVinyls. *Hydrogenation Technology*. www.oxyvinyls.com/tech_licensing/Hydrogenation.html.
- OxyVinyls. *Oxychlorination: Fixed Bed Technology*. www.oxyvinyls.com/tech_licensing/OxyFixedBed.html.
- OxyVinyls. *Oxychlorination: Fluid Bed Technology*. www.oxyvinyls.com/tech_licensing/OxyFluidBed.html.
- OxyVinyls. *Oxychlorination Technology*. www.oxyvinyls.com/tech_licensing/Oxychlorination.html.
- Randall P.M. 1994. "Pollution Prevention Strategies for Minimization of Industrial Wastes in the VCM-PVC Industry." *Environmental Progress* 13:269–277.
- Rippen G. and Frank R. 1986. "Estimation of Hexachlorobenzene Pathways from the Technosphere into the Environment." In: *Hexachlorobenzene: Proceedings of an International Symposium, Lyon* (eds. Morris C.R. and Cabral J.R.P.) IARC Scientific Publication No. 77. International Agency for Research on Cancer.
- UK Environment Agency. 1997. *A Review of Dioxin Releases to Land and Water in the UK*. Research and Development Publication 3. Environment Agency, Bristol, United Kingdom.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.
- Vinnolit. *VinTec By-product Recovery Process*. www.vinnolit.de/lizenz/recover.htm.
- Vinnolit. *VinTec EDC Oxychlorination Process*. www.vinnolit.de/lizenz/oxy.htm.
- Wiley Interscience. 2000. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th Edition. John Wiley and Sons, New York.
- World Chlorine Council. 2002. *Products of the Chlorine Tree*. worldchlorine.com/publications/pdf/chlorine.pdf.

- ¹ Para más información sobre mediciones de toxicidad véase la sección I.C, subsección 3, de las presentes directrices.
- ² 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gases secos medido a 0°C y 101.3 kPa. La información sobre mediciones sobre toxicidad figura en la sección I.C, subsección 3, de las presentes directrices.

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Crematorios



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.G

**Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C**

Categoría de fuentes (g) de la Parte III: Crematorios

Í N D I C E

VI.G Crematorios	9
1. Descripción del proceso	9
2. Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	11
2.1 Información general sobre emisiones de crematorios	11
2.2 Emisiones de PCDD/PCDF al aire	11
2.3 Liberaciones hacia otros medios.....	12
3. Procesos recomendados	12
3.1 Panorama general.....	12
3.2 Mejores técnicas disponibles	12
3.3 Mejores prácticas ambientales.....	13
4. Medidas primarias y secundarias	14
4.1 Medidas primarias.....	14
4.2 Medidas secundarias.....	15
5. Resumen de medidas	17
6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	20
Referencias	20
Tablas	
Tabla 1. Medidas para procesos recomendados en crematorios	17
Tabla 2. Resumen de medidas primarias y secundarias para crematorios.....	18
Figuras	
Figura 1. Esquema de un proceso típico de cremación	10

■ Resumen

Desde la antigüedad hasta nuestros días, la cremación ha sido una práctica aceptada, de importancia religiosa y cultural, que muchos países y culturas utilizan en la muerte de los seres humanos. Para algunos países y culturas, la cremación es parte integral de las prácticas religiosas y funerarias; para otros, se trata de una alternativa voluntaria a la inhumación. Las presentes directrices no pretenden redefinir estas prácticas o subestimar el significado que tienen en algunas poblaciones. Para los países en los que se practica la cremación, y siguiendo las disposiciones del Convenio de Estocolmo, el objetivo de estas directrices es ofrecer métodos para reducir al mínimo o eliminar la formación y liberación de las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo durante el proceso de cremación.

Los crematorios pueden formar y liberar PCDD, PCDF, HCB y PCB por la presencia de estos compuestos clorados, precursores o cloro en los cadáveres y en algunos plásticos co-incinerados. Algunas medidas para reducir al mínimo la formación y liberación de las sustancias del Anexo C son: evitar el material clorado, diseñar crematorios que operen a una temperatura mínima de 850°C, disponer un tiempo de residencia de 2 segundos para los gases de combustión y suficiente aire para garantizar la combustión. Los crematorios nuevos y grandes deberían además estar equipados con sistemas de control de la contaminación atmosférica para reducir al mínimo la emisión de dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes. Con la aplicación de mejores técnicas disponibles se pueden alcanzar niveles de <0.1 ng EQT-I/Nm³ en emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF.

1. Descripción del proceso

La cremación es el proceso de eliminación de un cadáver por incineración. Puede realizarse sin control alguno, a cielo abierto en piras funerarias, o en condiciones controladas, dentro de un horno crematorio instalado en un crematorio. En lo tocante a la prevención de liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes, las presentes directrices harán referencia únicamente a las instalaciones de cremación y no a las alternativas de incineración a cielo abierto o alternativas que no implican incineración. No obstante, cabe señalar que, en algunos países, las prácticas culturales o sociales pueden determinar qué procesos se emplean para la eliminación de cadáveres. Por eso, es importante prestar la debida atención a estos aspectos.

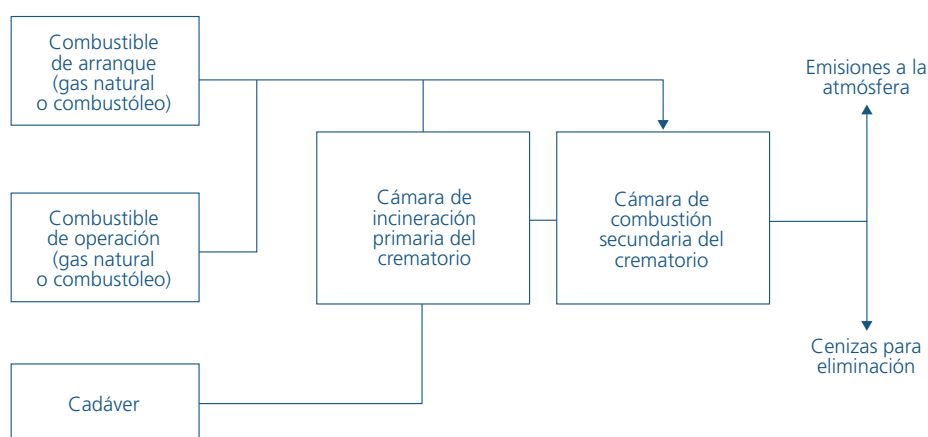
Un horno crematorio típico se compone de dos cámaras de combustión (Figura 1). La primera, o primaria, contiene la solera donde se coloca el ataúd. Se aplica aire por tiro forzado, y uno o dos quemadores principales auxiliares (del orden de 200 a 300 kW). Funcionan generalmente a base de gas, pero en algunos casos funcionan con petróleo. También existen unos pocos modelos de hornos eléctricos. Las cámaras primarias miden por lo regular entre 1.5 y 2.5 m³. El ataúd y el cadáver son incinerados en la solera fija;

luego, los gases de combustión, los productos de combustión incompleta y la material particulado arrastrados, producidos durante el proceso, pasan a la cámara secundaria de combustión.

En esta segunda cámara se puede agregar más aire de combustión, y un sistema de post-combustión ayuda a completar el proceso. A veces, la cámara secundaria también se utiliza para precalentar el aire de combustión para la cámara primaria.

Los gases de combustión son expulsados del horno por medio de un ventilador por tiro inducido o un eyector Venturi. Pocos países exigen la instalación de un equipo de control de contaminación atmosférica al final del proceso de cremación; en estos casos, el sistema que suele emplearse es el de filtración/inyección en seco. En este sistema se inyecta en la corriente de gas enfriado un adsorbente adecuado, por ejemplo una mezcla de cal en polvo y carbón activado; luego, un filtro de manga de gran eficacia elimina el polvo inyectado junto con la material particulado arrastrado. En el Reino Unido, por ejemplo, los nuevos crematorios y algunos crematorios existentes deben estar equipados con estos sistemas de adsorción para controlar las emisiones de mercurio, y que presentan la ventaja adicional de controlar también las emisiones de dioxinas.

■ **Figura 1. Esquema de un proceso típico de cremación**



Muchas instalaciones de todo el mundo están equipadas con modelos más antiguos de hornos crematorios, cuyas cámaras secundarias son más pequeñas, con tiempos de residencia más cortos y a veces sin sistema de post-combustión. Los hornos crematorios más antiguos suelen ser operados manualmente, y el operador determina la duración de la combustión y la distribución del aire.

La cremación ha sido una práctica aceptada, de importancia religiosa y cultural, que muchos países y culturas utilizan ante la muerte de los seres humanos. Para algunos países y culturas, la cremación es parte integral de las prácticas religiosas y funerarias; para otros, se trata de una alternativa voluntaria a la inhumación. Es imprescindible que en todo análisis sobre el diseño y funcionamiento de los crematorios se tenga en cuenta el hecho de que se trata de la eliminación de restos humanos. Por ello, estos estudios deben ser debidamente dignificados, considerando la relación a veces conflictiva entre prácticas sociales y culturales y objetivos ambientales.

2. Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

Los crematorios pueden formar y liberar PCDD, PCDF, HCB y PCB por la presencia de estos compuestos clorados, precursores o cloro en los cadáveres y en algunos plásticos co-incinerados (ej., ornamentos del ataúd, que en algunos países se han ido eliminados). Se han realizado algunas mediciones de las emisiones de PCDD/PCDF en crematorios, pero los datos para PCB y HCB, si es que los hay, no son siempre uniformes. Por eso, los niveles de emisiones de PCB y HCB son mucho más inciertos que los de emisiones de PCDD/PCDF de estas fuentes.

2.1 Información general sobre emisiones de crematorios

Las emisiones transportadas por aire están compuestas de óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), material particulado, compuestos metálicos, entre ellos mercurio, compuestos orgánicos y PCDD/PCDF.

Como ya se ha mencionado, algunos crematorios han instalado equipos para el control de la contaminación atmosférica, por ejemplo, inyección de cal y carbón activado y filtros de tela. Sin embargo, la mayoría tienen sistemas de control de contaminación que van desde los muy básicos (una cámara de combustión y chimenea) hasta los bastante avanzados, con cámaras secundarias de combustión y post-quemadores

2.2 Emisiones de PCDD/PCDF al aire

Los PCDD/PCDF se forman por combustión incompleta o síntesis *de novo* cuando el material de alimentación o la matriz de gases de combustión contienen compuestos orgánicos o clorados.

Aunque se considera que los PCDD/PCDF, el PCB y el HCB se destruyen a altas temperaturas (850°C como mínimo) en presencia de oxígeno, se puede dar una síntesis *de novo* de PCDD/PCDF cuando los gases de combustión se enfrían durante un período largo en una ventana de temperatura que propicia su reformación (entre 200°C y 400°C). Puede darse esta ventana de reformación en sistemas de reducción, equipo de recuperación de energía y en las partes más frías del horno, por ejemplo, en el área de alimentación. Para evitar la síntesis *de novo*, es importante tomar las debidas precauciones al diseñar sistemas de enfriamiento para reducir los tiempos de residencia en la ventana de reformación.

En muchos países, el equipo de cremación suele instalarse en construcciones antiguas que no fueron concebidas para tal fin. A menudo, tienen largos tramos horizontales de ducto cuyas temperaturas se encuentran en esta ventana de reformación. En estos sistemas también se deposita material particulado, que suele contener precursores adsorbidos, con lo que se potencian las reacciones de reformación.

En el Reino Unido, por ejemplo, se exige que los hornos crematorios logren concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF inferiores a 0.1 ng EQT- l/m^3 normalizado a 11% de oxígeno, temperatura y presión seca y estándar (0°C, 101.3 kPa).¹

Sin embargo, sólo se debe demostrar que se han logrado los requisitos técnicos de combustión de tiempo de residencia, temperatura y oxígeno en la cámara secundaria.

Al examinar el manual de normatividad revisado, se realizó un estudio sobre emisiones de hornos crematorios típicos. Las pruebas arrojaron concentraciones de PCDD/PCDF entre 0.01 y 0.12 ng EQT-l/m³, y concentraciones bajas de PCB, aunque los límites de detección desempeñaron un papel importante en la estimación de liberaciones.

2.3 Liberaciones hacia otros medios

Por la naturaleza del proceso, las cenizas son un producto ético y no suelen ser objeto de control. Esparcir las cenizas en agua, por ejemplo, es una vía potencial de liberación de contaminantes. Por otro lado, quedan deposiciones en las cámaras y ductos del horno crematorio que se eliminan al efectuar el mantenimiento rutinario. En el Reino Unido, este material se entierra a gran profundidad en el perímetro del crematorio (al igual que los metales recuperados de la solera y las cenizas recuperadas). La Federation of British Cremation Authorities y la Cremation Society of Great Britain realizaron un pequeño estudio para determinar los niveles de PCDD/PCDF en cenizas (Edwards 2001). Las concentraciones en cenizas resultaron lo suficientemente bajas para ser consideradas insignificantes en términos de potencial de riesgo de exposición.

3. Procesos recomendados

3.1 Panorama general

Los hornos crematorios deberían ser diseñados para cumplir con los requisitos mínimos de temperatura de 850°C, tiempo de residencia de los gases de combustión de 2 segundos y suficiente exceso de aire que garantice la combustión. A menos que demuestren que pueden operar sin emitir cantidades importantes de contaminantes orgánicos persistentes, se debería desaconsejar el uso de modelos que no puedan cumplir estos requisitos.

Las instalaciones más grandes, como las reglamentadas por la Directiva de Prevención y Control Integral de la Contaminación en la Unión Europea, pueden estar, además, sujetas a importantes requisitos de control de contaminación atmosférica para cumplir con las disposiciones referentes a otros contaminantes, como la reducción selectiva no catalítica para el control de NO_x, inyección de cal para el control de gases ácidos (SO₂ y HCl), inyección de carbono para el control de mercurio y PCDD/PCDF, y filtros de tela para el control de material particulado.

3.2 Mejores técnicas disponibles

- Las mejores técnicas disponibles son las que abarcan tanto aspectos de tecnología como de gestión. El control de contaminantes orgánicos persistentes debería comprender los siguientes elementos y consideraciones:
- Un horno crematorio que cumpla los requisitos mínimos de temperatura, tiempo de residencia y oxígeno, y que pueda demostrar su cumplimiento.

- Equipo adecuado para el control de contaminación atmosférica (para controlar contaminantes orgánicos persistentes tendría que poder efectuar la gestión de temperatura para controlar el tiempo de residencia en la ventana de reformación, y emplear inyección de carbono y filtros de tela o sus equivalentes) además de la inhumación de todo material recolectado en condiciones cultural y ambientalmente adecuadas.
- Las cámaras de combustión y revestimientos deberían ser lo más herméticos posibles y operar a presiones reducidas para disminuir al mínimo la liberación de gases de combustión.
- Se deberían monitorear las temperaturas de los gases para que los sistemas de control se ciñan a los criterios de temperatura mínima (apoyándose en el empleo de quemadores de combustible auxiliar) y prever un sistema de bloqueo de seguridad para detener la carga cuando la temperatura caiga por debajo del nivel mínimo.
- Se deberían monitorear los niveles de oxígeno y monóxido de carbono de los gases de combustión y vincularlos al sistema de control para garantizar el control adecuado de suministros de aire y resolver los problemas de combustión.
- Mecanización de la carga y manipulación de ataúdes para reducir la exposición de los operadores.
- Las instalaciones de almacenamiento de ataúdes deben estar bajo llave, refrigeradas, ser a prueba de roedores y aves y contar con un sistema de control de olores.
- El ataúd y sus aditamentos deberían estar hechos de material combustible. Evitar el uso o la introducción de artículos que contengan PVC, metales y otros compuestos clorados.
- Control efectivo de la operación, inspección y mantenimiento preventivo de componentes que, en caso de falla, pueden liberar contaminantes orgánicos persistentes y afectar el medio ambiente.
- Deberían determinarse las competencias de los operadores y proporcionar la correspondiente capacitación.
- Aplicación de valores límite de emisión de contaminantes orgánicos persistentes, y monitoreo de emisiones para demostrar su cumplimiento.
- No se han considerado las mejores técnicas disponibles para otros contaminantes y hay que tener en cuenta que en cada planta habrá otros factores que incidan en la definición de mejores técnicas disponibles (ej., uso de agua y energía).

3.3 Mejores prácticas ambientales

En cuanto a mejores prácticas ambientales, los países deberían, en primera instancia, procurar que se construyan instalaciones que puedan cumplir los criterios mínimos de temperatura del horno, tiempo de residencia y oxígeno. Cabe señalar que quizás sea necesario instalar equipos de control de contaminación atmosférica para cumplir con la

reglamentación local sobre emisiones y calidad del aire para otros contaminantes además de los orgánicos persistentes.

En los casos en que las instalaciones cuenten con equipo para el control de contaminación atmosférica o de recuperación de energía, este equipo debe estar diseñado para reducir o eliminar el riesgo de formación *de novo* de PCDD/PCDF, reduciendo al mínimo el tiempo de residencia del material en la ventana de temperatura de reformación. Al entrar en operación se deberían realizar mediciones para demostrar que las emisiones de estas instalaciones no contienen contaminantes orgánicos persistentes.

4. Medidas primarias y secundarias

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas de prevención de la contaminación para reducir o eliminar la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. A continuación se exponen algunas.

4.1.1 Diseño del horno crematorio

Las condiciones del horno crematorio deberían permitir una temperatura mínima constante de 850°C durante las fases de carga, incineración y recuperación de las cenizas del ataúd y el cadáver, con un tiempo de residencia de gases de 2 segundos y suficiente oxígeno para garantizar la destrucción de todo contaminante residual.

Para cumplir estos criterios, se requerirá una cámara de combustión secundaria con post-quemadores o inyección de aire. Se debería procurar que la cámara secundaria tenga las dimensiones adecuadas y el volumen requerido (volumen de los gases después de la última inyección de combustible o de aire de combustión y con una temperatura mínima de 850°C en todo el volumen). Es importante evitar que los gases de combustión se enfríen hasta llegar a temperaturas del rango de reformación.

Se sabe que resulta difícil recuperar cenizas a 850°C en crematorios pequeños y no mecanizados.

4.1.2 Preparación previa a la cremación

Deberían evitarse PVC, metales y otros contaminantes (en especial compuestos clorados) en los materiales de fabricación del ataúd y sus aditamentos, con el fin de reducir la generación de contaminantes orgánicos persistentes por combustión incompleta o síntesis *de novo*. Una acertada selección de los materiales puede controlar en forma efectiva la emisión de contaminantes.

Asimismo, debería evitarse colocar objetos personales en el ataúd, o sólo permitirse en condiciones determinadas, a fin de impedir que incrementen el potencial de generación de contaminantes orgánicos persistentes. Los crematorios pueden proporcionar orientación, por ejemplo, sobre implantes médicos y objetos de valor sentimental (Australasian Cemeteries and Crematoria Association 2004).

4.1.3 Combustibles

Se debería reducir al mínimo el uso de combustibles provenientes de desechos u otros combustibles potencialmente contaminados con contaminantes orgánicos persistentes. No se deben utilizar durante el encendido o en alteraciones del proceso, cuando las temperaturas son inferiores a 850°C y las condiciones pueden ser inestables. Las grandes instalaciones deberían procurar la combustión autosuficiente en el horno a fin de reducir al mínimo el uso de combustible.

4.1.4 Control efectivo de la combustión

Son tres los principios esenciales de un buen control de la combustión en los hornos crematorios:

- En la entrada y salida de la cámara secundaria, mantener una temperatura mínima de 850°C.
- En la cámara secundaria, mantener la concentración de oxígeno (y, por consiguiente, de exceso de aire) por encima del 6% por volumen.
- Mantener los gases de combustión dentro de la cámara secundaria por lo menos durante 2 segundos.

