

**Mejor tecnología disponible para el  
control de la contaminación atmosférica en América del Norte:  
directrices para el análisis y estudios de caso**

Elaborado para la:  
Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte  
393 St-Jacques Street West  
Montreal, Quebec  
Canadá  
H2Y 1N9

Por:  
MJ Bradley & Associates  
1000 Elm Street  
Second Floor  
Manchester, NH 03101  
EU

Febrero de 2005

# Índice

Índice de cuadros .....	5
Acrónimos y siglas.....	6
1.0 Introducción .....	8
2.0 Antecedentes .....	10
2.1 Permisos para fuentes nuevas .....	10
2.1.1 Permisos para la prevención del deterioro significativo .....	10
2.1.2 Permisos para zonas en incumplimiento.....	10
2.2 Planes estatales de instrumentación.....	11
2.3 Permisos de construcción.....	11
3.0 Procedimientos para instrumentar la MTD.....	12
3.1 Paso 1: Identificar las tecnologías de control posibles .....	12
3.2 Paso 2: Eliminar las opciones inviables.....	12
3.3 Paso 3: Clasificar y ordenar las opciones viables .....	13
3.4 Paso 4: Evaluar la opción más eficaz.....	13
3.5 Paso 5: Seleccionar la MTCD.....	14
4.0 El Centro de Información RBLC .....	15
5.0 Actuales tecnologías de control de emisiones .....	20
5.1 Materia prima.....	20
5.2 Condiciones del proceso .....	20
5.3 Equipo para el control de emisiones .....	20
5.3.1 Control de óxidos de nitrógeno.....	21
5.3.2 Control de partículas .....	21
5.3.3 Control de compuestos orgánicos volátiles.....	22
5.3.4 Control de dióxido de azufre.....	24
6.0 Fuentes de información.....	25
6.1 Reglamentación federal estadounidense .....	25
6.2 Publicaciones .....	26
6.3 Dependencias estatales.....	27
6.4 Asociaciones comerciales .....	27
6.5 Distribuidores de equipo.....	28
6.6 Relatorías y memorias.....	29
7.0 Estudio de caso: motor diesel alternativo fijo.....	30
7.1 Especificaciones del proyecto.....	30
7.2 Cálculo de emisiones .....	30
7.3 Base de datos RBLC .....	31
7.4 Reglamentos vigentes en EU .....	33
7.5 Recursos para las opciones de control de emisiones .....	33
7.6 Revisión de las opciones para el control de emisiones de NO <sub>x</sub> .....	33
7.6.1 Reducción catalítica selectiva.....	33
7.6.2 Reducción selectiva no catalítica.....	34
7.6.3 Reducción catalítica no selectiva.....	35
7.6.4 Controles de combustión.....	35
7.7 Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO.....	35
7.7.1 Catalizadores de oxidación .....	35

7.8	Revisión de las opciones para el control de las emisiones de SO <sub>2</sub> .....	36
7.8.1	Diesel con ultrabajo contenido de azufre.....	36
7.9	Conclusiones del análisis MTD .....	37
8.0	Estudio de caso: caldera alimentada con combustóleo.....	40
8.1	Especificaciones del proyecto.....	40
8.2	Cálculo de emisiones .....	40
8.3	Base de datos RBLC .....	41
8.4	Reglamentos vigentes en EU .....	43
8.5	Recursos para las opciones de control de emisiones .....	43
8.6	Revisión de las opciones para el control de emisiones de NO <sub>x</sub> .....	44
8.6.1	Recirculación de gases de combustión .....	44
8.6.2	Reducción del aire de combustión .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
8.6.3	Encendido polarizado de quemadores .....	44
8.6.4	Reducción selectiva no catalítica.....	45
8.6.5	Reducción catalítica selectiva.....	45
8.6.6	Sustitución por combustibles menos contaminantes.....	46
8.7	Revisión de las opciones para el control de emisiones de SO <sub>2</sub> .....	46
8.7.1	Desulfuración de gases de combustión.....	46
8.7.2	Sustitución por combustibles menos contaminantes.....	47
8.8	Revisión de las opciones para el control de emisiones de partículas suspendidas	
	47	
8.8.1	Precipitadores electrostáticos.....	47
8.8.2	Filtros de tela.....	47
8.8.3	Ciclones.....	48
8.8.4	Lavadores.....	48
8.8.5	Sustitución por combustibles menos contaminantes.....	48
8.9	Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO.....	48
8.9.1	Prácticas de combustión adecuadas .....	48
8.9.2	Catalizadores de oxidación .....	49
8.9.3	Catalizadores de CO .....	49
8.10	Conclusiones del análisis MTD .....	49
9.0	Estudio de caso: horno cementero que utiliza llantas como combustible	
	alternativo .....	51
9.1	Especificaciones del proyecto.....	51
9.2	Cálculo de emisiones .....	54
9.3	Base de datos RBLC .....	54
9.4	Reglamentos vigentes en EU .....	54
9.5	Opciones para el control de emisiones.....	55
9.6	Tecnologías para el control de partículas.....	55
9.6.1	Precipitadores electrostáticos.....	55
9.6.2	Lavadores húmedos .....	56
9.6.3	Filtros de tela.....	56
9.6.4	Ciclones.....	57
9.7	Revisión de opciones para el control de emisiones de NO <sub>x</sub> .....	57
9.7.1	Quemadores de baja producción de NO <sub>x</sub> .....	57
9.7.2	Reducción selectiva no catalítica.....	58

9.7.3 Reducción catalítica selectiva .....	59
9.8 Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO.....	59
9.8.1 Prácticas adecuadas de combustión .....	59
9.8.2 Catalizadores de oxidación .....	59
9.8.3 Catalizadores de CO .....	59
9.9 Revisión de las opciones para el control de emisiones de SO <sub>2</sub> .....	60
9.9.1 Desulfuración de gases de combustión .....	60
9.10 Conclusiones del análisis MTD .....	60
Apéndice A – Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas.....	62
Apéndice B – Normas Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos .....	62

