

Sección VI

**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**

Índice

Lista de tablas	i
Lista de figuras.....	i
VI.D Combustión de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas y calderas industriales	1
1. Introducción.....	1
1.1 Información general sobre calderas	1
1.2 Tipos de calderas	2
2. Generación de PCDD/PCDF, PCB y HCB de la combustión	3
2.1 PCDD y PCDF.....	4
2.2 PCB y HCB.....	5
3. Efecto del tipo de combustible en la generación de emisiones	5
3.1 Combustóleo ligero y gas natural	5
3.2 Combustóleo pesado	5
3.3 Carbón.....	6
3.4 Lignito.....	6
3.5 Co-combustión con otros tipos de combustibles.....	6
4. Estimación de emisiones de contaminantes orgánicos persistentes de calderas.....	7
5. Mejores prácticas ambientales.....	8
6. Mejores técnicas disponibles	8
6.1 Medidas primarias.....	8
6.2 Medidas secundarias: Dispositivos de control de la contaminación atmosférica.....	10
6.3 Otras consideraciones	10
7. Niveles de desempeño asociados con mejores técnicas disponibles	11
Referencias	13
Otras fuentes	14

Lista de tablas

Tabla 1. Factores de emisión para plantas termoeléctricas del sector que utilizan combustibles fósiles	7
Tabla 2. Concentraciones orgánicas residuales (ng/Sm ³ a 12% de O ₂) ^a de la quema de combustibles derivados de desechos.....	9
Tabla 3. Síntesis de medidas recomendadas para calderas industriales y de termoeléctricas.....	10

Lista de figuras

Figura 1. Partes de la caldera donde se pueden formar PCDD y PCDF	4
---	---

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 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).

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 piro-tubulares: 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 dibenzoparadióxinas 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.

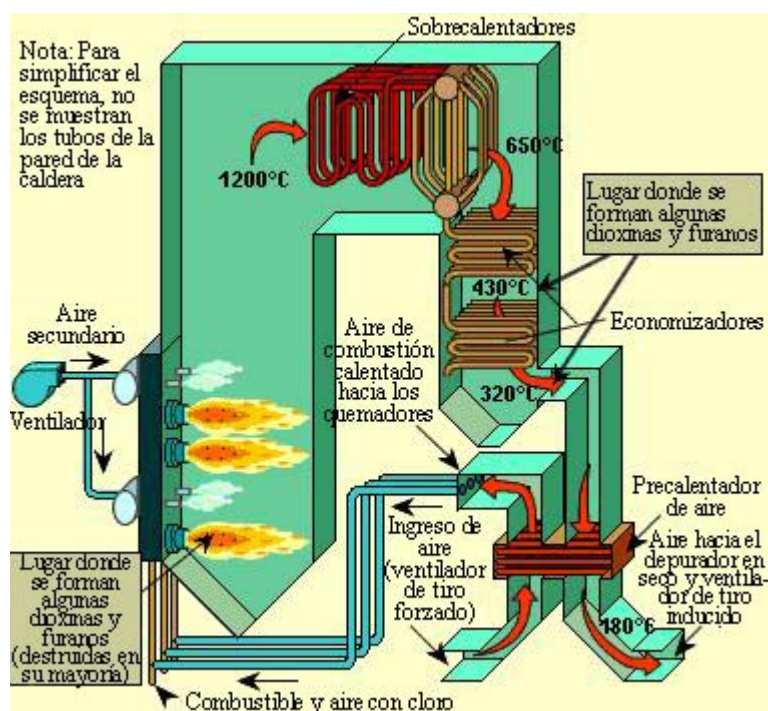
2.1 PCDD y PCDF

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, Karidjo 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, Güting 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, V.E y V.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

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.

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 - μg 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	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.

Aspecto	Mejores prácticas ambientales	Mejores técnicas disponibles	Ventajas ambientales
	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.		
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 ^a 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.eea.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.
- Kreisz 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.