4.1.5 Control efectivo del proceso

Deberían emplearse sistemas de control del proceso para mantener su estabilidad y funcionamiento a niveles paramétricos que contribuyan a reducir la generación de contaminantes orgánicos persistentes, por ejemplo, manteniendo una temperatura mínima de 850°C en el horno. Se deberían mantener y vigilar continuamente las variables como temperatura, tiempo de residencia y niveles de CO, compuestos orgánicos volátiles y otros componentes de gases a fin de establecer condiciones de operación óptimas.

4.1.6 Competencia de los operadores

La gestión de las instalaciones es el elemento clave para garantizar una operación segura y ambientalmente adecuada. Todo el personal que trabaja en las instalaciones debería estar plenamente familiarizado con las tareas asignadas, en particular respecto al funcionamiento habitual, mantenimiento, fallas en el proceso y legislación ambiental local. Para asegurar la competencia de los operadores se debe facilitar la capacitación al nivel adecuado para cada instalación.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas de control de la contaminación. Estos métodos no eliminan la generación de contaminantes pero sirven para contener y prevenir emisiones.

4.2.1 Recolección de humos y gases

Se deberían controlar las emisiones atmosféricas en todas las fases del proceso, incluso en el manejo de material, en los puntos de combustión y transferencia del material, a fin de controlar la emisión de contaminantes orgánicos persistentes. Los hornos sellados son esenciales para retener las emisiones fugitivas y al mismo tiempo permitir la recuperación de calor y la recolección de gases residuales para eliminación o descarga. Un diseño adecuado de los sistemas de extracción y de los ductos es fundamental para reducir al mínimo las descargas fugitivas.

4.2.2 Equipo de control de contaminación atmosférica

Las instalaciones grandes deberían utilizar equipos de control de contaminación atmosférica para controlar todas las emisiones importantes hacia la atmósfera. Una cuidadosa selección, diseño y uso del equipo de control de contaminación atmosférica para otros contaminantes también ayudará, en general, a reducir las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes. El diseño debe tener en cuenta el potencial de formación *de novo* de ciertos contaminantes orgánicos persistentes y reducir al mínimo tal potencial. El material particulado debería eliminarse a fin de reducir las emisiones de PCDD/PCDF en la atmósfera (aunque sean descargadas en rellenos). Los filtros de tela son un método efectivo pero se trata de sistemas que funcionan a bajas temperaturas (hasta 200°C).

Se deberían monitorear constantemente las operaciones de control de contaminación atmosférica mediante dispositivos para de detección de fallas. Los métodos de limpieza en línea y el uso de recubrimientos catalíticos para destruir PCDD/PCDF son otras opciones.

Se debería considerar el tratamiento con carbón activado para eliminar contaminantes orgánicos persistentes en gases de salida. El carbón activado posee una gran área superficial en la que se pueden adsorber los PCDD/PCDF. Los gases de salida pueden ser tratados con carbón activado empleando reactores de lecho fijo o móvil, o inyectando carbón activado pulverizado en la corriente de gases y, posteriormente, eliminándolos con sistemas de eliminación de polvo de alta eficiencia como los filtros de tela.

5. Resumen de medidas

Las tablas 1 y 2 presentan un resumen de las medidas analizadas anteriormente.

■ **Tabla 1. Medidas para procesos recomendados en crematorios**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Instalaciones grandes y nuevas en países desarrollados	Mínimo 850°C y tiempo de residencia de 2 segundos en volumen requerido con suficiente aire para garantizar la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes. Instalar equipo de control de contaminación atmosférica para reducir emisiones de SO ₂ , HCl, CO, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes.	Se consideran mejores técnicas disponibles. También deberían contar con sistemas de gestión, y demostrar que las instalaciones cumplen con los valores límite de emisión, así como monitorear constantemente las emisiones para garantizar su cumplimiento.
	Pequeñas instalaciones	Mínimo 850°C y tiempo de residencia de 2 segundos en volumen requerido con suficiente aire para garantizar la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes.	Para plantas más pequeñas, estas condiciones deberían ser las mínimas en lo relativo a contaminantes orgánicos persistentes. Podrían adoptarse con un sistema de homologación, e inspección de la gestión de las instalaciones (en lugar de las costosas pruebas de emisiones).

■ **Tabla 2. Resumen de medidas primarias y secundarias para crematorios**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Diseño del horno			Ideal para potenciar la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes y reducir su formación.
Preparación previa a la cremación	Se debería evitar la presencia de plásticos, metales y compuestos de cloro en el material y aditamentos del ataúd para reducir la generación de contaminantes orgánicos persistentes por combustión incompleta o por síntesis <i>de novo</i> .	Eliminación de plásticos clorados.	Tecnología de poca complejidad; ha funcionado con éxito en el Reino Unido.
Combustibles	Combustibles auxiliares limpios.		
Control efectivo de la combustión	Las condiciones técnicas de combustión deben cumplir los requisitos mínimos de temperatura, oxígeno y tiempo de residencia.	Buenos resultados de combustión a mínimo 850°C, 6% de O ₂ y tiempo de residencia de 2 segundos.	Requiere buenos principios de diseño y técnicas de control precisas para cumplir los requisitos.
Control efectivo del proceso	Se deberían utilizar sistemas de control del proceso para mantener la estabilidad su estabilidad y operar a niveles paramétricos que contribuyan a reducir la emisión de contaminantes orgánicos persistentes.	Las emisiones de PCDD/PCDF pueden reducirse controlando otras variables como temperatura, tiempo de residencia, componentes gaseosos, etc.	El uso de la temperatura es un parámetro de control bastante básico. Monitorear el oxígeno, CO y compuestos orgánicos volátiles es más complejo pero preciso. Sin embargo, lo principal es mantener un sistema de control que pueda utilizar datos en tiempo real que permitan controlar los reguladores del suministro de aire para la combustión y quemadores auxiliares, entre otros elementos.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Capacitación de los operadores			Los fabricantes de hornos crematorios y las organizaciones profesionales pueden dar capacitación completa a los operadores. Ej.: el programa Crematorium Technicians Training Scheme, aplicado en el Reino Unido.

Medidas secundarias

Recolección de humos y gases	Retención efectiva de los gases del horno en todas las condiciones del proceso de cremación para evitar las liberaciones fugitivas.	Considerar la utilización de hornos sellados para retener emisiones fugitivas y permitir al mismo tiempo la recuperación de calor y la recolección de gases de salida.	
Equipo de control de contaminación atmosférica	La eliminación del material particulado ayudará a reducir el potencial de emisión de contaminantes orgánicos persistentes. El tratamiento con carbón activado debería considerarse ya que este material posee una gran área superficial en la que se pueden adsorber PCDD/PCDF de gases de salida.	Los filtros de tela son la técnica más efectiva de eliminación de material particulado y son compatibles con el uso de sorbentes secos y semihúmedos para el control de gases ácidos y metales. Sin embargo, exige una reducción de temperatura. Inyección de carbón activado pulverizado en la corriente de gases seguida de la eliminación como polvo de filtro.	El uso de dispositivos para el control de la contaminación genera flujos adicionales de desechos y requiere el uso de consumibles. Posiblemente requerirá reducción de la temperatura de los gases de combustión (para evitar el uso de medios de filtración más exóticos). Por consiguiente, se debe procurar reducir la permanencia en la ventana de reformación. Es mejor evitar la formación de los contaminantes orgánicos persistentes en el horno. Sin embargo, este método proporciona cierto respaldo en casos de falla del proceso, y en Europa se considera una mejor técnica disponible para procesos de incineración.

6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

El nivel de desempeño para emisiones atmosféricas de PCDD/PCDF de crematorios es de <0.1 ng EQT-I/Nm³. Para plantas de combustión, estos niveles de emisión se expresan como concentraciones de masa a 11% de oxígeno, temperatura y presión secas y estándar (0°C, 101.3 kPa). En vista de la escasa información uniforme sobre emisiones de PCB y HCB de hornos crematorios, no se tiene claridad respecto a los niveles de emisión que pueden lograrse para estas sustancias.

Los valores de PCDD/PCDF de crematorios en el Reino Unido (Edwards 2001) se encuentran entre 0.01 y 0.12 ng EQT-I/Nm³. Los valores de PCDD/PCDF de plantas en Francia se sitúan entre 0.1 y 4.2 ng EQT-I/Nm³ (Livolsi *et al.* 2006). El resultado promedio obtenido por el PNUMA sobre PCDD/PCDF de los crematorios de Bangkok (que tienen un largo ducto de escape de ladrillo) fue de 17.6 ng EQT-I/Nm³ (Fiedler 2001). Un estudio de los crematorios en Corea arrojó concentraciones de PCDD/PCDF de 0.46 a 2.1 ng EQT-I/Nm³ (Kim *et al.* 2003).

Referencias

Australasian Cemeteries and Crematoria Association. 2004. *Cemetery Trust Manual*. Victorian Government Department of Human Services, Public Health Division.

Edwards P. 2001. "Review of Emissions from Crematoria in the UK." AEA Technology Report. *Resurgam* 44:81–128 and *Pharos International* 67:3.

Fiedler H. 2001. *Thailand Dioxin Sampling and Analysis Program*. Report by UNEP Chemicals in cooperation with PCD, GTZ, Euro Chlor.

Kim D.H. *et al.* 2003. "Estimation of PCDDs, PCDFs and PAHs Emission from Crematories in Korea." *Organohalogen Compd.* 63:9–12.

Livolsi B, Labrousse S. Baron P. Fiani E. (2006) "Dioxin emissions from French crematoria and associated health impact" *Organohalogen Compounds* 68. In press.

Notas

¹ 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} g). La subsección 3 de la sección I.C de las presentes directrices contiene más información sobre mediciones de la toxicidad.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/12

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

**Vehículos de motor, en particular los
que utilizan gasolina con plomo
como combustible**



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.H

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

**Categoría de fuentes (h) de la Parte III:
Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina
con plomo como combustible**

VI.H Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible	9
1. Introducción	9
1.1 Descripción del proceso	9
1.2 Combustibles, tipos de motores y emisiones	9
2. Formación y liberación de PCDD y PCDF	11
2.1 Estudios sobre emisiones de PCDD y PCDF	11
2.2 Resumen de conclusiones	13
3. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales	14
4. Normativas para reducir las emisiones de PCDD y PCDF	14
Referencias	15
 Tablas	
Tabla 1. Emisiones de PCDD y PCDF de vehículos de motor	12

VI.H Vehículos de motor, en particular los que utilizan gasolina con plomo como combustible

■ Resumen

Los principales combustibles que se utilizan en los vehículos de motor son la gasolina y el diesel. El gas licuado de petróleo, el combustible a base de aceite vegetal y otros biocarburantes, además de las mezclas de alcohol y petróleo, están adquiriendo importancia.

Se ha detectado la presencia de PCDD y PCDF en las emisiones provenientes de los vehículos de motor que utilizan gasolina o diesel. Las concentraciones más altas que se han identificado en las emisiones de los vehículos que funcionan con gasolina con plomo se deben a la presencia de fuentes de cloro y bromo en forma de aditivo de limpieza (scavenger) en el combustible.

Pueden considerarse los siguientes combustibles como alternativas a la gasolina con plomo: gasolina sin plomo (de preferencia con catalizador), diesel (de preferencia con catalizador de oxidación diesel y filtro de partículas), gas licuado de petróleo, gas natural comprimido, gas propano / butano, combustibles de biomasa y mezclas de alcohol y petróleo.

Entre las mejores técnicas disponibles se cuenta la prohibición de los aditivos de limpieza halogenados y el equipamiento de los vehículos con un catalizador de oxidación o un filtro de partículas.

No hay datos de mediciones de combustibles de biomasa, mezclas de alcohol y petróleo o gas licuado de petróleo. Tampoco los hay para los motores de dos tiempos.

1. Introducción

1.1 Descripción del proceso

Para los vehículos de motor, la descripción del proceso es relativamente sencilla. El motor de gasolina obtiene su energía de la explosión de una mezcla de aire y gasolina, mientras que en el motor diesel el combustible se quema en lugar de explotar. Al encenderse, la mezcla de aire y combustible se expande rápidamente dentro de un cilindro, forzando un pistón desde la parte superior del cilindro a la inferior. Una vez emitido, el gas de escape se disuelve unas mil veces aproximadamente durante los primeros segundos y se enfría a gran velocidad (DEH, 2004).

1.2 Combustibles, tipos de motores y emisiones

Los principales combustibles que se utilizan en los vehículos de motor son gasolina, diesel y gas licuado de petróleo. La mayoría de los motores de combustión interna de gasolina que se usan hoy en día en automóviles, camionetas, motocicletas y otros vehículos son de cuatro tiempos. Como en muchos procesos de combustión, los

motores de combustión interna generan dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) como subproductos no deseados (UNEP, 2005).

La mayor parte de los motores que se usan hoy en día en barcos, motos de agua, ciclomotores, motocicletas pequeñas, mototriciclos, segadoras de césped, motosierras y otros vehículos y artefactos, son de dos tiempos. Estos motores funcionan con el mismo ciclo termodinámico de combustión que el motor de cuatro tiempos. Sin embargo, funcionan con sólo dos carreras, es decir la carrera combinada de escape y admisión y la de compresión, encendido y combustión. La diferencia más notable respecto del motor de cuatro tiempos consiste en que se realizan todas las carreras en una sola revolución completa del cigüeñal. Por lo general, la lubricación se realiza por medio de aceite que se añade al combustible. Por consiguiente, en comparación con los motores de cuatro tiempos, pueden liberarse cantidades superiores de contaminantes y la eficiencia puede ser menor. No obstante, la sencillez y bajo costo de producción del motor de dos tiempos lo hace ideal para las aplicaciones de pequeña escala.

Los motores diesel se usan en camiones de gran tonelaje, camionetas, automóviles de pasajeros, maquinaria de construcción pesada, barcos, generadores, bombas y equipo agrícola, incluidos los tractores y demás maquinaria. Generalmente usan diesel (combustible ligero) y un ciclo de cuatro carreras. Para el encendido se usa la compresión en lugar de una chispa. Se introduce aire en el cilindro y se comprime. El combustible diesel se agrega a alta presión, y se quema. De ahí que el uso de combustible sea más eficiente y se produzcan menos emisiones específicas. Sin embargo, se asocia la emisión de partículas en forma de hollín al funcionamiento de motores diesel a causa de la combustión incompleta, en especial durante el arranque, el calentamiento y los cambios de carga. Se sabe con certeza que las emisiones de partículas provenientes de estos motores contienen altas concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Desde que se detectaron PCDD y PCDF por primera vez en lubricantes de motor usados (Ballschmitter *et al.*, 1986), se ha acumulado evidencia de que estas sustancias se forman y emiten por el proceso de combustión de los motores de gasolina y diesel. La combustión incompleta y la presencia de cloro en el combustible, el lubricante y el aire producen PCDD y PCDF, sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo (Marklund *et al.*, 1987, 1990; Schwind *et al.*, 1991; Hutzinger *et al.*, 1992; Gullett and Ryan, 1997). En el caso de los motores de gasolina el aire es el único vector de liberación importante de PCDD y PCDF, mientras que los motores diesel generan cantidades considerables de sedimentos (hollín). Sin embargo, no hay datos de mediciones de las concentraciones de PCDD y PCDF en hollín de diesel (UNEP, 2005).

2. Formación y liberación de PCDD y PCDF

2.1 Estudios sobre emisiones de PCDD y PCDF

Varios estudios europeos y uno estadounidense evaluaron las emisiones de PCDD y PCDF de los vehículos, midiendo su presencia en el aire de los túneles. Este método tiene la ventaja de que permite el muestreo aleatorio de gran número de automóviles, con gran diversidad en cuanto a años de antigüedad y grado de mantenimiento. La desventaja radica en que depende de mediciones indirectas, que pueden introducir incertidumbres desconocidas y dificultar la interpretación de las conclusiones. Se ha planteado la inquietud de que, en los estudios en túneles, las partículas resuspendidas y los PCDD y PCDF adsorbidos que se han ido acumulando podrían arrojar mediciones exageradas de las emisiones. Por ello, este método no se ha considerado apropiado, y los resultados de estos estudios no se analizan en detalle en la compilación de estas directrices. Para más información, remitimos a las publicaciones sobre estudios del aire en túneles y aire ambiental que figuran al final de esta sección.

El primer estudio sobre emisiones de tubo de escape fue llevado a cabo por Marklund *et al.* en 1987, en automóviles suecos. Desde entonces se han realizado varios estudios ya sea en motores en marcha (en automóviles de pasajeros o camiones), en dinamómetros de motor de banco o de chasis. Se han probado diferentes combustibles en condiciones diversas (simulando distintas situaciones de tráfico o distintas cargas). Los resultados de los estudios que registran emisiones basadas en el consumo de combustible se resumen en la Tabla 1.

■ **Tabla 1. Emisiones de PCDD y PCDF de vehículos de motor**

Combustible	Tipo de vehículo	Emisión (pg EQT/L)	Referencia
Gasolina sin plomo, cuatro tiempos	Automóvil de pasajeros, viejo: antes del silenciador / en el tubo de escape	60/10	Marklund <i>et al.</i> , 1990
	Automóvil de pasajeros, nuevo: antes del silenciador / en el tubo de escape	21/23	Marklund <i>et al.</i> , 1990
	Automóvil de pasajeros	0.55–1.66	Schwind <i>et al.</i> , 1991
Diesel	Camión	291	Geueke <i>et al.</i> , 1999
	Vehículos pesados	29.3–47.7	Gullett and Ryan, 1997
	Automóvil de pasajeros	2–141	Schwind <i>et al.</i> , 1991
	Camión	4–88	Schwind <i>et al.</i> , 1991
	Sin información	0.5, 0.6, 2.0	Kim <i>et al.</i> , 2003
	Camión	1.20–103	Government of Japan, 2003
	Automóvil de pasajeros	1.47–121	Government of Japan, 2003
	Automóvil de pasajeros (cloro: 12, 131, 259 ppm)	3–49	Dyke, 2005
Gasolina sin plomo, cuatro tiempos	Auto de pasajeros, antiguo y nuevo: antes del silenciador o en tubo de escape.	3.5	Marklund <i>et al.</i> , 1990
	Automóvil de pasajeros	5–22	Schwind <i>et al.</i> , 1991
	Camión	0.42, 0.99	Government of Japan, 2003
	Automóvil de pasajeros	0.34–16.42	Government of Japan, 2003
Gasolina sin plomo con catalizador, cuatro tiempos	Automóvil de pasajeros	2–3	Schwind <i>et al.</i> , 1991

En 1994, Hagenmaier y colaboradores analizaron las emisiones de un autobús con motor diesel (Hagenmaier 1994; Hagenmaier *et al.*, 1995). Las concentraciones de PCDD y PCDF se encontraban cerca de 1 pg/L para congéneres individuales 2, 3, 7, 8-substituidos, dando un EQT-I de 0,01 ng EQT-I/L. Así, pues, los resultados de 1994 fueron mucho más bajos que los resultados obtenidos en 1990 (Hagenmaier *et al.*, 1990). Mientras que en 1990 las dibenzoparadioxinas (PXDD) y dibenzofuranos polihalogenados (PXDF) (X = Br, Cl) pudieron ser cuantificados, las emisiones de 1994 no contenían PXDD y PXDF detectables. Igualmente, las concentraciones de PCDD y

PCDF estaban por debajo del límite de cuantificación en un extracto obtenido de un vehículo de gasolina (Hagenmaier *et al.*, 1995). Estos resultados indican que con la prohibición del uso de aditivos de limpieza halogenados (en Alemania: véase BImSchV, 1992), se eliminó la fuente principal de PCDD y PCDF (y PXDD y PXDF). Los resultados también demostraron que había contaminación cruzada ya que se utilizaban los mismos tanques para transportar diesel y gasolinas con y sin plomo. En un programa de prueba para determinar la emisión de PCDD y PCDF y bifenilos policlorados (PCB) de motores diesel de combustión interna, en algunas pruebas se detectó PCB en niveles de 3,6 hasta 8,0 pg EQT-OMS/L, cifras bajas en comparación con los niveles de dioxina (Dyke, 2005). Puede haber habido algún efecto no controlado debido al acondicionamiento insuficiente del motor, que habrá influido en las primeras pruebas.