## Índice de cuadros

Cuadro 1	Informe de emisiones para los criterios de búsqueda definidos, RBLC .....	17
Cuadro 2	Información sobre establecimientos, RBLC .....	18
Cuadro 3	Información sobre contaminantes, RBLC.....	19
Cuadro 4	Resultados de la búsqueda de emisiones de NO <sub>x</sub> producidas por motores de combustión interna, RBLC.....	31
Cuadro 5	Resultados de la búsqueda de emisiones de CO producidas por motores de combustión interna, RBLC.....	32
Cuadro 6	Análisis de costos del control de NO <sub>x</sub> por SCR para un motor de combustión interna.....	38
Cuadro 7	Resultados de la búsqueda de emisiones de NO <sub>x</sub> producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC.....	41
Cuadro 8	Resultados de la búsqueda de emisiones de PS producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC.....	42
Cuadro 9	Resultados de la búsqueda de emisiones de CO producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC.....	43
Cuadro 10	Análisis de costos del control de NO <sub>x</sub> por SCR para una caldera alimentada con combustóleo.....	45
Cuadro 11	Lista de establecimientos estadounidenses y canadienses que utilizan llantas como combustible.....	52

## Acrónimos y siglas

ASTM	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
Btu	unidad térmica inglesa ( <i>British thermal unit</i> )
CAP	contaminante atmosférico peligroso
CAT	Caterpillar™
CATC	Centro de Tecnología del Aire Limpio ( <i>Clean Air Technology Center</i> )
CDL	combustible derivado de llantas
CFR	Código de Reglamentos Federales ( <i>Code of Federal Regulations</i> )
COV	compuestos orgánicos volátiles
CO	monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
EGR	recirculación de gases de escape (EGR, por sus siglas en inglés)
EPA	Agencia de Protección Ambiental de EU ( <i>Environmental Protection Agency</i> )
FGD	desulfuración de gases de combustión (FGD, por sus siglas en inglés)
FGR	recirculación de gases de combustión (FGR, por sus siglas en inglés)
HCNM	hidrocarburo no metánico
HCT	hidrocarburos totales
HCNQ	hidrocarburos no quemados
hp	caballo de fuerza
kW	kilowatt
LAER	menor tasa de emisión factible (LAER, por sus siglas en inglés)
LNB	quemador de baja producción de NO <sub>x</sub> (LNB, por sus siglas en inglés)
MACT	Máxima Tecnología de Control Factible (MACT, por sus siglas en inglés)
mcm	metros cúbicos por minuto
MTCO/MTD	mejor tecnología de control disponible/mejor tecnología disponible
NAA	Zonas en Incumplimiento (NAA, por sus siglas en inglés)
NAAQS	Normas Nacionales de Calidad del Aire (NAAQS, por sus siglas en inglés)
NEET	Tecnologías Ambientales Nuevas e Incipientes (NEET, por sus siglas en inglés)
NESHAP	Normas Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos (NESHAP, por sus siglas en inglés)
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrógeno
NSCR	reducción catalítica no selectiva (NSCR, por sus siglas en inglés)
NSPS	Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas (NSPS, por sus siglas en inglés)
NSR	Revisión de Fuentes Nuevas (NSR, por sus siglas en inglés)
PE	precipitador electrostático
ppm	partes por millón
PS	partículas suspendidas
PSD	Prevención del Deterioro Significativo (PSD, por sus siglas en inglés)
RAC	Reducción del aire de combustión

RBLC	Centro de Información RBLC, de la EPA ( <i>RACT, BACT, LAER Clearinghouse</i> )
SCR	reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)
SNCR	reducción selectiva no catalítica (SNCR, por sus siglas en inglés)
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
SO <sub>x</sub>	óxidos de azufre
TCRD	tecnología de control razonablemente disponible
tpa	toneladas por año
TTN	Red de Transferencia de Tecnología (TTN, por sus siglas en inglés)
ULSD	dísel con ultrabajo contenido de azufre (ULSD, por sus siglas en inglés)

## 1.0 Introducción

El presente manual de orientación sobre las mejores tecnologías disponibles (MTD), elaborado para especialistas en regulación de la calidad del aire de América del Norte, brinda una explicación detallada del proceso de análisis de las MTD utilizado en Estados Unidos e incluye tres estudios de caso para: 1) motores alternativos fijos, 2) plantas de generación eléctrica alimentadas con combustóleo o aceite residual y 3) hornos cementeros que utilizan llantas usadas como combustible.

El manual detalla cada paso del proceso de análisis de MTD que la EPA utiliza para la concesión de autorizaciones a fuentes estacionarias de emisiones a la atmósfera. Además de explicar el principio general de cada uno de los pasos, éstos se ejemplifican mediante tres estudios de caso específicos. El primer paso del análisis de MTD consiste en identificar los diferentes dispositivos de control de emisiones viables para una fuente en particular; luego, para determinar la mejor opción, procede evaluar el impacto ambiental, energético y económico de cada opción de control viable.

En el documento se explica cómo utilizar las principales fuentes de información, entre otras el Centro de Información RBLC (*RACT, BACT, LAER Clearinghouse*) de la EPA. Asimismo, se presentan técnicas para adquirir información de entidades federativas de Estados Unidos que pueden no estar incluidas en el RBLC. Se enlistan otras fuentes de información sobre tecnología para el control de emisiones, tales como distribuidores de equipo, asociaciones de comercio, publicaciones de la EPA y la normatividad vigente (es decir, las normas de desempeño para fuentes nuevas [*new source performance standards, NSPS*], con arreglo al CFR 40 parte 60, y las normas sobre máxima tecnología de control factible [*maximum achievable control technology standards, MACT*], conforme al CFR 40 parte 63).

El aspecto del análisis MTD correspondiente al impacto económico incluye hojas de cálculo específicas para el análisis de costos formuladas a partir de las directrices del *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire (EPA Air Pollution Control Cost Manual; EPA 452/B-02-001)*,<sup>1</sup> con una explicación de los principales factores de insumo. Se presenta un listado de recursos informativos de otras categorías de fuentes, incluida una lista de las direcciones en Internet de documentos con reseñas tecnológicas elaboradas por distribuidores de equipo, así como un compendio de asociaciones de comercio participantes en el control de emisiones.

