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 biomasas como combustible

PNUMA

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

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.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

ÍNDICE

VI.E Instalaciones de quema de madera y otras biomasas 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 biomasas 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 biomasas 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

VI.E Instalaciones de quema de madera y otras biomasas como combustible

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/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).

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 biomasas 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 biomasas 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 biomasas 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 biomasas	<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.

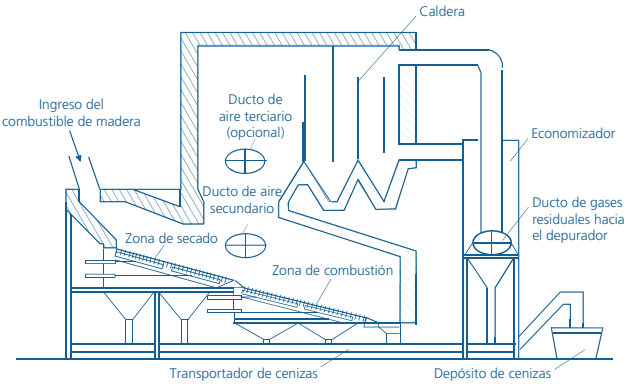
Fuente: Nussbaumer 2003.

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 vibradoras (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 vibratorias 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.

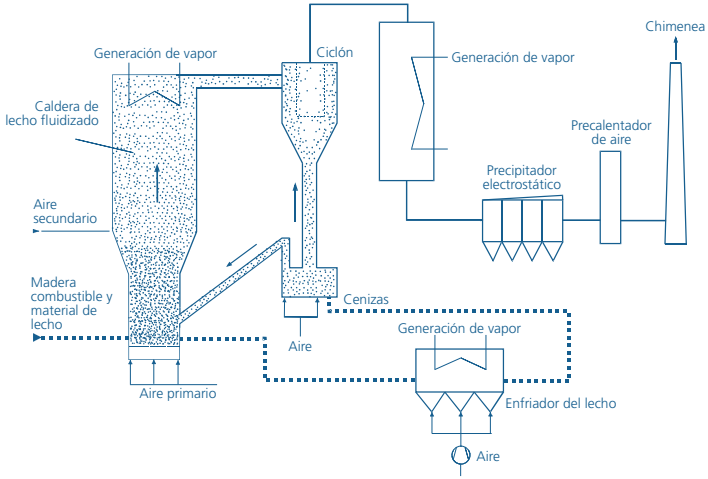
Se puede suprimir la corrosión inducida por cloro a altas temperaturas instalando el último sobrecalentador en el lecho. En comparación con muchas otras tecnología de combustión, la baja temperatura de combustión en los sistemas de lecho fluidizado ofrece varias ventajas operativas para el control de 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 burbujeante (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 ulteriores 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 biomasas

Otras biomasas 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/Nm^3 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/Nm^3 (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 ($CaCO_3$), cal (CaO) y cal hidratada ($Ca(OH)_2$). Los agentes cálcicos eliminan dióxido de azufre (SO_2), 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-/m³ (a 11% O_2)[a]	PCDD/PCDF máx. ng EQT-I/m³ (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_4Cl)	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 biomasas

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/Nm^3 a 13% de O_2 (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/m³
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/m^3. Las concentraciones de PCB fueron de a 40–81 ng/m^3 (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 m^3 (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/Nm^3 (nivel de emisión de polvo: 10 mg/Nm^3).

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°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.

http://www.pops.int
UNEP/SSC/BATBEP/2008/10