2.2 Resumen de conclusiones

La documentación que ilustra los resultados de los estudios europeos, japoneses (ver también Miyabara *et al.*, 1999), coreanos y estadounidenses evidencia que:

- Las emisiones de PCDD y PCDF de vehículos que queman combustibles sin plomo son más bajas que las de vehículos que utilizan gasolina con plomo.
- Las emisiones más altas de vehículos que utilizan combustibles con plomo se deben a la presencia de aditivos de limpieza bromados que se agregan al combustible.
- Los automóviles equipados con catalizadores, que utilizan gasolina sin plomo, son los que tienen las emisiones más bajas.
- Las escasas pruebas realizadas muestran que los catalizadores de oxidación para vehículos de diesel son efectivos a la hora de reducir las emisiones de PCDD y PCDF.
- Los filtros de partículas para diesel logran reducir las emisiones de PCDD y PCDF de los vehículos que utilizan este combustible.
- Los vehículos que utilizan diesel tienen emisiones más bajas que los que usan gasolinas con plomo, y un poco más altas que los que utilizan gasolina sin plomo, equipados con convertidores catalíticos.
- El uso de lubricantes de motor bajos en cloro (en los experimentos con diesel) no generó emisiones de PCDD y PCDF más bajas.

No está clara la incidencia de la edad de los vehículos. Marklund *et al.* (1990) observaron emisiones más altas en vehículos más antiguos, mientras que el estudio alemán (Schwind *et al.*, 1991; Hutzinger *et al.*, 1992) no registró ninguna incidencia.

No existen datos de mediciones sobre los siguientes tipos de motores de vehículos:

- Motores de dos tiempos
- Motores que utilizan gas licuado de petróleo
- Motores que utilizan mezclas de alcohol y petróleo
- Motores que utilizan biocarburantes (colza, etc.)

3. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Entre las mejores técnicas disponibles para reducir las emisiones de PCDD y PCDF de los vehículos de motor podemos mencionar:

- Prohibición de los aditivos de limpieza halogenados
- Prohibición del uso de gasolina con plomo
- Instalación de catalizadores de oxidación para diesel, filtros de partículas y convertidores catalíticos
- Alternativas a los motores a gasolina (electricidad, luz solar y pilas de combustible)

Entre las mejores prácticas ambientales podemos mencionar:

- Fomentar medidas de prevención, como una mayor eficiencia del combustible. Promover formas de transporte alternativas, como la bicicleta, el tren u otros medios de transporte público.
- Separar los tanques de transporte según el combustible (por ejemplo, no transportar gasolina con plomo que contenga aditivos halogenados en tanques que se usen para el transporte de diesel o gasolina sin plomo).
- Prohibir el uso de gasolina con plomo.
- Promover el uso de vehículos de bajo consumo de combustible.
- Educar para determinar en qué condiciones de manejo se generan y liberan niveles más bajos de contaminantes.
- Mantener el vehículo en buen estado.

4. Normativas para reducir las emisiones de PCDD y PCDF

En Japón, la Ley de medidas especiales sobre dioxinas (promulgada en 1999) regula las concentraciones de emisiones de PCDD y PCDF de fuentes específicas, con exclusión de las emisiones de gases de los vehículos de motor. En cuanto al combustible de vehículos de motor, se logró obtener gasolina libre de plomo al 100% en la década de 1980, y se prohibieron las ventas de gasolina con plomo en virtud de la ley sobre plomo, benceno y sulfuro. En el área metropolitana de Tokio los vehículos diesel deben contar con filtros de partículas.

En Alemania, la normativa N°19 BImSchV prohíbe el uso de aditivos de limpieza halogenados en los vehículos de motor como medida para reducir las emisiones de PCDD y PCDF de los motores que usan gasolina con plomo como carburante (BImSchV, 1992).

Referencias

Ballschmiter K., Buchert H., Niemczyk R., Munder A. and Swerev M. 1986. "Automobile Exhausts versus Municipal Waste Incineration as Sources of the Polychlorodibenzodioxins (PCDD) and -furans (PCDF) found in the Environment." *Chemosphere* 15:901–915.

BlmSchV. 1992. *19. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes vom 24.07.1992 (Verordnung über Chlor- und Bromverbindungen als Kraftstoffzusatz - 19. BImSchV)*. Bundesgesetzblatt Teil 1, Jahrgang 1992, 75 (Ordinance on ban of halogenated scavengers, Germany).

DEH (Department of the Environment and Heritage, Australia). 2004. *Dioxins Emissions from Motor Vehicles in Australia*. Technical Report No. 2, National Dioxins Programme. Australian Government, Department of the Environment and Heritage.

Dyke P.H., Sutton M. 2005. "The Effect of Lubricating Oil on Diesel Engine PCDD/F and PCB Emissions." *Organohalogen Compd.* 67:2189–2191.

Dyke P.H., Sutton M., Wood D. 2006. Study on the effect of chlorine in lubricating oil on emissions of PCDD/F from a diesel engine. *Organohalogen Compd* 68.

Geueke K.-J., Gessner A., Quass U., Bröker G. and Hiester E. 1999. "PCDD/F Emissions from Heavy Duty Vehicle Diesel Engines." *Chemosphere* 38:2791–2806.

Government of Japan. 2003. *Inventory of PCDDs/DFs Emissions*. Government of Japan, Ministry of the Environment. www.env.go.jp/air/report/h15-05/index.html.

Gullett B. and Ryan J.V. 1997. "On-Road Sampling of Diesel Engine Emissions of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxin and Polychlorinated Dibenzofuran." *Organohalogen Compd.* 32:451–456.

Hagenmaier H. 1994. "Contributions of Diesel-Powered Vehicles and Wood Burning to Overall PCDD/PCDF Emissions." *Organohalogen Compd.* 20:267–270.

Hagenmaier H., Dawidowsky N., Weberuss U., Hutzinger O., Schwind K.-H., Thoma H., Essers U., Buhler B. and Greiner R. 1990. "Emission of Polyhalogenated Dibenzodioxins and Dibenzofurans from Combustion Engines." *Organohalogen Compd.* 2:329–334.

Hagenmaier H., Krauss P., Vatter J. and Walczok M. 1995. "Eintrag und Verbleib von PCDD/PCDF: Bedeutung der Einträge durch Automobilabgase und Holzfeuerungen." *Organohalogen Compd.* 22:49–54.

Hutzinger, O., Hagenmaier H., Essers U., Bessy E., Schwind K.-H., Thoma H., Dawidowsky N., Weberuss U., Betz U., Bühler U. and Greiner R. 1992. "Untersuchungen zur Emission halogenierter Dibenzodioxine und Dibenzofurane aus Verbrennungsmotoren beim Betrieb mit handelsüblichen Betriebsstoffen." GSF-Forschungszentrum, Munich, Germany.

Kim K.-S., Hong K.-H., Ko Y.-H., Yoon K.-D. and Kim M.-G. 2003. "Emission Characteristics of PCDD/Fs in Diesel Engine with Variable Load Rate." *Chemosphere* 53:601–607.

Larsen S., Brevik E.M. and Oehme M. 1990. "Emission Factors of PCDD and PCDF for Road Vehicles Obtained by Tunnel Experiment." *Organohalogen Compd.* 1:453-456.

Marklund S., Andersson R., Tysklind M., Rappe C., Egebäck K.E., Bjorkman E. and Grigoriadis V. 1990. "Emissions of PCDDs and PCDFs in Gasoline and Diesel Fueled Cars." *Chemosphere* 20:553–561.

Marklund S., Rappe C., Tysklind M. and Egebäck K. 1987. "Identification of Polychlorinated Dibenzofurans and Dioxins in Exhausts from Cars Run on Leaded Gasoline." *Chemosphere* 16:29–36.

Miyabara Y., Hashimoto S., Sagai M. and Morita M. 1999. "PCDDs and PCDFs in Vehicle Exhaust Particles in Japan." *Chemosphere* 39:143–150.

Oehme M., Larssen S. and Brevik E.M. 1991. "Emission Factors of PCDD/CDF for Road Vehicles Obtained by a Tunnel Experiment." *Chemosphere* 23:1699–1708.

Rappe C., Kjeller L.O., Bruckmann P. and Hackhe K.H. 1988. "Identification and Quantification of PCDD/CDFs in Urban Air." *Chemosphere* 17:3–20.

Wevers M., De Fre R. and Rymer T. 1992. "Dioxins and Dibenzofurans in Tunnel Air." *Organohalogen Compd.* 9:321–324.

Schwind K.-H., Thoma H., Hutzinger O., Dawidowsky N., Weberuss U., Hagenmaier H., Bühler U., Greiner R., Essers U. and Bessey E. 1991. "Emission halogenierter Dibenzodioxine (PXDD) und Dibenzofurane (PXDF) aus Verbrennungsmotoren beim Betrieb mit handelsüblichen Betriebsstoffen." *UWSF-Z Umweltchem. Oekotox* 3:291–298.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. Edition 2.1. UNEP, Geneva.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/13

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Destrucción de carcasas de animales



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.I

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

Categoría de fuentes (i) de la Parte III: Destrucción de carcasas de animales

Í N D I C E

VI.I	Destrucción de carcasas de animales	9
1.	Descripción del proceso	9
2.	Fuentes de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	11
2.1	Emisiones de contaminantes orgánicos persistentes por destrucción de carcasas de animales	11
2.2	Información general sobre emisiones de la destrucción de carcasas	11
3.	Procesos recomendados	13
3.1	Panorama de las opciones de eliminación	13
3.2	Mejores técnicas disponibles	15
3.3	Mejores prácticas ambientales.....	16
4.	Medidas primarias y secundarias	17
4.1	Medidas primarias.....	17
4.2	Medidas secundarias	19
5.	Resumen de medidas	20
6.	Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	23
	Referencias	23

Tablas

Tabla 1.	Brote de fiebre aftosa en el Reino Unido en 2001: eliminación de carcasas	12
Tabla 2.	Medidas para procesos recomendados para incineradores nuevos de carcasas de animales	20
Tabla 3.	Resumen de medidas primarias y secundarias para la destrucción de carcasas de animales	21

Ilustraciones

Figura 1.	Esquema del proceso tradicional de aprovechamiento de grasas continuo para la destrucción de carcasas.....	10
-----------	--	----

■ Resumen

La formación y emisión de PCDD, PCDF, PCB y HCB de incineradores de carcasas de animales se debe a la presencia de estos materiales clorados, precursores y cloro en las carcasas o en algunos plásticos que pueden co-incinerarse con las carcasas y subproductos. Algunas de las medidas que se pueden tomar para reducir la formación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes son evitar la co-incineración con otros desechos, mantener un mínimo de temperatura de 850°C en el horno, un tiempo de residencia de los gases de combustión de 2 segundos y suficiente exceso de aire para garantizar la combustión. Las instalaciones grandes (>50 kg/h) deberían contar con equipo de control de la contaminación atmosférica para reducir emisiones de bióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes. Los niveles de desempeño para PCDD/PCDF en emisiones atmosféricas asociados con mejores técnicas disponibles son de <0.1 ng EQT-I/Nm³.

Otros métodos de eliminación, por ejemplo, inhumación, vertido en rellenos o compostaje, no se consideran emisores significativos de las sustancias químicas del Anexo C, pero hay que tener en cuenta los aspectos ambientales, de salud pública y sanidad animal, así como inconvenientes varios. La digestión por hidrólisis alcalina es otra técnica de destrucción de carcasas de animales.

1. Descripción del proceso

En general, las carcasas de animales son destruidas por incineración, procedimientos para aprovechamiento de grasas o una combinación de ambos.

Entre las técnicas de incineración se encuentran la pirólisis, gasificación y otras formas de tratamiento por calor, y pueden implicar la combustión de carcasas completas o parte de ellas. El aprovechamiento de grasas abarca una serie de actividades de procesamiento de las carcasas a fin de recuperar materiales.

La legislación reciente en Europa (Reglamento 1774/2002/CE relativo a los subproductos animales) restringe el uso de los productos del aprovechamiento de grasas como alimento humano o pienso, respondiendo a inquietudes de salud pública y sanidad animal. En años recientes, la producción de subproductos de animales ha aumentado ya que la definición de lo que el mercado considera productos cárnicos apetecibles ha cambiado (la proporción del animal que se considera subproducto es cada vez mayor).

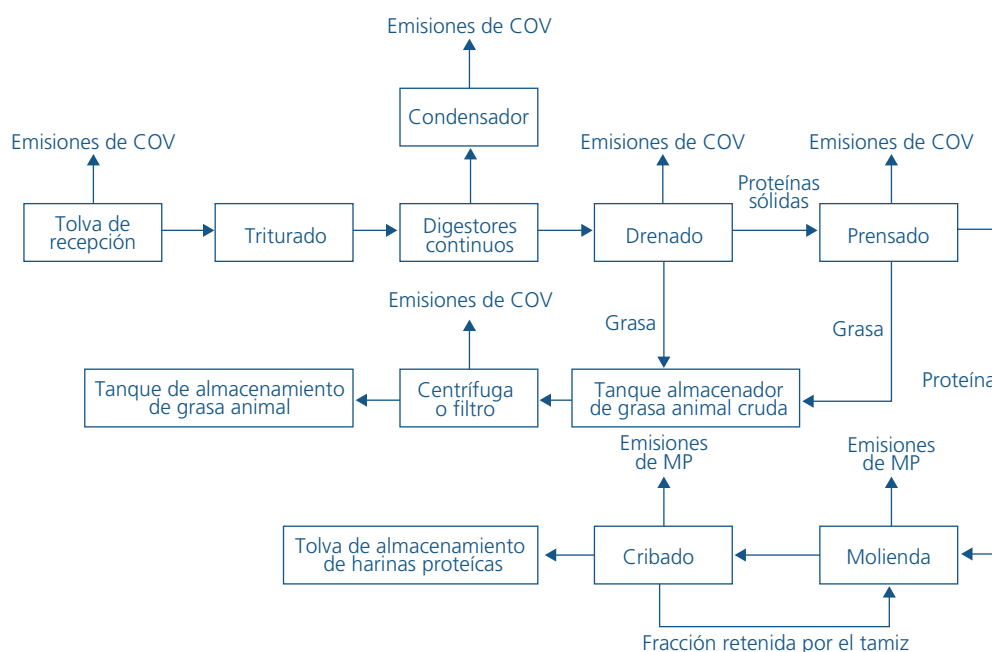
En los procesos de aprovechamiento de grasas se procesan cueros, piel, plumas, órganos, huesos, recortes, fluidos y grasa. En general, el proceso de aprovechamiento de grasas consiste en triturar y pulverizar los subproductos, sometiéndolos posteriormente a tratamiento con calor (Figura 1). Estas etapas implican hidrólisis a alta presión y alta temperatura, proceso de biogás por hidrólisis a alta presión, y producción y gasificación de biodiesel. La grasa fundida (sebo) se separa del material sólido por

centrifugación o prensado. La fracción sólida se muele, convirtiéndose en harinas de carne y hueso.

Las harinas de carne y hueso se habían utilizado tradicionalmente como suplemento alimenticio para animales pero en la Unión Europea su uso ha sido prohibido, y ahora este material se incinera en las plantas incineradoras pertinentes, o se entierra. Una opción de uso de las harinas de carne y hueso es como combustible alternativo en hornos cementeros (ver sección V.B de las presentes directrices).

El sebo se utiliza en una gran variedad de sectores industriales (incluido el alimentario), en particular en el sector oleoquímico, donde se refina para producir muy diversos productos. En la Unión Europea, el sebo proveniente de animales viejos y de otros materiales de riesgo especificados se trata por separado y no se utiliza para la producción de alimentos pues se considera como desecho. En cambio, puede utilizarse como combustible (en la Unión Europea, los procesos de combustión se rigen por una legislación más específica –la Directiva sobre Incineración de Desechos, Directiva CE 2000/76/CE).

■ **Figura 1. Esquema del proceso tradicional de aprovechamiento de grasas continuo para la destrucción de carcasas**



Fuente: EPA 1995.

La incineración de carcasas de animales se realiza con diferentes tipos de hornos. Los incineradores pequeños suelen tener una cámara de combustión sencilla sin agitación activa de la carcasa. Las plantas más grandes pueden emplear un horno giratorio que contribuye a agitar y romper la carcasa. Los hornos de solera móvil también sirven para agitar las carcasas. En general, es difícil quemar carcasas completas. La combustión en hornos es más controlable si se emplea un proceso de alimentación más uniforme, utilizando técnicas de maceración, molienda u otras.

2. Fuentes de las sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

2.1 Emisiones de contaminantes orgánicos persistentes por destrucción de carcasas de animales

La formación y emisión de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorobenceno (HCB) en incineradores de carcasas de animales se debe a la presencia de estos materiales¹, precursores o cloro en las carcasas o en algunos plásticos que pueden co-incinerarse con las carcasas. Se han realizado algunas mediciones de PCDD y PCDF en las plantas de incineración, pero los datos para PCB y HCB, si es que los hay, no son siempre uniformes. Por lo tanto, los niveles de emisiones de PCB y HCB son mucho más inciertos que las de emisiones de PCDD/PCDF de estas fuentes.

En general, los procesos de aprovechamiento de grasas se consideran fuentes improbables de contaminantes orgánicos persistentes. Sin embargo, estos materiales pueden concentrarse en los residuos de las carcasas y ser liberados durante los procesos posteriores (ej., combustión del material).

2.2 Información general sobre emisiones de la destrucción de carcasas

2.2.1 Incineración

Las emisiones al aire consisten en óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), material particulado, compuestos metálicos y PCDD/PCDF.

Las grandes incineradoras suelen tener equipos tecnificados de control de contaminación atmosférica (ej., filtros de tela, inyección de cal e inyección de carbón activado). Entre las unidades pequeñas se encuentran las incineradoras de subproductos de mataderos y de productos veterinarios, incineradoras en fincas ganaderas para la eliminación de ganado muerto y crematorios de mascotas. En ellas las medidas de control de contaminación pueden ser desde mínimas (cámara de combustión y chimenea) hasta sistemas razonablemente tecnificados, con cámaras de combustión secundarias, post-quemadores y filtros.

Otras vías de emisión, principalmente al suelo, son las cenizas y los residuos del control de contaminación atmosférica. Se consideran improbables las liberaciones significativas en agua.

2.2.2 Quema a cielo abierto

La quema a cielo abierto de carcasas de animales no es inusual. Sin embargo, es excepcional tener que quemar de una sola vez más de unas cuantas carcasas. En 2001, el gobierno del Reino Unido recurrió a la quema en masa como parte de las medidas para controlar un brote de fiebre aftosa pero no es probable que considere adecuada esta medida de ahora en adelante (Tabla 1).

■ **Tabla 1. Brote de fiebre aftosa en el Reino Unido en 2001: eliminación de carcasas**

Método de eliminación	Estadísticas provisionales
Quema (en finca ganadera)	>950 sitios
Inhumación (en finca ganadera)	900 sitios
Quema masiva	61,000 toneladas en 4 sitios
Depósito en rellenos comerciales	95,000 toneladas en 29 sitios
Aprovechamiento de grasas	131,000 toneladas en 7 plantas

Fuente: Anderson 2002.