En última instancia, el resultado de un análisis MTD es la determinación de una tasa de emisión que puede alcanzarse. Si bien es cierto que mediante el análisis MTD puede identificarse un tipo específico de dispositivo de control de emisiones, finalmente el requisito reglamentario para otorgar una autorización es la tasa de emisión resultante. Por ello es que el análisis MTD se realiza caso por caso. Aun cuando la industria posiblemente no aprecie que el objetivo para la MTD está cambiando constantemente,

---

<sup>1</sup> Disponible en: <<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html#cccinfo>>

este hecho permite a las dependencias reguladoras presionar para que con el tiempo se vayan incorporando avances tecnológicos en los controles de emisión.

En Estados Unidos, los requisitos para realizar un análisis MTD forman parte del proceso de otorgamiento de permisos de construcción. Corresponde a los funcionarios responsables de la revisión reglamentaria tener un adecuado conocimiento de las tecnologías de control de emisiones a efecto de evaluar en forma objetiva los análisis MTD presentados por los solicitantes de autorizaciones.

*Nota: Todas las cifras monetarias de este documento se expresan en dólares estadounidenses.*

## **2.0 Antecedentes**

A continuación se presenta una explicación sobre la forma en que la EPA ha incorporado el análisis MTD en sus requisitos reglamentarios.

### **2.1 Permisos para fuentes nuevas**

En Estados Unidos los reglamentos federales denominados “permisos para fuentes nuevas” exigen a las principales fuentes nuevas (o a establecimientos de importancia que emprenden modificaciones de cierta envergadura) obtener una autorización previa con arreglo al programa Revisión de Fuentes Nuevas (*New Source Review*, NSR) antes de dar inicio a la construcción de una fuente de contaminantes atmosféricos. Los requisitos federales varían para las distintas zonas del país, dependiendo de si la calidad del aire en la zona cumple con las Normas Nacionales de Calidad del Aire (*National Ambient Air Quality Standards*, NAAQS). Las regiones en incumplimiento estarán obligadas a ceñirse a requisitos más estrictos, de acuerdo con el programa Zonas en Incumplimiento (*Non-attainment Area*, NAA).

#### **2.1.1 Permisos para la prevención del deterioro significativo**

Los permisos del programa Prevención del Deterioro Significativo (*Prevention of Significant Deterioration*, PSD) exigen a los solicitantes analizar todas las opciones de control de la contaminación técnicamente viables y demostrar que la(s) tasa(s) de emisión propuesta(s) efectivamente corresponden a la mejor tecnología de control disponible (MTCD). Un análisis MTCD evalúa cada alternativa de control de emisiones en términos de su impacto energético, ambiental y económico. El procedimiento se denomina MTCD descendente, lo que significa que la tasa más baja de emisión posible deberá ser la primera a considerar. La técnica de control con la menor tasa de emisión sólo podrá descartarse si existen razones energéticas, ambientales o económicas justificadas. De ser así, podrá considerarse entonces la técnica de control con la siguiente menor tasa de emisión. La secuencia continúa hasta que se identifica una tasa de emisión como la MTCD. Otro requisito PSD consiste en evaluar el impacto proyectado de las nuevas emisiones en los niveles del aire ambiente, a efecto de demostrar que la zona en cumplimiento no dejará de estarlo.

#### **2.1.2 Permisos para zonas en incumplimiento**

Para otorgar permisos conforme al programa NAA es preciso que los solicitantes analicen todas las opciones de control técnicamente viables y demuestren que la(s) tasa(s) de emisión propuesta(s) corresponden a la menor tasa de emisión factible (LAER, por sus siglas en inglés). Al igual que con el análisis MTCD, un análisis LAER sigue un procedimiento descendente, pero sólo evalúa factores energéticos y ambientales. Otro de los requisitos NAA exige adquirir créditos por compensación de emisiones en cantidad tal que se registre una disminución neta de las emisiones en la zona de incumplimiento.

## **2.2 Planes estatales de instrumentación**

Los requisitos para el otorgamiento de permisos federales se aplican a las principales fuentes nuevas o a modificaciones de envergadura en las fuentes de importancia ya establecidas. Con todo, cada estado puede tener su propio programa de permisos de construcción para fuentes de contaminación atmosférica menores. Muchas entidades federativas estadounidenses han incorporado el requisito del análisis MTCD a sus requerimientos para la concesión de permisos de construcción a fuentes menores. Para las fuentes existentes ubicadas en zonas de incumplimiento, la EPA exige a las autoridades estatales aplicar reglamentos que obligan a instalar controles de emisión mejorados, a efecto de que la zona se apegue a las normas establecidas. El nivel de control de emisiones para fuentes existentes corresponde a la “tecnología de control razonablemente disponible” (TCRD). El cumplimiento con este nivel se reevalúa cada año mediante el monitoreo ambiental. Si no se logra el cumplimiento, el estado reducirá sus límites TCRD.

## **2.3 Permisos de construcción**

Como se señaló arriba, la mayoría de los estados tienen su propia normatividad para el otorgamiento de permisos de construcción para fuentes que se encuentran por debajo del nivel de aplicabilidad del programa NSR. En muchos estados, los requerimientos para los permisos de construcción incorporan el uso de las MTCD, lo que permite a los revisores responsables de otorgar los permisos presionar para que se adopte un mejor control de emisión (emisiones reducidas) caso por caso.

### **3.0 Procedimientos para instrumentar la MTD**

Son varios los factores a considerar al elegir cuál de las opciones de control de emisiones representa la mejor tecnología disponible (MTD). Desde una perspectiva ambiental, la mejor opción es la que reduce al mínimo los niveles totales de emisión del contaminante en cuestión. Sin embargo, el uso de la opción más eficaz para el control de la contaminación no siempre es viable, en virtud del impacto económico, energético, ambiental o técnico que puede entrañar. Por consiguiente, se utiliza un proceso descendente para determinar cuál tecnología o proceso sería el más adecuado para cada aplicación específica. Este método es relativamente rápido y simple, y puede reproducirse con facilidad para todos los contaminantes y fuentes examinadas. El presente apartado describe el proceso en detalle.

En Estados Unidos el nivel de emisión umbral a partir del cual es preciso realizar un análisis MTD está dado por una fuente nueva de importancia (de 100 a 250 toneladas por año [tpa]) o bien por modificaciones de envergadura en alguna fuente principal existente (incremento de entre 10 y 50 tpa). Algunos estados ponen en marcha el proceso MTD para autorizar un nuevo proceso con aumentos en las emisiones mayores que una tonelada anual.

#### ***3.1 Paso 1: Identificar las tecnologías de control posibles***

El primer paso en un análisis descendente estriba en identificar todas las opciones de control disponibles, es decir, las tecnologías o técnicas de control de la contaminación con potencial práctico para aplicarse en la unidad de emisión y al contaminante sometidos a evaluación. Las tecnologías y técnicas de control de la contaminación comprenden la aplicación de procesos de producción o métodos, sistemas y técnicas disponibles, incluidas técnicas de limpieza o tratamiento de combustibles, o técnicas innovadoras de combustión para el control del contaminante en cuestión, así como tecnologías utilizadas en otras partes del mundo. Las tecnologías requeridas en conformidad con las determinaciones LAER están disponibles para efectos del proceso MTCD y también han de incluirse como opciones de control; de hecho, suelen representar la mejor alternativa.

#### ***3.2 Paso 2: Eliminar las opciones inviables***

El segundo paso consiste en evaluar la viabilidad técnica de las opciones de control identificadas en el paso uno con respecto de los factores específicos para la fuente (o unidad de origen de las emisiones), y eliminar del proceso de análisis MTCD todas aquellas que no resultan viables desde el punto de vista técnico. La determinación de que una opción es inviable técnicamente deberá documentarse en forma clara, demostrando —con base en principios físicos, químicos y de ingeniería— la existencia de dificultades técnicas que impedirían el uso exitoso de la opción de control.

### **3.3 Paso 3: Clasificar y ordenar las opciones viables**

En el paso 3, todas las opciones de control que no fueron eliminadas en el paso 2 se clasifican y ordenan en función de su eficacia general para controlar las emisiones del contaminante en cuestión. Para cada contaminante y para cada fuente o unidad de emisión objeto del análisis MTCD deberá integrarse una lista en la que se presente el conjunto de opciones viables en orden descendente (la alternativa más eficaz en primer lugar) y que incluya los siguientes datos:

- Reducciones en las emisiones (porcentaje del contaminante eliminado)
- Tasa de emisión prevista (toneladas por año, kilogramos por hora)
- Impacto en términos energéticos
- Impacto ambiental (incluye cualquier efecto significativo o inusual en otros medios, tales como agua o residuos sólidos, y sus efectos en contaminantes atmosféricos tóxicos o peligrosos)
- Impacto económico (rentabilidad)

Un solicitante que proponga la primera alternativa de control de la lista no necesitará presentar los costos y demás información detallada del resto de las opciones. En tales casos, los solicitantes deberán comprobar, a satisfacción de la dependencia responsable de la revisión, que la opción elegida efectivamente es la primera del listado.

### **3.4 Paso 4: Evaluar la opción más eficaz**

Luego de identificar las opciones de control disponibles y técnicamente viables, se evalúan los factores energéticos, ambientales y económicos asociados, a efecto de llegar al nivel final de control. En este punto el análisis presenta los impactos asociados con las opciones de control incluidas en el listado. Para cada opción, el solicitante tiene la responsabilidad de presentar una evaluación objetiva de los diferentes tipos de impacto. Deberán examinarse y, siempre que sea posible, cuantificarse los efectos, tanto benéficos como negativos. En general, el análisis MTCD deberá centrarse en el impacto directo de la alternativa de control.

Si el solicitante acepta la primera opción de la lista como la MTCD y no hay aspectos que llamen la atención en lo que se refiere a efectos ambientales colaterales, el análisis ha concluido y los resultados se proponen como MTCD. En caso de que se determine que la opción de control candidata es inadecuada, debido a su impacto energético, ambiental o económico, se deberá justificar el hallazgo y elegir la siguiente opción más estricta como nueva alternativa de control candidata a evaluar en forma similar. Este proceso continúa hasta que la tecnología bajo consideración no pueda ya eliminarse por ningún impacto ambiental, energético o económico específico de la fuente que demuestre que la opción es inadecuada como MTCD.

El impacto económico tiende a ser el factor más directo, en la medida en que los aspectos ambiental y energético a menudo pueden resolverse a partir de sistemas más caros. La

determinación de lo que es económicamente viable se obtiene mediante una evaluación subjetiva, caso por caso, realizada por la dependencia reguladora. El propósito es establecer un nivel aceptable de impacto de costo. Como tal, el impacto de costo (dólares por tonelada anual de emisiones reducidas) que se determine como económicamente viable puede simplemente ser el valor que se haya acordado gastar en otra operación de proceso similar

En Estados Unidos se considera que los sistemas de control de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son económicamente asequibles a costos de entre \$10,000 y \$15,000 por tpa, en tanto que los controles de emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) son menos costosos, y su viabilidad económica suele ubicarse en el nivel de \$1,000 a \$3,000 por tpa.

### **3.5 Paso 5: Seleccionar la MTCD**

En este punto deberá haberse elegido ya una opción como la mejor alternativa disponible y viable para la disminución de emisiones. También deberá contarse con documentación suficiente para apoyar esta decisión. Ambas, la decisión sobre la mejor opción y toda la documentación pertinente que sirvió de base para tomarla, se presentan a revisión ante un funcionario ambiental. En última instancia, corresponde al revisor decidir cuál es la mejor y más razonable opción de control. Este proceso —ejemplificado en los estudios de caso que se presentan en los apartados 7 a 9— se repite para cada contaminante y cada proceso de interés.