Las emisiones de PCDD/PCDF en la atmósfera por las quemaduras relacionadas con el brote de fiebre aftosa de 2001 fue de aproximadamente 0.7 g, mientras que el total de emisiones en el Reino Unido fue de 314 g (sitio NAEI). Se construyeron especialmente las piras con durmientes de vía férrea que no habían sido tratadas con conservadores de madera a base de pentaclorofenol o lindano, con lo que se redujo la liberación de PCDD/PCDF. Los incineradores de cortina de aire constituyen una tecnología intermedia entre las piras y los incineradores pero no suelen ser instalaciones permanentes. Las instalaciones más grandes son fosas especialmente construidas a las que se incorpora una turbina de aire para facilitar la combustión y equipos para controlar el flujo del aire suministrado. Estas instalaciones ofrecen una mejor combustión que la quema a cielo abierto y se utilizan en la eliminación de animales a pequeña escala para controlar enfermedades. En la quema a cielo abierto y en fosas se debe tener en cuenta el potencial de deposición de cenizas en el suelo y de su liberación en aguas.

2.2.3 Emisiones del aprovechamiento de grasas

Los procesos de aprovechamiento de grasas implican el tratamiento de cuero, piel, plumas, órganos, huesos, recortes, fluidos y grasa. El proceso de aprovechamiento de grasas consiste en triturar y pulverizar los subproductos, sometiéndolos posteriormente a tratamiento con calor. La grasa fundida (sebo) se separa del material sólido por centrifugación o prensado. La fracción sólida se muele, convirtiéndose en harinas de carne y hueso.

Por lo general, las emisiones provenientes de los procesos de combustión asociados al aprovechamiento de grasas (ej., hornos que generan vapor para tratamiento por calor) no contienen contaminantes orgánicos persistentes, pero varias de estas actividades pueden despedir malos olores y emitir compuestos orgánicos volátiles.

La quema de harinas de carne y hueso puede emitir contaminantes orgánicos persistentes. En la Unión Europea, las harinas de carne y hueso son incineradas en plantas apropiadas de incineración o co-incineración, o son enterradas.

2.2.4 Emisiones de PCDD/PCDF al aire

Para información general sobre los mecanismos de formación de PCDD y PCDF véase la sección III.C (i) de estas directrices.

A título de ejemplo, en el Reino Unido los incineradores nuevos de carcasas de animales deben lograr concentraciones de emisiones de PCDD/PCDF inferiores a 0.1 ng EQT-I/m³ normalizado a 11% de oxígeno, presión y temperatura secas y estándar (0°C, 101.3 kPa).² Para los nuevos incineradores de pequeña capacidad (promedio <50 kg/h) no se han establecido límites de emisión pero deben operar con un sistema de homologación. Para lograr esta homologación, la reglamentación dispone que el fabricante del incinerador demuestre que las máquinas operan a una temperatura mínima de 850°C y un tiempo de residencia de 2 segundos. Cabe señalar que los modelos que tienen incorporada una cámara secundaria de combustión con post-quemadores probablemente reúnan estos requisitos.

En el Reino Unido, el Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) emprendió un estudio sobre las emisiones de incineradores de capacidad pequeña existentes antes de la introducción del nuevo reglamento que arrojó concentraciones promedio de PCDD/PCDF de 0.05–0.40 ng EQT-I/Nm³ (AEA Technology 2002). El monitoreo de las liberaciones al aire de dos unidades de cremación de animales en fincas ganaderas de carácter comercial en Ontario, Canadá, arrojó concentraciones promedio de PCDD/PCDF en un rango aproximado de 0.0006 a 0.0044 ng EQT-I/Sm³ (Environment Canada 2004).

Cabe señalar que en varios países la incineración a pequeña escala en fincas ganaderas está prohibida.

2.2.5 Liberaciones hacia otros medios

Los fluidos corporales, sólidos suspendidos, grasas y aceites pueden contaminar las aguas del proceso, superficiales y de enfriamiento. Las carcasas, cenizas y otros subproductos se eliminan en el suelo. Se considera que los productos de desecho depositados adecuadamente en rellenos sanitarios no implican grandes riesgos de exposición para la población; la vía principal de exposición son las emisiones en el aire.

3. Procesos recomendados

3.1 Panorama de las opciones de eliminación

Algunos países han adoptado como política la no inhumación de animales y sus subproductos. En algunos se han adoptado instalaciones centralizadas de gran capacidad para la eliminación de carcasas; los hay que han prohibido la incineración de carcasas de animales en fincas ganaderas. Otros países cuentan con una combinación de instalaciones grandes, pequeñas (por ejemplo, incineradores en fincas ganaderas) y rellenos sanitarios. En varios se emplea la digestión por hidrólisis alcalina, un método para la eliminación de carcasas que no implica incineración, como por ejemplo las fosas de cal. La digestión anaeróbica es otro método de eliminación de algunos restos de

animales que no implica incineración. Sin embargo, estos métodos exigen una gestión cuidadosa de la eliminación de los residuos a fin de evitar la propagación de enfermedades. Una reseña reciente de la Kansas State University contiene información detallada sobre la digestión anaeróbica (Erickson *et al.* 2004).

La descarga en rellenos sanitarios no elimina los contaminantes orgánicos persistentes que puedan estar presentes en las carcasas, pero puede evitar la exposición de seres humanos a ellos.

El método adoptado por cada país debe reflejar la naturaleza y circunstancias específicas de la producción de alimentos, funcionamiento de mataderos y actividades de aprovechamiento de grasas (incluidas la infraestructura y las limitaciones y prácticas culturales). Por ejemplo, las instalaciones de incineración centralizadas de gran escala requieren una compleja infraestructura de transporte para reducir el riesgo de infección por el desplazamiento de material potencialmente infectado, así como una estructura de precios capaz de mantener ese tipo de instalaciones.

En la destrucción de carcasas de animales, la fuente principal de emisiones de las sustancias químicas del Anexo C es la incineración de carcasas y subproductos de animales (incluso los subproductos derivados de los procesos de aprovechamiento de grasas). Por lo tanto, las instalaciones de combustión de carcasas y de residuos de aprovechamiento de grasas deberían estar construidas para operar a un mínimo de temperatura de 850°C, un tiempo de residencia de 2 segundos de los gases de combustión y suficiente exceso de aire que garantice la combustión. Los modelos que no cumplan con estos criterios no deberían ser empleados, a menos que demuestren que pueden operar sin emitir cantidades importantes de contaminantes orgánicos persistentes.

Las grandes instalaciones, como las que pueden estar reguladas por la Directiva sobre prevención y control integrados de la contaminación de la Unión Europea, o la legislación equivalente sobre prevención de la contaminación en otros países, pueden estar, además, sujetas a importantes requisitos de control de la contaminación atmosférica para cumplir con las disposiciones referentes a otros contaminantes, como por ejemplo, reducción selectiva no catalítica para el control del NO_x, inyección de cal para controlar gases ácidos (SO₂ y HCl), inyección de carbono para controlar mercurio y PCDD/PCDF y filtros de tela para controlar material particulado.

Es poco probable que las unidades pequeñas de incineración tengan efectos importantes, a escala nacional o local, en la calidad del aire. Cuando así sea, será conveniente adoptar los requisitos relativos al mínimo de temperatura del horno y tiempo de residencia para controlar las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes.

3.2 Mejores técnicas disponibles

Se considera que las mejores técnicas disponibles abarcan aspectos de tecnología, gestión y parámetros de operación. El control de las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes comprendería las siguientes medidas:

- Horno de combustión que cumpla con los requisitos mínimos de temperatura, tiempo de residencia y oxígeno, y que demuestre su cumplimiento.
- Equipo adecuado para el control de contaminación atmosférica, incluida la gestión de la temperatura para controlar el tiempo de residencia en la ventana de reformación, inyección de carbono y filtros de tela o su equivalente.
- Diseño del sistema de alimentación de desechos para reducir al mínimo los efectos de nuevas cargas de desechos (la carga debería ser macerada y transportada al horno con un sistema hermético).
- Las cámaras de combustión y los revestimientos deberían ser lo más herméticos posible y operar a presiones reducidas para disminuir al mínimo la liberación de gases de combustión.
- Se deberían monitorear las temperaturas de los gases para que los sistemas de control se ciñan a los criterios de temperatura mínima (apoyándose en el empleo de quemadores de combustible auxiliar) y prever un sistema de bloqueo de seguridad para detener la carga cuando la temperatura caiga por debajo del mínimo establecido.
- Se deberían monitorear los niveles de oxígeno y monóxido de carbono de los gases de combustión y vincularlos al sistema de control para garantizar el control adecuado de suministros de aire y resolver los problemas de combustión.
- Los combustibles auxiliares no deberían proceder de desechos, a menos que se compruebe que emiten menos contaminantes orgánicos persistentes que los gases, el aceite u otro combustible limpio.
- Las áreas pavimentadas designadas deben contar con drenaje apropiado para la carga, descarga y lavado de contenedores, que faciliten las tareas de limpieza y desinfección. Considerar la necesidad de incinerar los residuos del lavado para el control de patógenos.
- Mecanización de la carga y manipulación de materiales de desecho para reducir la exposición de los operarios.
- Las pequeñas instalaciones de incineración deberían situarse (cuando estén autorizadas a operar) sobre una losa de hormigón, por lo menos a 100 metros de distancia de cualquier pozo, manantial, o corriente de agua. Asimismo, estas instalaciones deberían localizarse por lo menos a 6 metros de distancia de cualquier edificación o estructura inflamable.
- Las instalaciones de almacenamiento de desechos deberán tener sistemas de refrigeración, estar bajo llave, tener sistemas de control de olores y ser a prueba de roedores y aves.

- Reducir al mínimo el uso de bolsas de plástico para los desechos; considerar el uso de cajones que impiden el contacto con los restos de animales.
- La recuperación de cenizas se realizará en transportadores sellados, cajones cubiertos, y contenedores sellados para evitar las liberaciones fugitivas de polvo (sobre todo de residuos de control de la contaminación atmosférica). Las cenizas se depositarán en los rellenos sanitarios apropiados.
- Gestión del ingreso de desechos y mantenimiento de registros.
- Control efectivo de las operaciones, inspección y mantenimiento preventivo de componentes que, en caso de avería, podrían liberar contaminantes orgánicos persistentes, afectando así el medioambiente.
- Identificar las competencias que deben poseer los operadores y proporcionar la capacitación necesaria.
- Aplicación de valores límite de emisión y vigilancia de emisiones para demostrar el cumplimiento de los requisitos.
- Depósito de cenizas y residuos en rellenos sanitarios.

No se han considerado mejores técnicas disponibles para otros contaminantes y hay que reconocer que en cada planta habrá otros factores que incidirán en la definición de mejores técnicas disponibles (ej., uso de agua y energía).

3.3 Mejores prácticas ambientales

Si se va a recurrir a la incineración, los países deberían, en primer lugar, procurar implantar instalaciones de incineración de carcasas y subproductos de animales que puedan cumplir con los criterios mínimos de temperatura, tiempo de residencia y oxígeno. Cabe señalar que quizás sea necesario instalar equipos de control de contaminación atmosférica para cumplir con la reglamentación local sobre emisiones y calidad del aire respecto de otros contaminantes, además de los orgánicos persistentes.

Cuando se instalan equipos de recuperación de calor y de control de contaminación atmosférica, su diseño debe evitar el riesgo de formación *de novo* de PCDD/PCDF, reduciendo al mínimo el tiempo de residencia del material en la ventana de temperatura de reformación. Al entrar en operación se deberían realizar mediciones para demostrar que las emisiones de estas instalaciones no contienen contaminantes orgánicos persistentes.

Se deberían examinar las instalaciones de co-incineración de materiales de desecho (por ejemplo sebo o harinas de carne y hueso en hornos de cemento) para asegurarse de que pueden responder a los criterios mínimos de temperatura del horno, tiempo de residencia y oxígeno, y se deberían efectuar monitoreos de emisiones para determinar si se cumplen los límites de emisión. Las emisiones derivadas de la co-incineración de desechos animales no deberían ser más contaminantes que las derivadas del proceso cuando no se incineran desechos.

En las instalaciones de incineración muy pequeñas (<50 kg/h), las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes pueden ser controladas utilizando hornos que

demuestren (quizás, por ejemplo, por un sistema de homologación) que funcionan respetando los criterios mínimos de temperatura del horno y tiempo de residencia. Además, su funcionamiento no debería producir vapores y los procedimientos de carga y operación y los sistemas se pueden interrumpir para asegurarse de que el material no se incinere hasta que la cámara secundaria alcance la temperatura mínima requerida. En estos casos no parece justificarse el gasto que implica la medición de emisiones.

El uso de piras no debería considerarse mejor práctica ambiental. Si se utilizan, hay que evitar los combustibles como madera tratada u otros que contengan materiales susceptibles de liberar contaminantes orgánicos persistentes. Unos pocos datos de mediciones (Sinclair Knight Merz 2005) indican que los incineradores de cortina de aire pueden generar emisiones por carcasa similares a las de los incineradores pequeños pero la cantidad total de combustible y carcasas (y, por ende, de emisiones potenciales) de aquéllos es mucho más elevada que la de éstos. Su uso no debería considerarse como mejor práctica ambiental, salvo, quizás, como parte de una estrategia de control de alguna enfermedad específica.

El uso de técnicas de digestión y de rellenos sanitarios construidos y gestionados de manera adecuada constituye una alternativa a la incineración.

4. Medidas primarias y secundarias

4.1 Medidas primarias

Las medidas primarias se consideran técnicas de prevención de la contaminación que reducen o eliminan la generación y liberación de contaminantes orgánicos persistentes. A continuación se exponen algunas de ellas.

4.1.1 Diseño del horno

Las condiciones del horno deberían permitir una temperatura mínima de 850°C constante durante la carga, incineración y descarga de las carcasas con un tiempo de residencia de los gases de 2 segundos y suficiente oxígeno que garantice la destrucción de todo contaminante residual.

Para cumplir estos criterios, se requerirá una cámara de combustión secundaria con post-quemadores o inyección de aire. Se debería procurar que la cámara secundaria tenga las dimensiones adecuadas y el volumen requerido (volumen de los gases después de la última inyección de combustible o de aire de combustión y con una temperatura mínima de 850°C en todo el volumen).

Lo ideal es que el horno esté diseñado para permitir una operación continua (es decir, con alimentación automática continua del horno y eliminación de cenizas automática) pues esto reducirá al mínimo las perturbaciones en el proceso, que pueden provocar la emisión de contaminantes orgánicos persistentes. Una operación continua requiere la maceración de los materiales sólidos para garantizar una alimentación homogénea. Es cierto que, en el caso de unidades pequeñas y unidades que reciben carcasas completas,

la operación continua quizás no sea conveniente. El diseño del horno debe facilitar la buena combustión del material (bajo contenido de carbono en cenizas).

Cuando se plantea la co-incineración, se deberían adoptar los mismos criterios de temperatura del horno y tiempo de residencia.

4.1.2 Material de alimentación

Se debería evitar la presencia de plásticos y otros contaminantes (en especial compuestos de cloro) en la carga, a fin de reducir la generación de contaminantes orgánicos persistentes por combustión incompleta o síntesis *de novo*. Es cierto que, por razones sanitarias, es preciso usar bolsas de plástico y materiales similares, pero deberían reemplazarse por sistemas de alimentación mecanizados y automatizados.

Hay que tener presente que puede ser necesario clasificar las carcasas y subproductos según la fuente (por ejemplo, material de riesgo específico).

Éstos son algunos métodos que pueden considerarse:

- Uso de cargadores mecánicos para evitar el contacto con las carcasas.
- Uso de técnicas de maceración y trituración que permitan la carga y operación continua y automática.
- Reducción de la contaminación ocasionada por envolturas, incluido el uso de plásticos no halogenados.

4.1.3 Combustibles

Se recomienda utilizar combustibles limpios para el arranque, quemadores auxiliares y post-quemadores. Las grandes instalaciones deberían procurar una combustión autosuficiente en el horno para reducir al mínimo el uso de combustibles. Se procurará reducir el empleo de combustibles provenientes de desechos u otros combustibles potencialmente contaminados con contaminantes orgánicos persistentes y estos materiales no se deben utilizar durante el encendido o en alteraciones del proceso, cuando las temperaturas son inferiores a 850°C y las condiciones pueden ser inestables

4.1.4 Control efectivo del proceso

Se deberían emplear sistemas de control del proceso para mantener su estabilidad y operar dentro de los niveles de referencia que contribuyen a reducir al mínimo la generación de contaminantes orgánicos persistentes, como por ejemplo, mantener una temperatura mínima del horno de 850°C para destruir estos contaminantes. Lo ideal sería monitorear continuamente las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes para asegurarse de reducir las liberaciones. Se deberían monitorear constantemente variables como temperatura, tiempo de residencia y niveles de CO, compuestos orgánicos volátiles y otros componentes gaseosos y deberían mantenerse a fin de establecer condiciones óptimas de funcionamiento.

4.1.5 Competencia de los operadores

La gestión de las instalaciones es la clave para garantizar una operación segura y ambientalmente adecuada. Todo el personal que trabaja en las instalaciones debería estar plenamente familiarizado con las tareas asignadas, en particular respecto al funcionamiento habitual, mantenimiento, control de enfermedades, condiciones de rearranque del proceso y legislación ambiental local. Los operadores deberían adquirir la competencia requerida mediante una capacitación adecuada, a un nivel acorde a las instalaciones.

4.2 Medidas secundarias

Las medidas secundarias son técnicas de control de la contaminación. Estos métodos no impiden la generación de contaminantes pero constituyen una forma de contener y prevenir las emisiones.

4.2.1 Recolección de vapores y gases

Se deberían controlar las emisiones atmosféricas en todas las fases del proceso, particularmente en el manejo de material, en los puntos de combustión y transferencia del material, a fin de controlar la emisión de contaminantes orgánicos persistentes. Los hornos sellados son esenciales para retener las emisiones fugitivas y al mismo tiempo permitir la recuperación de calor y la recolección de gases residuales para eliminación o descarga. Un diseño adecuado de los sistemas de extracción y de los ductos es fundamental para reducir al mínimo las descargas. Se pueden utilizar cajones sellados o sistemas de alimentación cerrados, que pueden reducir considerablemente las emisiones fugitivas al aire pues retienen las emisiones durante la carga.

4.2.2 Equipo de control de contaminación atmosférica

Las instalaciones grandes deberían utilizar equipos de control de contaminación atmosférica para controlar todas las emisiones importantes hacia la atmósfera. Una cuidadosa selección, diseño y uso del equipo de control de contaminación atmosférica para otros contaminantes también ayudará, en general, a reducir las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes. El diseño debe tener en cuenta el potencial de formación *de novo* de ciertos contaminantes orgánicos persistentes y reducir al mínimo tal potencial. El material particulado debería eliminarse a fin de reducir las emisiones de PCDD/PCDF en la atmósfera (aunque sean descargadas en rellenos). Los filtros de tela son un método efectivo pero se trata de sistemas que funcionan a bajas temperaturas (hasta 200°C).

En el caso de procesos en plantas pequeñas, el uso de post-quemadores puede bastar para controlar la emisión de contaminantes orgánicos persistentes, y la eliminación de material particulado se considera innecesaria.

Las operaciones de control de contaminación atmosférica deberían ser monitoreadas constantemente con dispositivos que detecten averías. Los métodos de limpieza en línea y el uso de recubrimientos catalíticos para destruir PCDD/PCDF son otras opciones.

Se debería considerar el tratamiento con carbón activado para eliminar contaminantes orgánicos persistentes en gases de salida. El carbón activado posee una gran área superficial en la que se pueden adsorber los PCDD/PCDF. Los gases de salida pueden ser tratados con carbón activado empleando reactores de lecho fijo o móvil, o inyectando carbón activado pulverizado en la corriente de gases y, posteriormente, eliminándolos con sistemas de eliminación de polvo de alta eficiencia como los filtros de tela.

5. Resumen de medidas

Las tablas 2 y 3 presentan un resumen de las medidas analizadas anteriormente.