Es importante señalar que el nivel de control objetivo para la MTD es cambiante. A medida que las tecnologías de control de emisiones mejoren y los impactos de costo disminuyan, las tasas de emisión consideradas para la MTD descenderán gradualmente, lo cual constituye precisamente el objetivo del programa. Por ejemplo, hace algunos años las turbinas de gas tenían una norma de desempeño de fuente nueva de 65 partes por millón (ppm) de NO<sub>x</sub>. Con las mejoras a la tecnología de combustión fue posible que las emisiones de las turbinas se ubicaran en 42 ppm. Luego, con el uso de la inyección de agua o vapor, se logró un nivel de 9 ppm. Ahora, con la introducción de la reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) como sistemas de tratamiento poscombustión para el control de NO<sub>x</sub>, en Estados Unidos se está exigiendo que las turbinas cumplan un nivel MTD de apenas 2 ppm.

## 4.0 El Centro de Información RBLC

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos mantiene una base de datos pública que recopila las diversas técnicas de control de emisiones aprobadas como TCRD (RACT, por sus siglas en inglés), MTCO (BACT, por sus siglas en inglés) o LAER durante un proceso de emisión de permisos a fuentes estacionarias. La base de datos se denomina Centro de Información RBLC (*RACT, BACT, LAER Clearinghouse*) y puede consultarse mediante la página en Internet de la EPA (Centro de Tecnología del Aire Limpio [*Clean Air Technology Center, CATC*], Red de Transferencia de Tecnología [*Technology Transfer Network, TTN*]), en: <[www.epa.gov/ttn/catc](http://www.epa.gov/ttn/catc)>.

Este apartado describe la estructura de dicha página y explica cómo utilizar en forma eficaz el RBLC para buscar proyectos anteriores, sus tasas de emisión objetivo o las prácticas que cada establecimiento utilizó para lograr el cumplimiento. Las palabras o frases en negritas indican vínculos activos en la página en Internet del RBLC.

El RBLC tiene cuatro niveles de búsqueda, desde básica hasta avanzada, y contiene una biblioteca de referencia (**Reference Library**) que enlaza con otra información técnica, así como un cuadro de herramientas (**Tool Box**) con vínculos a herramientas o programas de apoyo en el análisis MTD. Las posibilidades de búsqueda incluyen:

- *Búsqueda básica* (**Basic Search**), que es la de más fácil uso;
- *Búsqueda de la menor tasa de emisión* (**Find Lowest Emission Rate**), que produce un resultado básico ordenado automáticamente por tasa de emisión (actualmente sólo disponible para fuentes de combustión);
- *Búsqueda estándar* (**Standard Search**), que permite cualquier combinación de 24 criterios de búsqueda, y
- *Búsqueda avanzada* (**Advanced Search**), que puede utilizarse para una búsqueda más compleja.

Actualmente, el RBLC abarca más de 5,184 establecimientos, con más de 13,378 procesos. Sin embargo, la introducción de datos a la base es una iniciativa voluntaria de las entidades federativas, por lo que posiblemente no exista registro de todas las determinaciones de MTCO en Estados Unidos. Asimismo, los retrasos en el proceso de alimentación de datos pueden traducirse en un rezago de hasta un año en las determinaciones más recientes. Para cada determinación de MTCO incorporada en la base de datos se identifica el nombre de un contacto a quien se puede solicitar información adicional.

El cuadro 1 presenta un ejemplo de búsqueda realizada en el RBLC con la función de *menor tasa de emisión* (**Lowest Emission Rate**). En este caso se hizo una búsqueda específica sobre emisiones de NO<sub>x</sub> de calderas industriales alimentadas con combustóleo o aceite residual, para el periodo 2000-2004. El cuadro 2 ilustra la información adicional sobre establecimientos y control de emisiones disponible a través de la opción **RBLC ID**. Otra información clave es la de la persona de contacto estatal (por lo general, el ingeniero

responsable de otorgar los permisos para la determinación de MTCD). El cuadro 3 ejemplifica la información adicional sobre contaminantes disponible al pulsar la opción *límite de emisión estándar* (**Standard Emission Limit**), entre la que se incluye una descripción de la técnica de control propuesta.

**Cuadro 1 Informe de emisiones para los criterios de búsqueda definidos, RBLC**

Pollutant: NOx  
 Process Category: Industrial-Size Boilers/Furnaces (more than 100 million Btu/hr, up to/including 250 million Btu/hr)  
 Process Type: 12.210  
 Process Name: Residual Fuel Oil (ASTM # 4,5,6)  
 Permit Date between 12/15/2000 and 12/15/2004

RBLC ID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT
<input type="checkbox"/> Check			
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">NC-0092</a>	05/10/2001	INTERNATIONAL PAPER COMPANY RIEGELWOOD MILL	<a href="#">0.3670 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">VA-0270</a>	03/31/2003	VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY VCU EAST PLANT	<a href="#">0.4000 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">VA-0278</a>	03/31/2003	Virginia Commonwealth University VCU EAST PLANT	<a href="#">0.4000 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">OR-0031</a>	03/02/2001	POPE & TALBOT, INC HALSEY PULP MILL	<a href="#">0.4700 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">OR-0031</a>	03/02/2001	POPE & TALBOT, INC HALSEY PULP MILL	<a href="#">0.4700 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/> <a href="#">OH-0241</a>	11/15/2001	MILLER BREWING COMPANY MILLER BREWING COMPANY - TRENTON	<a href="#">0.7000 LB/MMBTU</a>
<input type="checkbox"/> Check			

## Cuadro 2 Información sobre establecimientos, RBLC

Date Entered: 03/18/2004

Date Last Modified: 05/17/2004

FINAL

RBLC ID: NC-0092

Corporate/Company: INTERNATIONAL PAPER COMPANY

Facility Name: RIEGELWOOD MILL

Facility Description: PAPER MILL

State: NC

Zip Code: 28456

County: COLUMBUS

EPA Region: 4

### Facility Contact Information:

Name: EDWARD KRUEL

Phone:

E-Mail:

### Agency Contact Information:

Agency: NC001 - NORTH CAROLINA DIV OF ENV MGMT

Contact: Mr. Fred Langenbach

Address: NC Div. of Environment Mgmt.  
Air Quality Section  
1641 Mail Service Center

Raleigh, NC 27699

Phone: (919)715-6242

Other Agency RICHARD LASATER

Contact Info: NC  
(919) 715-6244

Permit Number: 03138R16

Permit Type: B: ADD NEW PROCESS TO EXISTING FACILITY  
C: MODIFY EXISTING PROCESS AT EXISTING FACILITY

EST/ACT DATE

Application Accepted Date: ACT 01/22/2001

Permit Date: ACT 05/10/2001

FRS Number: 110000861620

SIC: 2621

NAICS: 322121

### Affected Class I / US Border Area:

Distance to Area

Area Name

-----

-----

210 km

Swanquarter, NC

220 km

Cape Romain, SC

### Facility-Wide Emission Increase/Decrease: (After prevention/control measures)

No facilitywide emissions data available for this facility.