■ **Tabla 2. Medidas para procesos recomendados para incineradores nuevos de carcasas de animales**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos recomendados	Incineradores grandes (>50 kg/h) y co-incineradores.	Mínimo 850°C, tiempo de residencia de 2 segundos en volumen requerido con suficiente aire para garantizar la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes. Instalar equipo de control de contaminación atmosférica para reducir las emisiones de SO ₂ , HCl, CO, compuestos orgánicos volátiles, material particulado y contaminantes orgánicos persistentes.	Se consideran mejores técnicas disponibles. También deberían contar con sistemas de gestión y demostrar que las instalaciones cumplen con los valores límite de emisión, así como monitorear constantemente las emisiones para garantizar su cumplimiento.
	Incineradores pequeños (<50 kg/h).	Mínimo 850°C, tiempo de residencia de 2 segundos en volumen requerido con suficiente aire que garantice la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes.	Para las plantas más pequeñas, estas condiciones deberían ser las mínimas para el problema de los contaminantes orgánicos persistentes. Se pueden adoptar utilizando un sistema de homologación e inspección de la gestión de la planta (en lugar de las costosas pruebas de emisiones).

■ **Tabla 3. Resumen de medidas primarias y secundarias para la destrucción de carcasas de animales**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas primarias			
Diseño del horno			Ideal para potenciar la destrucción de contaminantes orgánicos persistentes y reducir al mínimo su formación.
Control del material de alimentación	La presencia de plásticos y compuestos clorados en el material de alimentación debería reducirse a un nivel compatible con una buena higiene y así reducir la generación de contaminantes orgánicos persistentes por combustión incompleta o síntesis <i>de novo</i> .	Eliminar el uso de plásticos, utilizar manipulación mecánica.	Tecnología relativamente sencilla.
Combustibles	Combustibles auxiliares limpios.		
Control efectivo del proceso	Se deberían utilizar sistemas de control del proceso para mantener la estabilidad del mismo y operar dentro de los niveles de referencia que contribuyan a reducir las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes.	Se deberían reducir al mínimo las emisiones de PCDD/PCDF controlando otras variables como temperatura, tiempo de residencia, componentes gaseosos.	La temperatura mínima es un parámetro de control elemental. El monitoreo constante del oxígeno, CO y compuestos orgánicos volátiles es más complejo pero preciso. Sin embargo, lo principal es mantener un sistema de control que pueda utilizar datos en tiempo real que permitan controlar los reguladores del suministro de aire para la combustión y quemadores auxiliares, entre otros elementos.

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Medidas secundarias			
Recolección de vapores y gases	Retención efectiva de gases de combustión en todas las etapas del proceso de incineración para evitar liberaciones fugitivas.	Considerar los hornos sellados para retener las emisiones fugitivas y al mismo tiempo permitir la recuperación de calor y la recolección de gases residuales.	
Equipo de control de contaminación atmosférica	<p>La eliminación del material particulado ayudará a reducir el potencial de emisión de contaminantes orgánicos persistentes.</p> <p>Se debería considerar el tratamiento con carbón activado pues este material tiene una gran área superficial en la que pueden ser adsorbidos los PCDD/PCDF de los gases residuales.</p>	<p>Los filtros de tela son la técnica más efectiva de eliminación de material particulado y son compatibles con el uso de sorbentes secos y semihúmedos para el control de gases ácidos y metales. Sin embargo, exige una reducción de temperatura.</p> <p>Inyección de carbón activado pulverizado en la corriente de los gases seguida de la eliminación como polvo de filtro.</p>	<p>El uso de dispositivos de control de contaminación atmosférica genera corrientes de desechos adicionales y requiere el uso de consumibles. Posiblemente requerirá reducción de la temperatura de los gases de combustión (para evitar el uso de medios de filtración más exóticos), por consiguiente, se debe procurar reducir la permanencia en el la ventana de reformación.</p> <p>Es mejor evitar la formación de los contaminantes orgánicos persistentes en el horno. Sin embargo, este método proporciona cierto respaldo en casos de falla del proceso, y en Europa se considera una mejor técnica disponible para procesos de incineración. El costo de compra y operación de la mayor parte de los equipos de control de contaminación atmosférica es elevado, y los repuestos son costosos.</p>

6. Niveles de desempeño asociados a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Los niveles de desempeño para emisiones de PCDD/PCDF en el aire asociados a mejores técnicas disponibles son de <0.1 ng EQT-I/Nm³ con 11 % de oxígeno, temperatura y presión secas y estándar (0°C 101.3 kPa). Para más información, véase European Commission (2003).

Referencias

- AEA Technology. 2002. *Atmospheric Emissions from Small Carcass Incinerators*. Report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs, United Kingdom.
- Anderson I. 2002. *Foot and Mouth Disease 2001: Lessons to be Learnt Inquiry Report*. Stationery Office, London.
- Environment Canada. 2004. *Characterization of emissions from an animal crematorium Burn easy Model 37-1 and EcoWaste CleanAire*. ERMD 2003-04 Unpublished reports. March 2004
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 1995. *Meat Rendering Plants*. Emission Factor Documentation for Background Report AP-42, Section 9.5.3. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Emission Factor and Inventory Group, Washington, D.C.
- Erickson L. Fayet E. Kakumau B. Davis (2004) *Carcass Disposal: A Comprehensive Review*, National Agricultural Biosecurity Centre, Kansas State University, Chapter Seven - Anaerobic digestion.
- European Commission. 2003. *Reference Document on Best Available Techniques in the Slaughterhouses and Animal By-products Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. Eippcb.jrc.es.
- NAEI (National Atmospheric Emissions Inventory). *Emission Factors Database*. DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs). www.naei.org.uk/emissions/index.php.
- Sinclair Knight Merz. 2005. *Air Curtain Incinerator Trial Report*. Report for New Zealand Ministry of Agriculture and Forestry.

Notas

-
- ¹ Los contaminantes orgánicos persistentes depositados en zonas de pastoreo o presentes en piensos pueden ser ingeridos por los animales y acumularse en ellos a lo largo de su vida.
- ² 1 ng (nanogramo) = 1 × 10⁻¹² kilogramo (1 × 10⁻⁹ gramo). Más información sobre mediciones de toxicidad en la sección I.C, subsección 3, de las presentes directrices.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/14

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Teñido (con cloranil) y terminado
(con extracción alcalina)
de textiles y cueros



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.J

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

**Categoría de fuentes (j) de la Parte III:
Teñido (con cloranil) y terminado (con extracción alcalina)
de textiles y cueros**

VI.J	Teñido (con cloranil) y terminado (con extracción alcalina) de textiles y cueros	9
1.	Industria textil.....	9
1.1	Introducción.....	9
1.2	Descripción del proceso	10
1.3	Fuentes de sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	10
2.	Acabado de cueros.....	12
2.1	Introducción.....	12
2.2	Descripción del proceso	13
2.3	Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo.....	13
3.	Concentraciones de PCDD/PCDF en productos químicos empleados en las cadenas de producción de textiles y cueros	13
4.	Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales.....	14
5.	Alternativas	15
6.	Monitoreo	15
	Referencias	16
Tablas		
Tabla 1.	Concentraciones de PCDD/PCDF en biocidas y pigmentos o tintes para teñido	14

■ Resumen

Se ha encontrado contaminación con PCDD y PCDF tanto en productos textiles como en cueros. La presencia de PCDD/PCDF en las industrias textiles y del cuero se debe al uso de sustancias químicas cloradas, concretamente pentaclorofenol y cloronitrofen, para proteger las materias primas (algodón, lana y otras fibras, cuero), y al uso de tintes contaminados con dioxinas (dioxacinas o ftalocianinas). Se pueden formar cantidades más pequeñas de PCDD/PCDF en el acabado y durante la incineración de lodos generados durante el proceso.

Existen alternativas a los pigmentos de tinte mencionados, por lo que no deberían aplicarse.

Algunas alternativas posibles al pentaclorofenol y cloronitrofen: 2-(tiocianometil) benzotiazole (TCMTB); *o*-fenilfenol (oPP); 4-cloro-3-metilfenol (CMK); y 2-*n*-octil-4-isotiazolin-3-ona (OIT).

En lo referente a mejores técnicas disponibles, la medida primordial más eficiente para evitar la contaminación de productos textiles y cueros con PCDD/PCDF sería no emplear biocidas y tintes contaminados con dioxinas en las cadenas de producción. Asimismo, si se emplean estas sustancias, debe darse preferencia a los lotes que tengan concentraciones bajas (sustancias destiladas o purificadas de alguna otra forma). En lo posible, debería evitarse la quema de materiales textiles, de tapicería, cueros y alfombras para impedir la formación de PCDD/PCDF.

A fin de evitar o reducir la formación y emisión de PCDD/PCDF en la incineración de lodos del tratamiento de aguas residuales y producto de la flotación, deberían aplicarse las mejores técnicas disponibles que se describen en la sección VI.D de esta guía (calderas industriales). No obstante, deberían asimismo considerarse otras técnicas respetuosas del medio ambiente.

1. Industria textil

1.1 Introducción

La industria textil presenta una de las cadenas de manufactura más complejas. Se trata de un sector fragmentado y heterogéneo, en el que predominan las empresas pequeñas y medianas; por ejemplo, en la Unión Europea, en el año 2000, 114,000 empresas daban empleo a unos 2.2 millones de personas (European Commission 2003b). La demanda viene impulsada sobre todo por tres usos finales, a saber, vestido, textiles para el hogar y textiles para la industria.

La cadena del textil y el vestido está compuesta por muchos subsectores que abarcan todo el ciclo de producción, desde la producción de las materias primas (fibras

artificiales), pasando por los productos semiprocesados (hilos, tejidos planos y de punto, con sus respectivos procesos de acabado), hasta los productos finales o de consumo directo (alfombras, textiles para el hogar, vestido y textiles para uso industrial).

1.2 Descripción del proceso

Para que los tejidos planos y de punto se conviertan en productos terminados, las telas deben pasar por varias etapas de procesamiento en húmedo a base de mucha agua (conocido como acabado), como son la preparación de las telas, teñido, estampado y acabado propiamente dicho. Las fibras naturales necesitan más pasos de procesamiento que las fibras artificiales. Se generan volúmenes de aguas residuales relativamente importantes, que contienen muy diversos contaminantes que deben ser tratados antes de ser desechados. Se utilizan cantidades significativas de energía para calentar y enfriar los baños químicos, y para el secado de telas e hilos.

La preparación de las telas requiere desengomado, desengrasado y blanqueado, así como gaseado y mercerizado. Las operaciones de teñido se efectúan en distintas etapas de la producción para agregar color y complejidad a las telas e incrementar el valor del producto. Los tintes empleados por la industria textil son sobre todo sintéticos. El acabado abarca los tratamientos químicos o mecánicos (EPA 1997).

Las principales preocupaciones ambientales en la industria textil son las cantidades de agua descargadas y su correspondiente contenido de sustancias químicas. Otros problemas importantes son el consumo de energía, las emisiones al aire, residuos sólidos y olores.

Si bien son muchos los pasos en la cadena de producción, y existen preocupaciones ambientales, no se ha podido asociar la generación de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) con uno u otro paso de la producción.

En cambio, hay que prestar más atención al hecho de que los PCDD/PCDF entran en el proceso de producción textil por medio de la aplicación de plaguicidas y tintes contaminados con PCDD/PCDF, y que esta contaminación con PCDD/PCDF se propaga a lo largo de las distintas etapas de la cadena de producción. Según sean las etapas, los solventes aplicados y el entorno físico, los PCDD/PCDF permanecen en el producto final o se descargan en los desechos.

1.3 Fuentes de sustancias que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

En la cadena de producción textil, los procesos de acabado no son propiamente fuentes de formación de PCDD/PCDF (Horstmann *et al.* 1993). Es más bien el uso de tintes y pigmentos con PCDD/PCDF, y el uso, en algunos países, de fungicidas contaminados con PCDD/PCDF para el tratamiento de materias primas no acabadas, como el algodón, lo que parecen constituir las fuentes de los PCDD/PCDF detectados.

Puede haber nueva formación de PCDD/PCDF en la producción textil cuando se tratan los efluentes y se retiran e incineran los lodos. Estas plantas se consideran propiamente modernas.

Así, pues, las medidas consideradas como mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales tendrán como finalidad:

- La contaminación con PCDD/PCDF por la introducción de sustancias contaminadas con dioxinas en la cadena de producción textil.
- La nueva formación de PCDD/PCDF en las operaciones de eliminación térmica de desechos propios de la producción.

1.3.1 Contaminación con PCDD/PCDF por medio de materiales contaminados con dioxinas

Las sustancias cuya contaminación con PCDD/PCDF es conocida se emplean en las siguientes aplicaciones y su contenido es el siguiente: (European Commission 2003b):

- Defoliantes o fungicidas: Pentaclorofenol y 2,4,6-triclorofenil-4'-nitrofenil éter¹ (cloronitrofen)
- Tintes: de dioxazina a base de cloranil y de ftalocianina

Los resultados del análisis de textiles de diversos orígenes y fibras proporcionan firmes indicios de que se ha usado y quizás se siga usando el pentaclorofenol como biocida en materias primas, sobre todo en el algodón. El patrón de PCDD/PCDF revela claramente que el pentaclorofenol es la fuente principal de PCDD/PCDF en los textiles.

Si bien no se ha encontrado información publicada que lo confirme, no puede descartarse el uso de cloronitrofen en la industria textil, ya que ha reemplazado al pentaclorofenol en muchas aplicaciones (Masunaga, Takasuga and Nakanishi 2001; UNEP 2003).

1.3.2 Formación de PCDD/PCDF en operaciones de eliminación térmica

Hay varios pasos en la cadena de producción de textiles en los que las aguas residuales o efluentes generan lodos que son incinerados: por ejemplo, los efluentes evaporados en el proceso de gaseado de la lana, o las aguas residuales que contienen cola de estampado o látex de la base para alfombras. Al igual que en cualquier proceso de incineración, se puede formar PCDD/PCDF ya que estos lodos llevan contenidos relativamente grandes de cloro, así como de cloro orgánicamente ligado proveniente de los ectoparasiticidas como el g-hexaclorocicloexano (g-HCH, lindano), dieldrina o DDT que se han aplicado a las materias primas (lana, sobre todo) (European Commission 2003b; UNEP 2003).

En cuanto a la probabilidad del uso de lindano, dieldrina y DDT, todos los principales países ovinos han prohibido el uso de plaguicidas organoclorados para el tratamiento de ovejas, pero hay evidencias de que la lana de algunos países de la ex-Unión Soviética y Sudamérica contiene lindano en concentraciones detectables (European Commission 2003b).

Finalmente, los retardantes de llama polibromados, como los difenil éteres polibromados y parafinas cloradas (C₁₀₋₁₃ cloroparafinas) se emplean también en la industria textil. Todos los retardantes de llama halogenados intervienen en la formación de PCDD/PCDF cuando se incineran (European Commission 2003b).

Si el circuito de eliminación de polvo y recuperación de grasas se combina con evaporación de efluentes e incineración del lodo, con reciclaje completo del agua y la energía, se logran otras ventajas ambientales, tanto en término de ahorro de agua como de reducción del volumen de sólidos que habrá que eliminar. La temperatura del incinerador sería de aproximadamente 1200°C para poder destruir PCDD/PCDF. Las cenizas volantes se eliminarían en un filtro de manga. En las emisiones gaseosas de esta planta de circuito integrado de eliminación de polvo y recuperación de grasas se detectaron 0.02 ng EQT-I/Nm³ (European Commission 2003b, p. 278).² Sin embargo, esta tecnología es compleja, y, como se ha observado, implica costos de capital muy elevados, y también un alto costo de operación.

Es posible encontrar también un incinerador cuando se desaguan lodos de flotación para regenerarlos térmicamente en un horno giratorio. El gas de combustión se quema en una cámara de postcombustión (sobre 850°C) y se libera al aire ambiente a una temperatura de 120°C. En los gases residuales de la planta de coque de lignito en la planta de lodos se encontró una concentración de PCDD/PCDF de 0.004 ng EQT-I/Nm³ (a 11% O₂) (European Commission 2003b, p. 415–417).

He aquí experiencias de algunos países en materia de lodos del tratamiento de aguas residuales de efluentes de gaseado de lanas:

- Uso de los lodos en la fabricación de ladrillos (mezclados con arcilla) u otras formas de reciclaje apropiadas
- Incineración de los lodos con recuperación de calor, siempre que se puedan tomar medidas para controlar o evitar las emisiones de PCDD/PCDF que provienen del cloro orgánicamente ligado de los plaguicidas que puede haber en los lodos.

Para más información, consúltese la orientación relativa a mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para calderas de recuperación de instalaciones industriales (sección VI.D de las presentes directrices).

2. Acabado de cueros

2.1 Introducción

La industria de la curtiembre, y en particular la refinación de cueros, consiste en la obtención de cueros procesados a partir de pellejos o pieles en bruto, que pueden emplearse en la fabricación de una amplia gama de productos. Todo el proceso implica una serie de reacciones químicas y procesos mecánicos complejos. De ellos, el curtido es la etapa fundamental que da al cuero su estabilidad y carácter esencial. Las curtidurías suelen ser pequeñas empresas (European Commission 2003a), e incluso actividades artesanales en los países en desarrollo.

2.2 Descripción del proceso

La industria del cuero tiene un gran potencial contaminante, con importantes descargas de agua y uso de ciertos productos químicos como biocidas, surfactantes y solventes orgánicos.

En el proceso de producción del cuero se pueden distinguir cuatro etapas:

- Almacenamiento de pieles y cueros, y operaciones de sección de ribera
- Operaciones de curtido
- Operaciones de postcurtido
- Operaciones de acabado

2.3 Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

Hasta ahora no se ha registrado contaminación de PCDD/PCDF en las curtiembres o en sus inmediaciones. Sin embargo, se ha observado contaminación de productos comerciales de cuero y, basándose en el patrón de los PCDD/PCDF, cabe suponer que sobre todo los procesos identificados en la industria textil son también responsables de la presencia de PCDD/PCDF en los productos de cuero y en emisiones (UNEP 2003).

La principal fuente de contaminación parece ser el pentaclorofenol. Este supuesto se basa en el hecho de que desde su prohibición en Alemania en 1989³ las concentraciones de PCDD/PCDF en los productos de cuero han descendido (European Commission 1996).

3. Concentraciones de PCDD/PCDF en productos químicos empleados en las cadenas de producción de textiles y cueros

En la tabla 1 se resumen las escalas de concentraciones de PCDD/PCDF registradas en la literatura científica referente a biocidas y productos químicos empleados en la producción de teñidos. Debe señalarse que algunos datos son de hace años y puede que sean obsoletos. Sin embargo, para realizar una evaluación histórica, y en vista de que es posible que se usen algunos lotes producidos tiempo atrás, o que aún se encuentren en algunas lugares productos de consumo que hayan sido tratados con estas sustancias químicas, esta información puede ser de utilidad.

■ **Tabla 1. Concentraciones de PCDD/PCDF en biocidas y pigmentos o tintes para teñido**

Sust. Química	País o uso	Concentración (ng EQT-l/kg)	Observaciones
Biocidas			
PCP Pentaclorofenol	China, Europa, EUA	800,000–4,445,000	Distintos procesos de producción
PCP-Na Sal de sodio de Pentaclorofenol	China, Europa, EUA	500–3,374,000	Distintos procesos de producción
CNP Chloronitrofen	Japón	400/300,000	Tecnología antigua/nueva
Pigmentos para teñido/ materias primas/ tintes			
Cloranil	Materia prima para la producción de tintes de dioxazina	100–3,065,000	Distintos procesos de producción
Violeta Carbazole	Pigmento para teñido	211,000	
Azul 106	Tinte de dioxazina	19,502–56,428	

4. Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales

Las buenas prácticas generales de gestión son: instrucción y capacitación del personal, mantenimiento del equipo (y su documentación), almacenamiento, manipulación, dosificación y administración de productos químicos, conocimiento a fondo de insumos y resultados de los procesos.