### Other Permitting Information:

MODIFICATION FOR INSTALLATION OF NEW EQUIPMENT TO INCREASE PRODUCTION CAPACITY.

### Cuadro 3 Información sobre contaminantes, RBLC

**RBLC ID:** NC-0092

**Corporate/Company:** INTERNATIONAL PAPER COMPANY

**Facility Name:** RIEGELWOOD MILL

**Process:** BOILER, POWER, OIL-FIRED

---

**Pollutant:** NOX

**CAS Number:** 10102

**Pollution Prevention/Add-on Control Equipment/Both/No Controls Feasible:** P

**P2/Add-on Description:** GOOD COMBUSTION PRACTICE

---

**Estimated % Efficiency:**

**Compliance Verified:**

**EMISSION LIMITS:**

**Basis:** BACT-PSD

**Other Applicable Requirements:**

**Other Factors Influence Decision:**

**Emission Limit 1:** 0.3670 LB/MMBTU

**Emission Limit 2:**

**Standardized:** 0.3670 LB/MMBTU

**Verified by Agency?** No

**COST DATA:**

**Year Used in Cost Estimates:**

**Cost Effectiveness:**

**Incremental Cost Effectiveness:**

**Pollutant Notes:**

---

El RBLC cuenta con un cuadro de herramientas (**Tool Box**) que ofrece vínculos a diversos elementos de utilidad, entre ellos el *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire (EPA Air Pollution Control Cost Manual)*. Asimismo, contiene hojas de cálculo diseñadas para evaluar el impacto económico de las opciones de control de emisiones, con los resultados expresados en las unidades comunes de dólares por tonelada por año (\$/tpa) para las emisiones controladas. Además, el cuadro de herramientas permite vínculos directos con dependencias estatales y locales.

## **5.0 Actuales tecnologías de control de emisiones**

Para formular una lista de opciones de control de emisiones es importante tener claro que las opciones no se limitan a aditamentos o dispositivos accesorios para controlar las emisiones. Cualquier técnica que reduzca la emisión es una opción válida, incluidos cambios en los insumos o materias primas, cambios en las condiciones del proceso, o la incorporación de equipo de control de emisiones. A continuación se ejemplifican estas opciones.

### **5.1 *Materia prima***

Las opciones de control para fuentes de combustión podrían incluir un cambio en el tipo de combustible. El uso de carbón y combustóleo bajos en azufre puede considerarse una opción de control para las emisiones de SO<sub>2</sub>. El uso de madera como combustible puede especificarse, en función de su contenido de humedad, como medio para controlar las emisiones de partículas. La combustión de gas natural puede reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y partículas suspendidas (PS). Las reducciones en la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) en las industrias del recubrimiento y las artes gráficas (impresión) pueden lograrse mediante el uso de solventes de bajo contenido de COV o incluso solventes a base de agua. Las operaciones de desengrasado también pueden cambiar al uso de mezclas de bajo nivel de COV o limpiadores a base de cítricos.

### **5.2 *Condiciones del proceso***

En el caso de muchos tipos de fuentes industriales, las emisiones pueden reducirse cuando se acepta aplicar limitaciones a la producción. A falta de cualquier limitación a la producción, un ingeniero responsable de otorgar permisos reglamentarios podría esperar que las emisiones se calcularan con base en la capacidad máxima para cada hora del año. En la industria —por ejemplo, en establecimientos o procesos de recubrimiento—, a menudo se utiliza un valor de rendimiento más realista basado en la demanda de producto. En la industria del plástico pueden reducir las emisiones de COV si se modifican las temperaturas o las presiones a las que se realizan los procesos. Las prácticas en el lugar de trabajo —por ejemplo, mantener tapados los contenedores con líquidos volátiles, o el encendido o apagado de una turbina de gas— también pueden formar parte de un plan MTD. Para las operaciones de proceso, como ocurre con el equipo para recubrimiento, la eficacia del sistema de captura será parte de la consideración general del plan MTD. Limitar las horas de operación del equipo —por ejemplo, de los generadores de emergencia— es un elemento esencial para demostrar una reducción en las emisiones en el largo plazo.

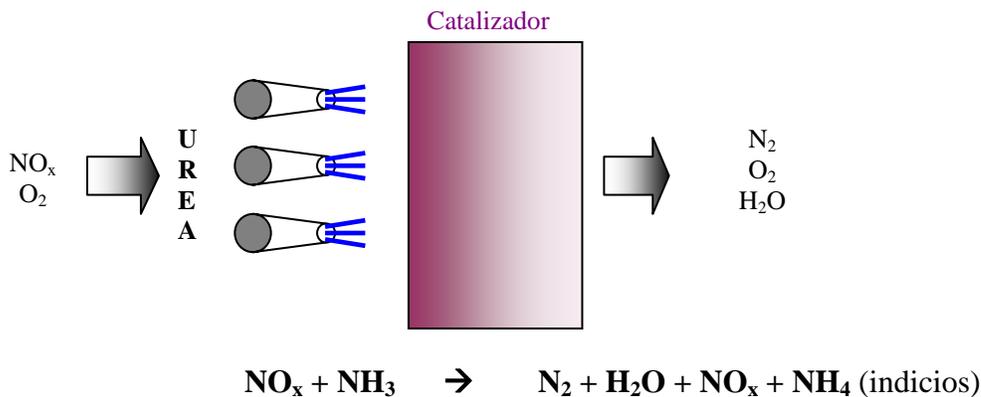
### **5.3 *Equipo para el control de emisiones***

Finalmente, luego de considerar todas las formas operativas y de proceso viables para reducir las emisiones, habrá que tener en consideración la instalación de equipo para el control de las emisiones. A continuación se presenta una breve enumeración y explicación de los dispositivos disponibles para tales efectos.