Los conocimientos sobre las materias primas textiles son esenciales para poder gestionar las transferencias de contaminación. Las fibras de lana en crudo pueden estar contaminadas con plaguicidas, a veces organoclorados, como el pentaclorofenol y el cloronitrofen. Con un buen lavado y gaseado de la lana, por ejemplo con percloroetileno, se eliminará toda la grasa y los plaguicidas que se suelen encontrar en la fase solvente.

Para las actividades artesanales, las autoridades responsables deberían abogar por la mejora de las condiciones de aseo y de seguridad ocupacional. Deberían emprenderse programas de información y sensibilización.

Las fuentes principales de contaminación con PCDD/PCDF en productos textiles y de cuero son los productos químicos aplicados en las respectivas cadenas de producción o acabado, como fungicidas y tintes que se sabe están contaminados con PCDD/PCDF.

La mejor medida para evitar la contaminación de productos textiles y de cuero con PCDD/PCDF sería prescindir de estas sustancias en las cadenas de producción. Si se

emplean uno u otro, debería darse preferencia a lotes con bajas concentraciones (sustancias destiladas o purificadas de alguna otra forma).

A fin de evitar o reducir la formación y liberación de PCDD/PCDF al incinerar los lodos del tratamiento y flotación de aguas residuales deberían aplicarse las mejores técnicas disponibles. Sin embargo, conviene explorar otras técnicas respetuosas del medio ambiente.

5. Alternativas

Dado que la presencia de PCDD/PCDF en la industria textil y del cuero está vinculada sobre todo al uso de sustancias contaminadas con dioxinas, como el pentaclorofenol y ciertos pigmentos para tintes, la alternativa sería sustituirlos por sustancias sin dioxinas. Por ejemplo, en Alemania, después de la eliminación del pentaclorofenol como conservante, se han empleado las siguientes sustancias:

- 2-(tiocinometiltio) benzotiazole (TCMTB; N° de registro CAS 21564-17-0)
- o-fenilfenol (oPP; N° de registro CAS 90-43-7)
- 4-cloro-3-metilfenol (CMK; N° de registro CAS 59-50-7)
- 2-*n*-octil-4-isotiazolin-3-ona (OIT; N° de registro CAS 26530-26-1)

Estas sustancias han sido evaluadas como menos peligrosas para el medio ambiente que el pentaclorofenol pero no son en absoluto inocuas en sí. Deberían buscarse otras alternativas, de menos riesgo. En lo posible, es imperativo evitar la quema de productos textiles, de tapicería, cueros y alfombras para evitar la formación de PCDD/PCDF.

6. Monitoreo

No existe un indicador sencillo para identificar las fibras, lanas o textiles contaminados con dioxinas. Varios análisis han confirmado que no existe correlación entre el pentaclorofenol y las concentraciones de PCDD/PCDF en los textiles, aunque los patrones de dioxinas proporcionan indicios claros de que el pentaclorofenol sería la fuente. Estas conclusiones parecen lógicas ya que el pentaclorofenol es soluble en agua y se eliminará en el proceso de acabado y en las últimas lavadas, mientras que los PCDD/PCDF se adsorben en la fibra y permanecen en los textiles. Para los productos de cuero, en la mayoría de los casos hay una correlación cualitativa entre el pentaclorofenol y PCDD/PCDF.

Debería crearse y reforzarse la capacidad nacional para la vigilancia continua de fuentes posibles de PCDD/PCDF de la industria textil y del cuero, incluidos los productos importados. Se requiere más instrucciones sobre la vigilancia del pentaclorofenol en aguas residuales.

Referencias

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Textile Industry*. Sector Notebook Project EPN3 10-R-97-009. EPA, Office of Compliance Sector Notebook Project, Washington, D.C.

European Commission. 1996. "Commission Decision of 26 February 1996 Concerning the Prohibition of Pentachlorophenol (PCP)." *Official Journal* No. L 068, 19/03/1996 P. 0032-0040. 96/211/EC: Notified by Denmark.

European Commission. 2003a. *Reference Document on Best Available Techniques for the Tanning of Hides and Skins*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

European Commission. 2003b. *Reference Document on Best Available Techniques for the Textiles Industry*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Horstmann M., McLachlan M.S., Reissinger M. and Morgenroth M. 1993. "An Investigation of PCDD/F Formation during Textile Production and Finishing." *Organohalogen Compd.* 11:417–420.

Masunaga S., Takasuga T. and Nakanishi J. 2001. "Dioxin and Dioxin-Like PCB Impurities in Some Japanese Agrochemical Formulations." *Chemosphere* 44:873–885.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2005. *Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases*. UNEP, Geneva. www.pops.int/documents/guidance/Toolkit_2005.pdf.

Notas

¹ No en European Commission 2003b.

² 1 ng (nanogramo) = 1×10^{-12} kilogramo (1×10^{-9} gramo); Nm³ = metro cúbico normal, volumen de gas seco medido a 0°C y 101.3 kPa. Para información sobre mediciones de toxicidad, véase la sección I.C, subsección 3, de estas directrices.

³ Que establece una concentración máxima de 5 mg de pentaclorofenol por kg en el producto final.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/15

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Plantas de fragmentación para el
tratamiento de vehículos fuera de uso



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
- (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
- (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.K

Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C

**Categoría de fuentes (k) de la Parte III:
Plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos
uera de uso**

VI.K Plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso	9
1. Preámbulo	10
2. Descripción del proceso	10
3. Composición de desechos de la fragmentación	11
4. Concentraciones de emisiones de plantas de fragmentación	13
5. Medidas recomendadas	14
6. Condiciones técnicas mínimas para el tratamiento	15
7. Medidas primarias	15
8. Medidas secundarias	16
Referencias	16
Otras fuentes	16

Tablas

Tabla 1. Material orgánico en residuos de fragmentación, que en la referencia original se definen como “fracciones combustibles” y “fracciones de desecho”	12
Tabla 2. Emisiones de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos en plantas de fragmentación alemanas.....	13
Tabla 3. Datos medidos de las concentraciones de emisiones originadas en plantas de fragmentación	14

Figuras

Figura 1. Esquema general del proceso de fragmentación	10
Figura 2. Composición de desechos de fragmentación	11

Resumen

En el Anexo C del Convenio de Estocolmo las plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso figuran como fuente con potencial para formar y liberar las sustancias nombradas en el mismo Anexo. Las fragmentadoras son grandes máquinas compuestas por uno o más yunques o barras rompedoras y revestidas con placas de desgaste de acero aleado. Un motor eléctrico mueve el rotor con los martillos de acero aleado cuyo movimiento es de cabeceo libre. En la parte inferior de la fragmentadora hay una bandeja vibratoria que recibe el material triturado que se descarga a través de las parrillas. Según el procedimiento, se produce un flujo de metal ferroso, relativamente limpio y compuesto de trozos de acero pequeños (50 mm) y una "borra" que contiene fragmentos de metales no ferrosos y de otros materiales que ingresaron a la trituradora (conocida también como fragmentadora).

Hay muy pocos datos de mediciones de emisiones de chimenea en plantas de fragmentación; sin embargo, los resultados de algunos estudios arrojan niveles de compuestos de dioxinas de más de 0.1 ng EQT- l/m^3 . Por el momento no hay pruebas suficientes de que durante la fragmentación (mecánica) de vehículos, equipos eléctricos domésticos u otros aparatos eléctricos se produzca nueva formación de dibenzoparadioxinas (PCDD) policloradas, dibenzofuranos policlorados (PCDF) o bifenilos policlorados (PCB). La información existente indica que los PCDD/PCDF y PCB liberados por las plantas de fragmentación son un producto industrial, intencional, que ha ingresado con los aceites, fluidos dieléctricos y otros materiales contenidos en estos vehículos o bienes de consumo, y que este proceso mecánico se limita a liberar.

En todo caso, en las plantas de fragmentación se deben aplicar medidas para evitar incendios accidentales (que podrían provocar la formación de sustancias del Anexo C). La borra de la fragmentación está compuesta de películas de plástico inflamable y polvo fibroso, lo que obliga a una cuidadosa operación de la planta para evitar incendios accidentales. Normalmente se instalan sistemas para eliminación de polvo (por ejemplo, fragmentación en húmedo) o para recolección de polvo (por ejemplo, ciclones, lavadores Venturi o cámaras de filtros) en plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso. Estos sistemas ayudan a reducir la emisión potencial de contaminantes orgánicos persistentes. Para aumentar el control de las emisiones de polvo, los residuos secos finos se deberían almacenar de forma que su dispersión sea mínima. Otras fuentes de precursores de dioxinas que pueden provocar la formación de PCDD/PCDF cuando son quemadas son los condensadores que contienen PCB, aceites de desecho o textiles contaminados con PCB o clorobenceno y polímeros que contienen pirorretardantes bromados (formación de dibenzoparadioxinas polibromadas (PBDD) y dibenzofuranos polibromados (PBDF) como contaminantes).

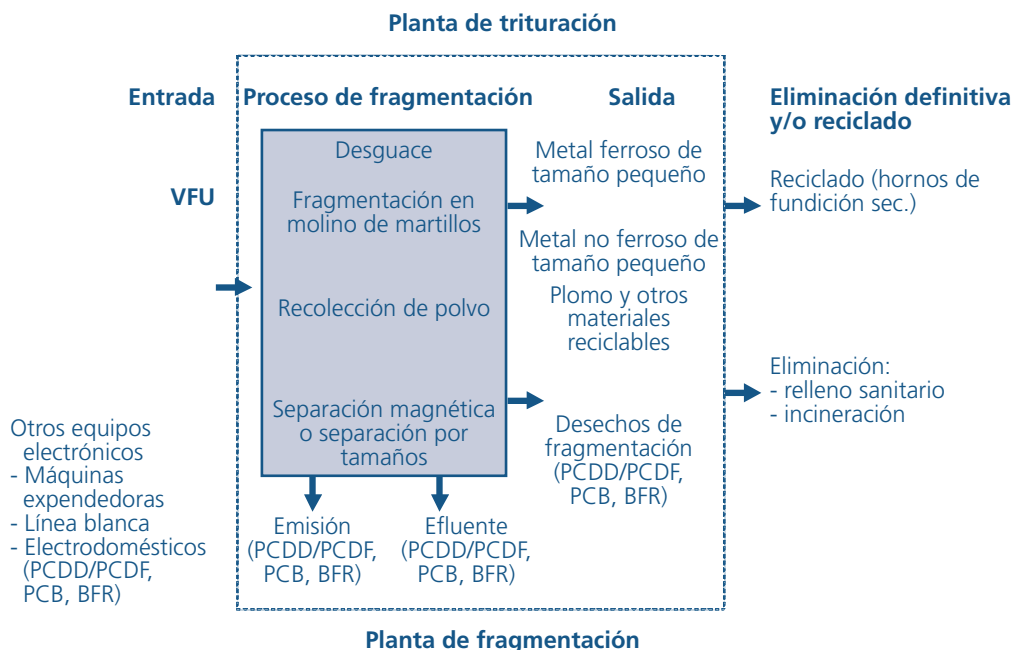
1. Preámbulo

En el Anexo C del Convenio de Estocolmo las plantas de fragmentación para el tratamiento de vehículos fuera de uso figuran como fuente que tiene potencial para formar y liberar involuntariamente contaminantes orgánicos persistentes. Sin embargo, por ahora no hay pruebas suficientes de que en este proceso mecánico se produzca nueva formación de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos o bifenilos policlorados. Los datos disponibles indican que las dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos y bifenilos policlorados liberados por las plantas de fragmentación provienen de la producción industrial, intencional, de bifenilos policlorados, y que han ingresado en éstas como parte de aceites y fluidos dieléctricos, etc. que se encuentran en vehículos o, más probablemente, en bienes de consumo. Las fragmentadoras no hacen sino liberar estas sustancias.

2. Descripción del proceso

Los vehículos fuera de uso son procesados en fragmentadoras. El proceso consiste en triturarlos junto con otros productos metálicos fuera de uso (bicicletas, muebles de oficina, máquinas expendedoras y equipos llamados de línea blanca, como los electrodomésticos). En la planta, un molino de martillos de alto rendimiento produce piezas dimensionadas de chatarra ferrosa de gran pureza química y física. Esta chatarra ferrosa es apreciada por los fabricantes de acero y otros productores de metales secundarios. La Figura 1 muestra un esquema general del proceso.

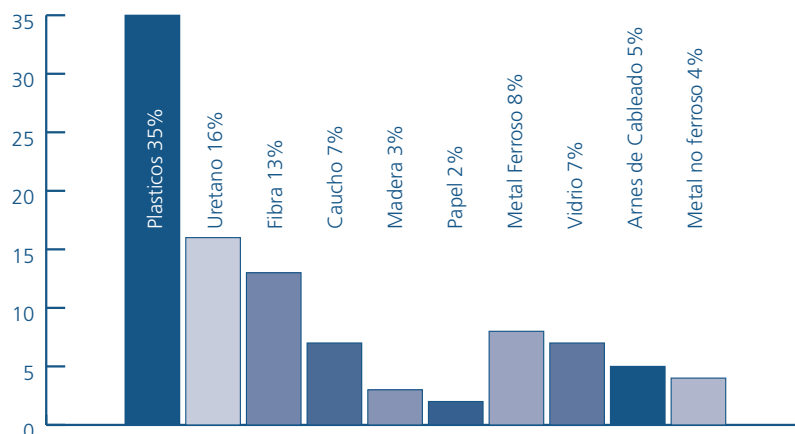
■ **Figura 1 Esquema general del proceso de fragmentación**



Muchas partes de vehículos y aparatos eléctricos son de materiales no ferrosos, como cobre, aluminio y zinc. En el proceso de fragmentación se extrae la fracción ferrosa de otros materiales mediante separación magnética. Los metales no ferrosos, como cobre y aluminio, generalmente se separan en una fase posterior. El remanente es el

denominado desecho de trituración y se estima equivale al 25% - 35% del peso del vehículo fuera de uso (Environment Australia, Department of the Environment and Heritage, 2002). El desecho de fragmentación está compuesto de vidrio, fibra, caucho, líquidos de automóvil, plásticos y suciedad. La Figura 2 ilustra la composición de los desechos de la fragmentación.

■ **Figura 2 Composición de desechos de fragmentación**



Fuente: Environment Australia, Department of the Environment and Heritage (2002)

3. Composición de desechos de la fragmentación

La composición de la borra de fragmentación variará mucho según la partida de material y la planta, por las diferencias en las mezclas de materias primas procesadas y en los niveles de procesamiento previo e inspección aplicados por los operadores de la planta. Cabe señalar que es probable que la borra difiera bastante de una planta a otra por las distintas reglamentaciones existentes en materia de permisos y por las variaciones que éstas experimentan con el tiempo

Una investigación sueca (Börjeson, L; Löfvenius, G.; Hjelt, M; Johansson, S.; Marklund, S., 2000) muestra que los niveles de PCDD/PCDF por gramo en las muestras secas de borra de fragmentación son bajos en todas las fracciones (Tabla 1), lo que confirma la expectativa de que los niveles de dioxinas y furanos generalmente deberían ser muy bajos, porque las dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos no se usan ni se producen deliberadamente para ningún producto o sustancia técnicos.

Sin embargo, a diferencia de los niveles de dibenzoparadioxinas y de dibenzofuranos, los niveles de bifenilos policlorados fueron altos, especialmente en fracciones provenientes de desechos industriales o de línea blanca. Los bifenilos policlorados que se encuentran en los productos de línea blanca constituyen la presencia más alta de bifenilos policlorados en el proceso de fragmentación; pero no son resultado de formación involuntaria durante este proceso. Por lo tanto, antes de proceder a la fragmentación, es recomendable conocer e identificar qué partes de un aparato eléctrico pueden tener estos componentes y procurar desmontarlas.

■ **Tabla 1 Material orgánico en residuos de fragmentación, que en la referencia original se definen como “fracciones combustibles” y “fracciones de desecho”**

Orgánicos	PCDD/PCDF EQT-I ng g⁻¹ Fracción combustible	PCDD/PCDF EQT-I ng g⁻¹ Fracción de desecho	PCB ug g⁻¹ Fracción combustible	PCB ug g⁻¹ Fracción de desecho	PCBz ug g⁻¹ Fracción combustible	PCBz ug g⁻¹ Fracción de desecho
P1 desguace parcial	<0.6	–	6.7	–	2.2	–
P1 desguace completo	<0.20	–	6.1	–	0.4	–
P1 autos varios	<0.03	0.04	1.1	41	0.7	0.4
P1 desechos mixtos	<0.2	0.03	12	77	0.8	0.3
P1 línea blanca	<0.15	0.04	34	114	0.9	0.4
P1 desechos industriales	<0.3	0.04	24	62	0.3	0.2
P2 desguace parcial	<0.2	–	2.1	–	1.9	–
P2 desguace parcial	<0.11	–	0.5	–	1.5	–
P2 desguace completo	<0.6	–	0.6	–	0.4	–
P2 autos varios	<0.3	0.06	1.5	14	1.5	0.3
P2 desechos mixtos	<0.2	0.15	39	217	1.9	0.4
P2 línea blanca	<0.16	0.11	102	254	0.7	0.5
P2 desechos industriales	<0.12	0.14	25	295	0.4	0.15

Fuente: Börjeson, L.; Löfvenius, G.; Hjelt, M.; Johansson, S; Marklund, S. 2000

Algunos estudios han confirmado que los residuos de la fragmentación de vehículos fuera de uso contienen PCB en un rango de ppm (=mg/kg) (Urano *et al.* 1999, Sakai *et al.* 1998, 2000). No se detectó contaminación con dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos en aceite de motor de vehículos fuera de uso. Tomando en cuenta los perfiles de los congéneres, cabe considerar que estos resultados se deben a que en los procesos de reciclaje y tratamiento de desechos se mezclan materiales de fabricación antigua que contienen bifenilos policlorados. Aunque en estos estudios no se analizaron las emisiones de contaminantes orgánicos persistentes de las plantas de fragmentación, se deberían tomar en cuenta las emisiones potenciales de estos contaminantes en el gas de escape, en vista de los niveles de PCB en el rango de ppm (=mg/kg) en residuos de automóviles fragmentados. Esta liberación de bifenilo policlorado proviene de la mezcla de bifenilo policlorado comercial que se usa en automóviles. Estos PCB no son contaminantes orgánicos persistentes generados de forma involuntaria y por lo tanto, en un sentido estricto, no son materia del inventario de liberaciones de bifenilos policlorados previsto en el Artículo 5 del Convenio de Estocolmo. Sin embargo, al no haber manera de distinguir entre bifenilos policlorados intencionales y no intencionales en desechos y emisiones de fragmentación, se deberían aplicar mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales con el fin de minimizar o eliminar la liberación de cualquier tipo de bifenilo policlorado en el proceso de fragmentación.

Los desechos de la fragmentación contienen cantidades importantes de cobre y cloro que al ser quemados favorecen la formación de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos y otros contaminantes orgánicos persistentes liberados involuntariamente.

4. Concentraciones de emisiones de plantas de fragmentación

Según un informe sobre un inventario de dioxinas europeo se cuenta con datos medidos de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos emitidos por unas pocas plantas de fragmentación. Generalmente, se detectaron concentraciones muy bajas (<0.01 ng EQT-I/m³) en una planta de Sanchsen-Anhalt (Alemania). Los datos se resumen en la tabla 2, donde se muestran las emisiones y los factores de emisión al aire.

■ **Tabla 2. Emisiones de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos en plantas de fragmentación alemanas**

	Mínimo	Máximo	Medida geométrica	Medida aritmética
Concentración de emisiones (ng EQT-I/m ³)	0.002	0.430	0.056	0.140
Factor de emisión (mg EQT-I/t)	0.059	0.667	0.236	0.303

Fuente: LUA 1997

Otra investigación, realizada en Bélgica (François, F., Blondeel, M, Bernaert, P., Baert, R, 2004), consideró las fuentes específicas potenciales de liberaciones involuntarias de PCB y PCDD/PCDF de una planta de fragmentación donde se convierten vehículos fuera de uso y equipos electrónicos y eléctricos en diversas fracciones reutilizables. En la tabla 3 se presentan de forma general varias mediciones de emisiones de chimenea de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos y bifenilos policlorados liberados involuntariamente. Las plantas cuentan al menos con un sistema de filtro de ciclón para desempolvar los gases de escape. Los coeficientes de flujo típicos de gases de escape son de 75,000 Nm³/h. Todas las concentraciones de dibenzoparadioxinas y dibenzofuranos, salvo una, fueron de menos de 0.1 ng EQT/Nm³.

■ **Tabla 3. Datos medidos de las concentraciones de emisiones originadas en plantas de fragmentación**

Mediciones de emisiones	PCDD/PCDF ng EQT/Nm ³	PCB tipo dioxina (total 12) ng EQT/Nm ³
Planta 1	0.0098	0.048
	0.012	0.41
	0.0048	0.073
	0.0004	0.025
Planta 2	0.077	0.74
	0.043	1.06
	0.022	0.30
Planta 3	0.0088	0.171
	0.37	0.34
	0.025	0.73

Fuente: François, F., Blondeel, M., Bernaert, P., Baert, R. 2004

Algunos precursores de dioxinas que al quemarse pueden formar dibenzoparadioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF) son los bifenilos policlorados presentes en condensadores, los bifenilos policlorados o clorobenceno que contaminan aceites de desecho o telas, y los pirorretardantes bromados contenidos en los polímeros (formación de dibenzoparadioxinas polibromadas (PBDD) y dibenzofuranos polibromados (PBDF) como contaminantes).

5. Medidas recomendadas

Una mejor práctica ambiental importante es la que consiste en reforzar el sentido de responsabilidad de los operadores de las fragmentadoras. Se debería hacer un análisis para identificar los componentes y fluidos peligrosos del material entrante y prever las instalaciones para eliminarlos antes de la fragmentación.

Es crucial controlar la chatarra tratada, especialmente la que es producto de aparatos eléctricos, transformadores y condensadores, que debe ser identificada, desmantelada y eliminada por separado con el fin de evitar el ingreso de bifenilos policlorados a la planta. El control también es una medida para reducir la contaminación de residuos de fragmentación con bifenilos policlorados.

No obstante, los residuos de fragmentación siempre están contaminados y sólo se deben eliminar en una planta de incineración especial.

Al desmantelar y reciclar piezas de plástico de gran tamaño, por ejemplo, parachoques, se puede reducir mucho el remanente plástico de los vehículos fuera de uso y de los desechos producidos con la fragmentación.

Con un tratamiento complementario de los desechos de fragmentación, por ejemplo, mediante separación de corrientes de Foucault, se puede recuperar una proporción importante de metales presentes en los desechos, como cobre y aluminio.

Para obtener una mayor proporción de fracciones reciclables se debería fomentar el uso de materiales reciclables y de partes fácilmente desmontables desde la etapa de concepción de los productos, lo que es recomendable no sólo para vehículos.

6. Condiciones técnicas mínimas para el tratamiento

En la construcción de las instalaciones se debe prevenir la contaminación del suelo, agua y aire. Por ello es preciso contar con instalaciones de almacenamiento apropiadas, superficies impermeables provistas de colectores de derrames, decantadores y limpiadores-desengrasantes; asimismo, debe haber equipos para el tratamiento de tanques de almacenamiento de agua, en particular de agua de lluvia. Además, es preciso disponer de almacenamiento para las piezas de desguace, en especial almacenamiento impermeable para piezas contaminadas con aceites, contenedores especiales para baterías (con neutralización de electrolitos *in situ* o en otro lugar), filtros y condensadores que contengan PCB/PCT, y tanques especiales para los fluidos.

7. Medidas primarias

Por lo general, antes de la fragmentación se deberían extraer los fluidos (líquido de frenos, petróleo, líquido de dirección, aceite de motor, refrigerantes y líquido de transmisión). Esta medida se recomienda especialmente para la eliminación de los PCB, que deben identificarse y extraerse de todos los artefactos para fragmentación. Se debe prestar especial atención a transformadores y condensadores. Algunas medidas son las siguientes:

- Extracción de baterías y tanques de gas licuado.
- Extracción o neutralización de componentes potencialmente explosivos (p. ej., bolsas de aire).
- Extracción y recolección y almacenamiento por separado de combustible, aceite de motor y aceite de otros componentes.
- Extracción de catalizadores.
- Extracción de neumáticos y componentes de plástico de gran tamaño (parachoques, tablero de conducción, recipientes de fluidos, etc.) si en el proceso de fragmentación estos materiales no se han separado de forma que puedan reciclarse efectivamente como materiales.

8. Medidas secundarias

Algunas medidas para evitar liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes en las plantas de fragmentación son las siguientes:

Tratamiento avanzado de gases de escape (con cámaras de filtros y filtros de carbón activado para eliminar tanto emisiones gaseosas como particuladas).

Eliminación apropiada de desechos de fragmentación residuales y líquidos que contienen mezclas de materiales orgánicos, metales pesados como el cobre y, en muchos casos, bifenilos policlorados y otras sustancias cloradas. El tratamiento deficiente de estos desechos puede provocar emisiones involuntarias de contaminantes orgánicos persistentes, lo que sucede especialmente en la quema a cielo abierto. Los desechos nunca se deberían quemar a cielo abierto o en instalaciones no aptas para ello.

La incineración en instalaciones que cumplan los requisitos de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales es la forma apropiada de tratar los desechos de fragmentación. A falta de estas instalaciones, la forma de eliminación más recomendable es el relleno sanitario.

Referencias

Basel Convention Secretariat. 2002. *Technical Guidelines on the Environmentally Sound Management of the Full and Partial Dismantling of Ships*. Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, United Nations Environment Programme. Geneva.

Börjeson, L.; Löfvenius, G.; Hjelt, M.; Johansson, S.; Marklund, S. 2000. "Characterization of automotive shredder residues from two shredding facilities with different refining processes in Sweden", *Waste Manage Res.* (2000) 18 p.358±366

European Commission. 2000. Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles. Official Journal of the European Communities, L 269/34-269/42 EN, 21.10.2000

Environment Australia, Department of the Environment and Heritage. 2002. "Environmental Impact of End-of-Life Vehicles: An Information Paper"

François F., M. Blondeel, P. Bernaert, and R. Baert. 2004. Diffuse Emissions of PCDD/F and Dioxin-like PCB from Industrial Sources in the Flemish Region. *Organohalogen Compd.* 66, 906-912

Fahrni, H.-P., 2005. Präsentation - Seminar der Abteilung Abfall "Situation RESH" 2005, BUWAL, Switzerland,

Fiedler, H.; Sakai, S. 2004. Shredder Plants for Treatment of end-of-life-vehicles. Information document prepared for the third Session of the Expert Group on BAT/BEP. www.pops.int

LUA. 1997. Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins und furans in Europe. Materialien No. 43. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, Germany

Sakai S., S. Urano, and H. Takatsuki. 2000. Leaching behavior of PCB and PCDDs/DFs from some waste materials. *Waste Management* 20, 241-247

Sakai S., S. Urano, and H. Takatsuki. 1998. Leaching Behavior of Persistent Organic Pollutants (POPs) in Shredder Residues. *Chemosphere* 37, 2047-2054

Towa Kagaku Co. 2001. Research report on current status of recycling plaza

Urano S., S. Sakai, and H. Takatsuki. 1999. *PCB in Automobile Shredder Residue and its origin*. 8th Symposium on Environmental Chemistry Program and Abstracts, pp 50-51 (in Japanese)

Otras fuentes

Nourreddine, M. 2006. "Recycling of auto shredder residue" *Journal of Hazardous Materials*-5423.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/16

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M
Sección VI.N
Sección VI.O
Sección VI.P
Sección VI.Q
Sección VI.R
Sección VI.S
Sección VI.T
Sección VI.U
Sección VI.V
Sección VI.W
Sección VI.X
Sección VI.Y
Sección VI.Z

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Recuperación del cobre de cables
por combustión lenta



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

MAYO DE 2007, GINEBRA, SUIZA

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.L

**Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C**

Categoría de fuentes (I) de la Parte III: Recuperación del cobre de cables por combustión lenta

Í N D I C E

VI.L	Recuperación del cobre de cables por combustión lenta	9
1.	Descripción del proceso	9
2.	Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo	10
2.1	Información general sobre emisiones de la recuperación térmica de cables de cobre	10
2.2	Emisiones de PCDD/PCDF al aire	10
3.	Procesos alternativos a la recuperación térmica de cables de cobre	11
3.1	Corte de cables	11
3.2	Desforramiento del cable	12
3.3	Incineración de alta temperatura	13
4.	Resumen de medidas	13
	Referencias	14

Lista de tablas

Tabla 1.	Medidas para instalaciones nuevas de recuperación de cobre de cables.....	13
----------	---	----



■ Resumen

Se suele recuperar la chatarra de cobre quemando a cielo abierto los cables e hilos eléctricos que vienen recubiertos de plástico. Las sustancias químicas del Anexo C del Convenio de Estocolmo se forman probablemente a partir del plástico y los residuos de aceite, con el cobre como catalizador, a temperaturas de fundición que van de 250°C a 500°C.

Las mejores técnicas disponibles son el triturado o pelado del cable por medios mecánicos, o la incineración a temperaturas de >850°C. Se ha considerado fijar un precio especial para los cables e hilos eléctricos sin pelar, para así promover que se lleve el material intacto a los fundidores que empleen las mejores técnicas disponibles para su tratamiento.

No se puede hablar de niveles de desempeño asociados con las mejores técnicas disponibles, ya que el proceso de recuperación térmica no es una de ellas ni una de las mejores prácticas ambientales, y no debería ser practicada.

1. Descripción del proceso

La recuperación térmica de los cables de cobre consiste en la quema a la intemperie de los recubrimientos de plástico de cables e hilos eléctricos, para recuperar cobre usado y otros componentes. Se trata de un proceso que requiere mano de obra, y suele ser una actividad ya sea individual o a pequeña escala, sin medidas para reducir las emisiones al aire. Esta quema se suele realizar en bidones o directamente en el suelo. No se controla la temperatura ni se emplean medios de adicionar oxígeno para lograr la combustión completa de los compuestos de plástico.

La recuperación térmica del cableado de cobre se realiza sobre todo en países en desarrollo, ya que ahí se recicla manualmente mucha chatarra de computadoras. Sin embargo, no es una actividad exclusiva de esos países, de forma que debe ser atendida a escala mundial. Muchos países desarrollados y en desarrollo han aprobado legislación para prohibir la quema a cielo abierto, pero esta práctica se sigue realizando.

En las directrices técnicas para la identificación y gestión ambientalmente racional de desechos de plástico para su eliminación final del Convenio de Basilea sobre el Control de movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación se declara: "La quema al aire libre no es una solución ambientalmente aceptable para ningún tipo de desecho" (UNEP 2002, p. 43). Además, la decisión VII/19 de la séptima reunión de la Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea (octubre de 2004) enmendó los Anexos VIII y IX del Convenio a fin de incluir nuevos incisos referentes a la quema no controlada de cables revestidos de plástico. La Ley sobre aire limpio del Reino Unido

(Clean Air Act) dispone: “Toda persona que queme los revestimientos de cables a fin de recuperar el metal contenido en ellos incurre en un delito ... [y] será objeto de condena sumaria, con pena de multa ...” (Government of the United Kingdom 1993).

2. Fuentes de sustancias químicas que figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo

Puede darse formación de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) en residuos de aceites y por la presencia de cloro de plásticos en la carga. Como el cobre es el metal más eficiente para catalizar la formación de PCDD/PCDF, la quema de cables de cobre puede ser una fuente importantísima de emisiones de PCDD/PCDF.

2.1 Información general sobre emisiones de la recuperación térmica de cables de cobre

La recuperación térmica de los cables de cobre libera varios contaminantes, además de PCDD/PCDF, como el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), hidrocarburos aromáticos policíclicos, cloruro de hidrógeno, metales pesados y cenizas. La incineración es incompleta debido a las bajas temperaturas de incineración (250°C a 700°C), por lo que se generan hidrocarburos y material particulado. Durante el proceso se liberan estabilizadores de plomo, que suelen contener las matrices de polímero de PVC del revestimiento de plástico de los cables. También se libera plomo adicional al quemar los cables de cobre revestidos de plomo. Los contaminantes son emitidos al aire, agua y suelo.

2.2 Emisiones de PCDD/PCDF al aire

La incineración incompleta de plásticos clorados provoca la generación de PCDD/PCDF. Los revestimientos de plástico de los cables de cobre están mayormente compuestos de cloruro de polivinilo (PVC).

“Durante la combustión se forman varias especies de hidrocarburos en forma de anillo (conocidas como ‘precursores’), como productos de reacción intermedios. Si hay presencia de cloro, estas especies pueden reaccionar entre sí para formar PCDD/PCDF. Los precursores más comúnmente identificados son los clorobencenos, clorofenoles y bifenilos policlorados. Pueden también formarse PCDD/PCDF por la reacción de moléculas orgánicas complejas y cloro. En diversos estudios se han señalado fuertes correlaciones entre el contenido de cloro y las emisiones de PCDD/PCDF durante las pruebas de combustión” (EPA 1997, p. 3–8).

La destrucción de PCDD/PCDF requiere temperaturas por encima de 850°C en presencia de oxígeno (European Commission 2001).

3. Procesos alternativos a la recuperación térmica de cables de cobre

Para evitar la generación de PCDD y PCDF no debería recuperarse el cobre de los cables por medios térmicos. A continuación se presentan procesos de tratamiento alternativos a la quema al aire libre. El material de aislamiento, por ejemplo PVC, también puede recuperarse por medio de estos procesos.

3.1 Corte de cables

El corte permite separar los recubrimientos plásticos de los cables sin producir PCDD y PCDF por medios térmicos (UNEP 2001). Con este proceso se pueden tratar cables de tipo mixto y diferentes calibres. Los productos que se recuperan son cobre granulado y PVC.

El corte implica los siguientes pasos:

3.1.1 Preselección

La clasificación previa según el tipo de cable es fundamental para una separación de cables eficiente; permite extraer el máximo valor de la chatarra recuperada y facilita la separación de plásticos. Se clasifica en función del tipo de aleaciones metálicas (separación de cables de cobre y aluminio), diámetro del conductor, longitud del cable y tipo de aislamiento. Los cables sueltos se cortan a <1 m mientras que los que vienen en balas de alta densidad se rompen en trozos. Se pueden tratar cables desde calibres finos hasta 8 cm. de diámetro. Los materiales que no pueden tratarse por este medio, como el cable extrafino y los cables que contienen grasa o alquitrán, deben retirarse.

“Antes se agregaba PCB al PVC en ciertos sistemas de cables dedicados a aplicaciones de alto voltaje con el fin de mejorar el aislamiento, y en algunos cables de bajo voltaje como pirorretardante. Es preciso determinar la presencia de estos sistemas de cable antes de comenzar el proceso de reciclaje” (UNEP 2001).

Según datos sobre PCB de Alemania, la mayoría de las muestras presentan niveles de contaminación de 30 mg/kg de PCB, y en algunas los niveles de contaminación llegan a cientos de ppm y otros son <10 ppm.

3.1.2 Corte de cables

Este proceso se usa para reducir secciones largas de cable de modo que sean de un tamaño adecuado para el granulador. Es un proceso opcional en instalaciones más pequeñas. Se genera menos polvo filtrable en comparación con el triturado.

3.1.3 Granulación

El objetivo de la granulación es despojar al metal de aislantes y revestimientos. La granulación fina es necesaria para desprender lo suficiente los plásticos de los metales. Sin embargo, siempre quedarán pequeñas cantidades de metal incrustadas en el plástico, que se perderán como desechos.

3.1.4 Cribado

Se usa el cribado para lograr una recuperación adecuada de metales mediante separación por tamaño de partículas. El material de más tamaño puede volver a procesarse en el granulador. Se pueden recuperar partículas de metal a partir del producto de la criba retirando las partículas no metálicas más livianas por medio de un aspirador. Durante el cribado se debe recolectar y filtrar el polvo.

3.1.5 Separación por densidad

La recuperación de metales depende de la eficiencia de la técnica de separación y el grado de recuperación de metal, liberado de los plásticos. Se puede realizar la separación de las partículas de metal mediante técnicas de separación por densidad tales como los separadores de lechos fluidizados. Los separadores electroestáticos secos pueden permitir una recuperación mayor en comparación con las técnicas de densidad.

3.2 Desforramiento del cable

Es un proceso menos costoso para la recuperación de cobre de cables en comparación con el corte, pero menos productivo. La generación de PCDD y PCDF no es preocupante aquí. Se trata de una técnica preferida en los países en desarrollo a causa de su menor costo. También se debe realizar una preselección de los cables antes de desforrarlos, teniendo en cuenta el tipo de metal, material de aislamiento, diámetro del conductor y longitud (UNEP 2001, p. 44).

A pesar del menor rendimiento se puede recuperar completamente el cobre, ya que no quedan residuos en el aislamiento de plástico. Con una separación cuidadosa por tipo de aislamiento se pueden obtener desechos que contengan un sólo tipo de polímero, lo cual facilita el reciclaje tanto del metal como del plástico.

Las desforradoras de cable no pueden procesar sino un filamento de cable a la vez, con velocidades de procesamiento que llegan a 60 m/min. o 1100 kg/min., y diámetros de cable de 1,6 mm a 150 mm.

3.3 Incineración de alta temperatura

La incineración de alta temperatura sólo debe usarse para el tratamiento de cables que no pueden recuperarse por desforramiento o corte. Los materiales como el cable fino y los cables con contenido de grasa o alquitrán son quemados en incineradores con atmósfera controlada, para asegurar la combustión completa de los plásticos. Deben emplearse sistemas efectivos de limpieza de gases de combustión. (UNEP 2001, p. 46).

Los gases residuales del horno contienen contaminantes como el PCDD, PCDF, dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), cloruro y fluoruro de hidrógeno y polvo. Como el PCDD y el PCDF adsorben material particulado, debe recolectarse el polvo usando métodos eficientes como filtros de tela y reciclarse en el horno. Debe considerarse la posibilidad de postincineración y enfriamiento después de la incineración en caso de que no se logre eliminar el PCDD y el PCDF. Debe eliminarse el SO₂ y el cloruro y fluoruro de hidrógeno por depuración húmeda alcalina.

La chatarra de metal incinerada tiene menos valor a causa de la oxidación provocada por el tratamiento térmico. La incineración tiene un alto potencial de generación de PCDD y PCDF. El corte y desforramiento de cables son procesos más recomendables que la incineración a alta temperatura, por ser más económicos y ambientalmente racionales. Los tipos de cable que no puedan procesarse de estas maneras pueden tratarse en fundidoras de cobre primario o secundario.

4. Resumen de medidas

En la tabla 1 se resumen las medidas para las instalaciones nuevas de recuperación de cobre de cables.

■ **Tabla 1. Medidas para instalaciones nuevas de recuperación de cobre de cables**

Medida	Descripción	Consideraciones	Otros comentarios
Procesos alternativos	Distintos procesos recomendados para reemplazar la quema al aire libre.	Procesos que pueden considerarse: <ul style="list-style-type: none">• Triturado de cables• Desforramiento de cables• Incineración de alta temperatura para material que no pueda ser triturado o desforrado	Se considera que la incineración es la mejor técnica disponible en combinación con sistemas para recolección y disminución de gases.

No debe realizarse la recuperación térmica de cobre de cables, ya que produce emisiones de PCDD y PCDF. La quema al aire libre no debe considerarse nunca como medio aceptable de tratamiento de desechos. En muchos países se han promulgado normativas

y leyes contra de la recuperación térmica de cobre de cables en los ámbitos federal, estatal, provincial, territorial y municipal.