### 5.3.1 Control de óxidos de nitrógeno

El primer nivel del control de  $\text{NO}_x$ , en el caso de las calderas, sería un quemador de baja producción de  $\text{NO}_x$ . Estos quemadores están diseñados para operar a temperaturas más bajas, con el propósito de reducir al mínimo la formación térmica de  $\text{NO}_x$ ; su efecto estriba en dar lugar, de manera deliberada, a una operación ligeramente ineficiente, por la que se produce un aumento en las emisiones de monóxido de carbono (CO) pero también una disminución en las de  $\text{NO}_x$ . Otra forma de controlar las emisiones de  $\text{NO}_x$  es la reducción selectiva no catalítica (SNCR, por sus siglas en inglés), que consiste en inyectar amoníaco o urea en el escape para que reaccionen con los  $\text{NO}_x$  y formen nitrógeno y agua. Sin la ayuda de un catalizador, la temperatura de esta reacción es muy alta (760 a 815 °C), por lo que la SNCR es efectiva sólo en un intervalo de temperatura relativamente elevado y reducido. La reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés), ilustrada en la gráfica 1, es uno de los controles de  $\text{NO}_x$  más eficaces para las fuentes de combustión. El catalizador permite que ocurra una reacción eficiente a temperaturas menores, por lo general de entre 260 y 480 °C, dependiendo del tipo de catalizador.

Gráfica 1 Esquema de la reacción SCR



Fuente: M.J. Bradley & Associates

### 5.3.2 Control de partículas

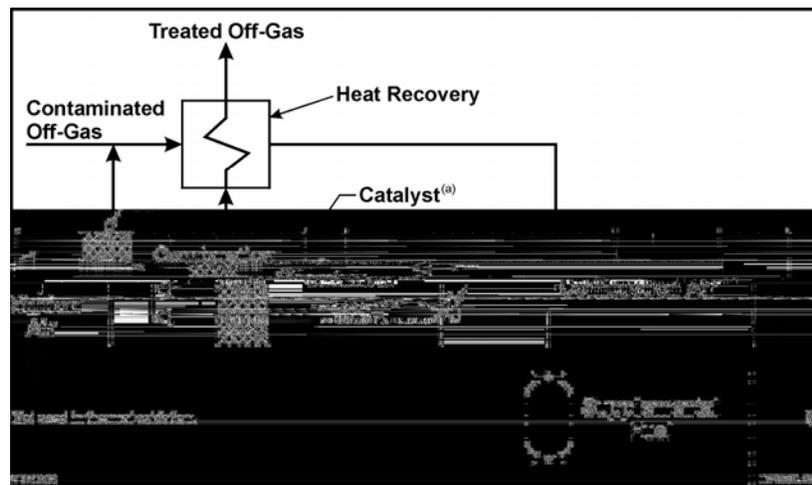
Los controles de emisión de partículas son, en su mayoría, colectores mecánicos, precipitadores electrostáticos, filtros de tela o lavadores húmedos. Los colectores mecánicos, como los ciclones, se utilizan en su capacidad de control previo, como dispositivos de precolección, para eliminar las partículas de mayor tamaño. Los precipitadores electrostáticos se usan sobre todo en procesos de alto índice de escape y de emisión, como las plantas generadoras de electricidad de caldeo por carbón y las plantas siderúrgicas. Los filtros de tela varían en su aplicación, desde fuentes de emisión muy pequeñas hasta las de gran escala, y se fabrican con telas o fibras muy diversas, dependiendo de las características de la corriente de escape: la carga de partículas, la temperatura y el contenido de humedad, entre otras. Si bien se han registrado importantes avances en la fabricación de fibras resistentes a temperaturas elevadas, los filtros de tela tienen limitaciones en lo que a temperaturas se

refiere. Los lavadores húmedos tienen diseños muy distintos para mejorar la eficiencia de contacto entre el agua y la materia particulada. Puesto que el uso de limpiadores o lavadores húmedos requiere un control de las aguas residuales, su aplicación por lo general se restringe a las fuentes de emisión de partículas de mayor tamaño.

### 5.3.3 Control de compuestos orgánicos volátiles

Hay toda una variedad de controles de COV, incluidas técnicas de condensación, oxidación térmica, biofiltración y adsorción en carbón. El control por condensación (refrigeración), que enfría la corriente de escape, dando lugar a que los compuestos volátiles se precipiten, es una técnica desarrollada hace ya algunos años, antes de los sistemas de adsorción en carbón, que solía utilizarse mucho en las terminales de distribución de gasolina. La oxidación térmica, ilustrada en la gráfica 2, es una forma simple y eficaz para la destrucción de COV; sin embargo, al tiempo que permite el control de COV, produce emisiones colaterales derivadas de la combustión (sobre todo  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}$ ). Los biofiltros no han alcanzado una aplicación generalizada, y su uso se ha restringido fundamentalmente al control de olores en las operaciones de composteo. La adsorción en carbón, ilustrada en la gráfica 3, es una de las técnicas de control de COV más eficaces. Su aplicación ideal se da con materiales que contienen COV recuperables. Los ejemplos comunes del uso de la adsorción en carbono mediante un sistema de recuperación se encuentran en las terminales de distribución de gasolina y en los establecimientos o procesos de recubrimiento que utilizan un único solvente.