Tenemos algunos ejemplos de estas normativas y leyes en UNEP 2001, Government of the United Kingdom 1993, Government of Hong Kong 1996 y Government of New Zealand 2004.

Se ha considerado fijar un precio especial para los cables y alambres sin pelar, para así promover que se lleve el material intacto a las fundiciones que empleen las mejores técnicas disponibles para su tratamiento.

No procede hablar de límites de desempeño alcanzable, puesto que el proceso de recuperación térmica no es la mejor técnica disponible ni la mejor práctica ambiental, y no debería realizarse.

Referencias

EPA (United States Environmental Protection Agency). 1997. *Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Dioxins and Furans*. EPA-454/R-97-003. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.

European Commission. 2001. *Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industries*. BAT Reference Document (BREF). European IPPC Bureau, Seville, Spain. eippcb.jrc.es.

Government of Hong Kong. 1996. *Air Pollution Control Ordinance (Open Burning) 1996*. Chapter 3110, Section 4. www.justice.gov.hk/home.htm.

Government of New Zealand. 2004. *Resource Management National Environmental Standards Relating to Certain Air Pollutants, Dioxins, and Other Toxics Regulations*. www.mfe.govt.nz/laws/standards/air-quality-standards.html

Government of the United Kingdom. 1993. *Clean Air Act 1993 (c.11)*. Part IV, No. 33. www.hmso.gov.uk/acts/acts1993/Ukpga_19930011_en_5.htm#mdiv33.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2002. *Technical Guidelines for the Identification and Environmentally Sound Management of Plastic Wastes and for Their Disposal*. UNEP, Geneva. www.basel.int/meetings/cop/cop6/cop6_21e.pdf.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/17

Sección V.I.M.
Sección V.I.L.
Sección V.I.K.
Sección V.I.J.
Sección V.I.I.
Sección V.I.H.
Sección V.I.G.
Sección V.I.F.
Sección V.I.E.
Sección V.I.D.
Sección V.I.C.
Sección V.I.B.
Sección V.I.A.
Sección V.D.
Sección V.C.
Sección V.B.
Sección V.A.
Secciones I.IV

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Refinerías de aceites de desecho



Esta publicación puede ser reproducida toda o parcialmente, sin autorización especial, para fines educativos no lucrativos, siempre que se acredite la fuente. La Secretaría del Convenio de Estocolmo agradecerán se les haga llegar un ejemplar de cualquier publicación que tenga como fuente esta publicación. No se autoriza el uso de esta publicación para reventa o cualquier otro fin comercial sin permiso previo por escrito del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Publicado por la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes en octubre de 2008.
Para mayor información sírvase escribir a:

Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
Maison internationale de l'environnement
11-13 chemin des Anémones
CH-1219, Châtelaine, Ginebra, Suiza
ssc@pops.int - www.pops.int

Esta publicación ha sido diseñada e impresa por: SRO-Kundig - Ginebra

**DIRECTRICES SOBRE MEJORES TÉCNICAS
DISPONIBLES Y ORIENTACIÓN PROVISIONAL
SOBRE MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES**

**conforme al Artículo 5 y Anexo C del
Convenio de Estocolmo sobre
Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Í N D I C E

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN

- I.A** OBJETIVO
- I.B** ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO Y FORMA DE UTILIZAR LAS DIRECTRICES Y LA ORIENTACIÓN
- I.C** SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: DEFINICIÓN, RIESGOS, TOXICIDAD
- I.D** ARTÍCULO 5 Y ANEXO C DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- I.E** RELACIÓN CON EL CONVENIO DE BASILEA
- I.F** RELACIÓN CON OTRAS PREOCUPACIONES AMBIENTALES

SECCIÓN II: CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES

- II.A** CONSIDERACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CONVENIO DE ESTOCOLMO
- II.B** EL CONVENIO DE ESTOCOLMO Y LAS NUEVAS FUENTES
- II.C** UNA FORMA DE CONSIDERAR ALTERNATIVAS
- II.D** OTRAS CONSIDERACIONES DEL CONVENIO DE ESTOCOLMO

SECCIÓN III: MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES Y MEJORES PRÁCTICAS AMBIENTALES: ORIENTACIÓN, PRINCIPIOS Y CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES

- III.A** ORIENTACIÓN
- III.B** PRINCIPIOS Y PLANTEAMIENTOS GENERALES
- III.C** CONSIDERACIONES TRANSECTORIALES:
 - (i) SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C: MECANISMOS DE FORMACIÓN
 - (ii) CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN DE DESECHOS
 - (iii) CO-BENEFICIOS DE LA APLICACIÓN DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES A LAS SUSTANCIAS DEL ANEXO C
 - (iv) GESTIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN Y OTROS RESIDUOS
 - (v) CAPACITACIÓN DE LOS RESPONSABLES DE LA TOMA DE DECISIONES Y EL PERSONAL TÉCNICO
 - (vi) PRUEBAS DE LABORATORIO, MONITOREO Y REGISTRO

SECCIÓN IV: RESÚMENES DE LAS CATEGORÍAS DE FUENTES QUE FIGURAN EN LAS SECCIONES V Y VI

RESÚMENES DE LA SECCIÓN V: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE II DEL ANEXO C

RESÚMENES DE LA SECCIÓN VI: CATEGORÍAS DE FUENTES INCLUIDAS EN LA PARTE III DEL ANEXO C

SECCIÓN V: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE II DEL ANEXO C

- V.A** INCINERADORAS DE DESECHOS
 - (i) DESECHOS SÓLIDOS URBANOS, DESECHOS PELIGROSOS Y LODOS DE ALCANTARILLADO
 - (ii) DESECHOS MÉDICOS
- V.B** HORNOS DE CEMENTO QUE INCINERAN DESECHOS PELIGROSOS
- V.C** PRODUCCIÓN DE PASTA DE PAPEL UTILIZANDO CLORO ELEMENTAL O PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PRODUCEN CLORO ELEMENTAL
- V.D** PROCESOS TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA METALÚRGICA
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE
 - (ii) PLANTAS DE SINTERIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO
 - (iii) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ZINC

SECCIÓN VI: ORIENTACIÓN/DIRECTRICES POR CATEGORÍAS DE FUENTES: CATEGORÍAS DE FUENTES DE LA PARTE III DEL ANEXO C

- VI.A** QUEMA A CIELO ABIERTO DE DESECHOS, INCLUIDA LA QUEMA EN VERTEDEROS
- VI.B** PROCESOS TÉRMICOS DE LA INDUSTRIA METALÚRGICA NO MENCIONADOS EN EL ANEXO C, PARTE II
 - (i) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE PLOMO
 - (ii) PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ALUMINIO
 - (iii) PRODUCCIÓN DE MAGNESIO
 - (iv) PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO
 - (v) FUNDICIÓN PRIMARIA DE METALES COMUNES

VI.C	FUENTES DE COMBUSTIÓN DOMÉSTICA
VI.D	COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS Y CALDERAS INDUSTRIALES
VI.E	INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MADERA U OTROS COMBUSTIBLES DE BIOMASA
VI.F	PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS DETERMINADOS QUE LIBERAN SUSTANCIAS QUÍMICAS QUE FIGURAN EN EL ANEXO C
VI.G	CREMATORIOS
VI.H	VEHÍCULOS DE MOTOR, EN PARTICULAR LOS QUE UTILIZAN GASOLINA CON PLOMO COMO COMBUSTIBLE
VI.I	DESTRUCCIÓN DE CARCASAS DE ANIMALES
VI.J	TEÑIDO (CON CLORANIL) Y TERMINADO (CON EXTRACCIÓN ALCALINA) DE TEXTILES Y CUEROS
VI.K	PLANTAS DE FRAGMENTACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE VEHÍCULOS FUERA DE USO
VI.L	RECUPERACIÓN DEL COBRE DE CABLES POR COMBUSTIÓN LENTA
VI.M	REFINERÍAS DE ACEITES DE DESECHO

Sección VI.M

**Orientación/directrices por categorías de fuentes:
Categorías de fuentes de la Parte III del Anexo C**

Categoría de fuentes (m) de la Parte III: Refinerías de aceites de desecho

Í N D I C E

VI.M Refinerías de aceites de desecho	9
1. Introducción	10
2. Aceites de desecho.....	10
3. Presencia de dibenzoparadioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF) en aceites usados	10
4. Refinerías de aceites de desecho	10
4.1 Destilación al vacío + tratamiento con arcilla.....	11
4.2 Destilación al vacío + tratamiento químico	11
4.3 Hidrotratamiento previo + destilación al vacío.....	11
4.4 Evaporación de película fina + extracción.....	11
4.5 Hidrogenación por contacto directo (proceso UOP –DHC).....	11
5. Medidas para reducir dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF) y bifenilos policlorados (PCB)	12
6. Conclusiones	12
Referencias	12

■ Resumen

En el Anexo C del Convenio de Estocolmo las refinerías de aceites de desecho figuran como una de las fuentes que pueden formar y liberar las sustancias nombradas en el mismo anexo.

Para fines de esta sección de las directrices, los aceites de desecho (o aceites usados) son cualquier aceite derivados del petróleo sean sintéticos o de origen vegetal o animal que haya sido usados. Según su origen pueden clasificarse en dos grandes fuentes: aceites industriales de desecho y aceites vegetales o de origen animal. Se pueden identificar tres tipos principales de aceite industrial de desecho: aceite industrial (ej. Aceite hidráulico, lubricante de motores, aceite de corte), aceite de garaje o taller mecánico y aceite de transformador.

Se ha comprobado que los aceites de desecho están contaminados con dibenzo-p-dioxinas policloradas, dibenzofuranos policlorados y bifenilos policlorados, pero, por ahora, no hay pruebas de nueva formación de estas sustancias en refinerías de aceites de desecho. Los datos existentes indican que las dibenzoparadioxinas policloradas y los dibenzofuranos policlorados o los bifenilos policlorados liberados por las refinerías de aceites de desecho o por las plantas de manipulación y gestión de aceites de desecho provienen de la producción industrial, intencional, de bifenilos policlorados o clorobenzenos que se encuentran en los aceites de desecho, sea por contaminación en el proceso de síntesis (de estas sustancias), o por haberse contaminado durante su uso, o bien en procesos de reciclaje anteriores. En este sentido, más que una fuente de formación, las refinerías de aceites de desecho representan una fuente de distribución de las sustancias del Anexo C.

Según la información disponible, algunas opciones para la gestión de aceites de desecho son la reutilización y regeneración, craqueo térmico, incineración o utilización como combustible. Hay que señalar que en muchos países también se practica el vertido y la quema a cielo abierto.

Para obtener información sobre la eliminación de los aceites de desecho o sobre su uso como combustible, consúltense las secciones pertinentes en estas directrices (secciones V.A Incineradoras de desechos, V.B Hornos de cemento que queman desechos peligrosos, VI.A Quema de desechos a cielo abierto, VI.C Fuentes de combustión doméstica y VI.D Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales).

1. Introducción

Las refinerías de aceites de desecho figuran en el Anexo C del Convenio de Estocolmo como fuente potencial de las sustancias del mismo anexo. Se precisa más investigación sobre las refinerías de aceites de desecho como fuentes de dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF), ya que es poca la información registrada al respecto.

2. Aceites de desecho

Los aceites de desecho son cualquier aceite sintético o derivado del petróleo que haya sido utilizado. Contienen agua, productos químicos, partículas metálicas y suciedad que se han ido incorporando durante su uso, degradando así sus propiedades y obligando a reemplazarlos por aceite nuevo.

Los aceites nuevos son una mezcla de un aceite primario (mineral o sintético) y aditivos (15%-25%). La posibilidad de regeneración y posible formación de PCDD/PCDF en las refinerías de aceites de desecho dependen del tipo de aceite primario y de los aditivos empleados.

3. Presencia de dibenzoparadioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF) en aceites usados

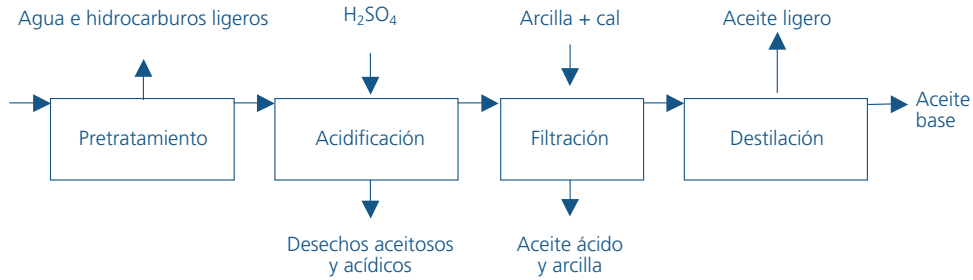
Hagenmaier y Bruner (citados por Fiedler) analizaron aceites de motor nuevos y usados (después de 10,000 km de uso en autos a base de gasolina con plomo). No se detectaron dibenzoparadioxinas policloradas ni dibenzofuranos policlorados en aceites de motor nuevos ni usados a un límite de cuantificación de 0.05 mg/kg por congénere. Sin embargo, se detectaron dibenzoparadioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados altamente clorados en aceites reciclados, derivados probablemente de aceites usados contaminados con pentaclorofenol y su sal de sodio, que en Europa se emplean en la industria del aceite mineral. Cabe señalar que algunos de los aditivos utilizados en los aceites lubricantes modernos contienen compuestos policlorados y que hay que seguir monitoreando los aceites de desecho que procesan las refinerías.

4. Refinerías de aceites de desecho

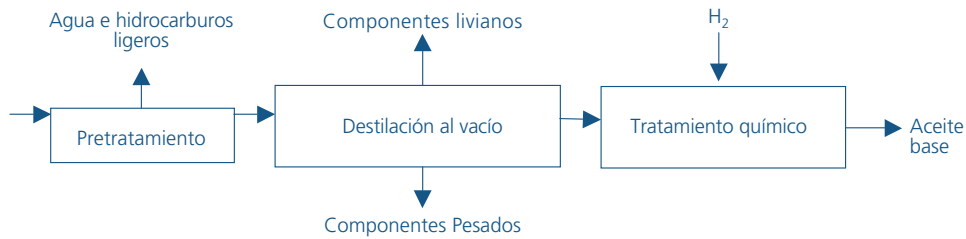
Las refinerías de aceites de desecho están concebidas para producir aceite de base para mezclas, algunos subproductos y algunos desechos. Las partes livianas de los subproductos pueden usarse como combustible; las más pesadas, que contienen aditivos y especies carbonáceas, como componente de mezcla en superficies de carreteras.

Son cinco las tecnologías que caracterizan a las refinerías de aceites de desecho:

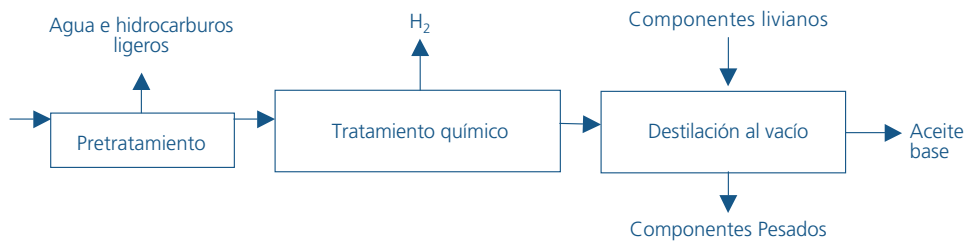
4.1 Destilación al vacío + tratamiento con arcilla



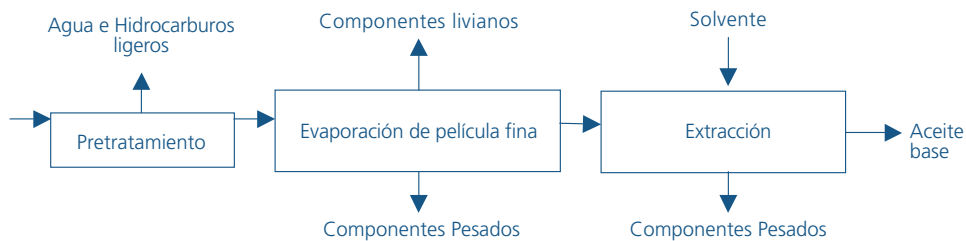
4.2 Destilación al vacío + tratamiento químico



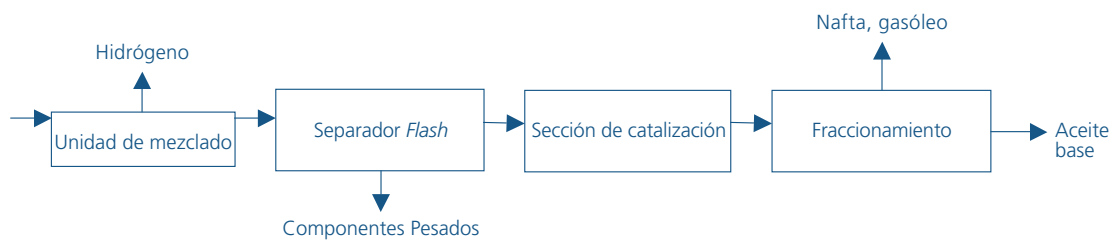
4.3 Hidrotratamiento previo + destilación al vacío



4.4 Evaporación de película fina + extracción



4.5 Hidrogenación por contacto directo (proceso UOP –DHC)



5. Medidas para reducir dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos policlorados (PCDF) y bifenilos policlorados (PCB)

Como se mencionó anteriormente, los PCDD/PCDF y PCB presentes en el aceite base o residuo de las refinerías de aceites de desecho emanan de aceites usados contaminados, por lo que una medida esencial para reducir estos compuestos consiste en tratar sólo aceites de desecho que contengan concentraciones bajas de estas sustancias.

La Asociación Europea de la Industria de la Refinación (Groupement Européen de l'Industrie de la Régénération; GEIR) recomendó los siguientes aceites de desecho para su regeneración:

- Aceite de motor sin cloro
- Aceites hidráulicos sin cloro
- Aceites diatérmicos minerales no clorados

6. Conclusiones

- Se ha observado que los aceites de desecho están contaminados con PCDD, PCDF y con bifenilos policlorados (PCB).
- Por ahora no hay pruebas de nueva formación de PCDD, PCDF y PCB en las refinerías de aceites usados.
- Las refinerías de aceites de desecho son una fuente de distribución de sustancias del Anexo C más que una fuente de formación de las mismas.
- Los aceites de desechos tratados en las refinerías deben tener un contenido bajo de PCDD, PCDF, PCB y aditivos clorados.

Referencias

Hagenmaier H. and H. Brunner. 1986. Bestimmung polychlorierter Dibenzodioxine und polychlorierter Dibenzofurane in Motorölen, Altölen und Zweitraffinaten. Fresenius Z. Anal.Chem.324, 23-26

Ruiz E. 1991. "Aceites Lubricantes para Motores a Gasolina." In: *Material del Curso de Educación Continuada: Fundamentos Básicos de Lubricantes*. Bogotá, Colombia.



<http://www.pops.int>

UNEP/SSC/BATBEP/2008/18

Sección VI.M
Sección VI.L
Sección VI.K
Sección VI.J
Sección VI.I
Sección VI.H
Sección VI.G
Sección VI.F
Sección VI.E
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección VI.D
Sección VI.C
Sección VI.B
Sección VI.A
Sección V.A
Sección V.B
Sección V.C
Sección V.D
Sección V.E
Sección V.F
Sección V.G
Sección V.H
Sección V.I
Sección V.J
Sección V.K
Sección V.L
Sección V.M
Sección V.N
Sección V.O
Sección V.P
Sección V.Q
Sección V.R
Sección V.S
Sección V.T
Sección V.U
Sección V.V
Sección V.W
Sección V.X
Sección V.Y
Sección V.Z
Sección VI.A
Sección VI.B
Sección VI.C
Sección VI.D
Sección VI.E
Sección VI.F
Sección VI.G
Sección VI.H
Sección VI.I
Sección VI.J
Sección VI.K
Sección VI.L
Sección VI.M