**Gráfica 2 Diagrama de un oxidador térmico catalítico**

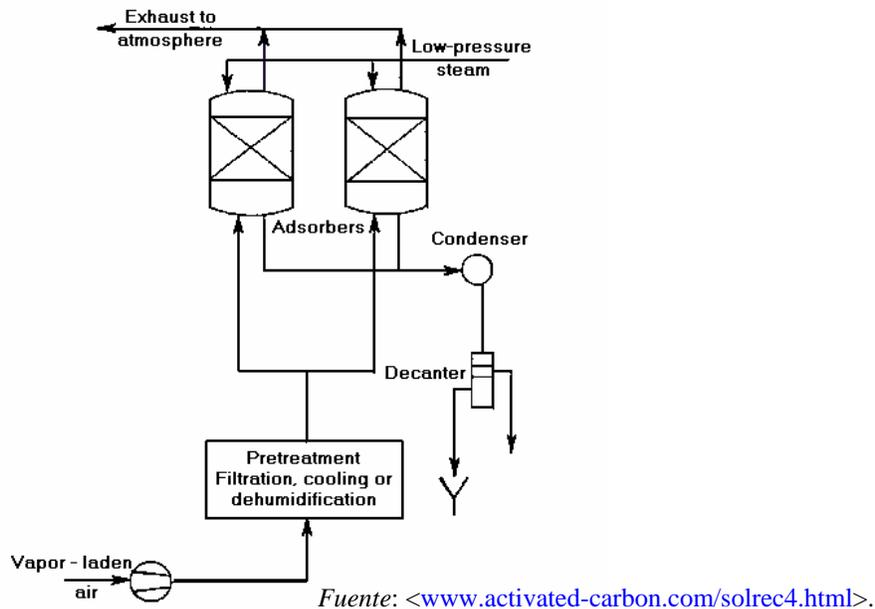


Fuente: <[http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technologies/remed/phys\\_chem/phc-35.asp](http://enviro.nfesc.navy.mil/erb/restoration/technologies/remed/phys_chem/phc-35.asp)>.

Treated Off-Gas = Gas emitido tratado

Contaminated Off-Gas = Gas emitido contaminado  
 Dilution Air = Aire para dilución  
 Heat Recovery = Recuperación de calor  
 Catalyst = Catalizador<sup>(a)</sup>  
 Combustión Chamber = Cámara de combustión  
 Combustión Air = Aire para combustión  
 Supplemental Fuel = Combustible auxiliar  
 a) Not used in thermal oxidation = No utilizado en la oxidación térmica

**Gráfica 3 Diagrama de recuperación de solventes por adsorción con carbón**



Exhaust to atmosphere = Corriente de escape hacia la atmósfera  
 Low-pressure steam = Vapor de baja presión  
 Condenser = Condensador  
 Adsorbers = Adsorbentes  
 Decanter = Decantador  
 Pretreatment Filtration, cooling or dehumidification = Tratamiento previo / Filtración, enfriamiento o deshumidificación  
 Vapor-laden / air = Carga de vapor / aire

#### **5.3.4 Control de dióxido de azufre**

La reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$  se centra principalmente en las fuentes de combustión de combustibles fósiles. Las disminuciones pueden obtenerse mediante el uso de combustibles con menor contenido de azufre y la instalación de limpiadores o lavadores húmedos o secos. El análisis de impacto económico de una opción como el lavado húmedo posiblemente refleje un beneficio económico, en la medida en que los residuos pueden venderse para la manufactura de paneles de yeso para la construcción.

## 6.0 Fuentes de información

### 6.1 Reglamentación federal estadounidense

Por medio de la revisión de ciertos reglamentos sobre fuentes de emisión o contaminantes específicos es posible identificar las tasas de emisión alcanzables y las tecnologías de control asociadas. A continuación se enlistan tres programas reglamentarios de relieve, junto con su referencia de ubicación en el Código de Reglamentos Federales (*Code of Federal Regulations*, CFR):

- NSPS, CFR 40, parte 60;
- NESHAP, CFR 40, parte 61, y
- MACT, CFR 40 parte 63.

El programa Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas (*New Source Performance Standards*, NSPS) determina la(s) tasa(s) de emisión requerida(s) para fuentes nuevas pertenecientes a categorías para las que existe una norma promulgada en el CFR 40 parte 60. El apéndice A presenta una lista de las categorías de fuente sujetas a la normatividad de las NSPS. Se esperaría que las normas promulgadas recientemente reflejaran la MTD. Sin embargo, si se realiza un análisis MTD respecto de una norma promulgada hace algunos años, se utilizaría el límite establecido como línea base para determinar si ha habido mejoras en los métodos de reducción de emisiones.

El programa Normas Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos (*National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants*, NESHAP) establece los requisitos para el control de emisiones y las prácticas en el lugar de trabajo en relación con un número selecto de contaminantes atmosféricos peligrosos (CAP) para los que se ha determinado que no existe un “límite seguro”. Los contaminantes regulados conforme al CFR 40 parte 61 incluyen: asbestos, benceno, berilio, emisiones de hornos de coque, arsénico inorgánico, mercurio, radionucleidos y cloruro de vinilo. La información del NESHAP puede servir de referencia para efectuar un análisis MTD respecto de una fuente de emisión que libera alguno de los CAP listados.

El programa Máxima Tecnología de Control Factible (*Maximum Achievable Control Technology*, MACT) dispone requerimientos sobre control y tasas de emisiones para fuentes existentes que son consideradas fuentes “principales” de uno o más CAP. El enfoque para regular los CAP cambió con las Reformas de 1990 a la Ley de Aire Puro (*Clean Air Act Amendments of 1990*): del enfoque centrado en la salud del programa NESHAP se pasó a uno basado en la tecnología de control, al que se denominó programa MACT. El programa comenzó con una lista de 189 contaminantes y estableció un calendario para formular una norma MACT para categorías de fuente que emiten uno o más de estos contaminantes. En el apéndice B se presenta una lista de las normas MACT formuladas a la fecha conforme al CFR 40 parte 63.

El propósito de las normas MACT es establecer requisitos de control y tasas de emisión para fuentes existentes. Las normas representan el nivel de control utilizado por las principales fuentes en una

categoría específica (con base en el desempeño en materia de emisiones). La información MACT puede servir como referencia para un análisis MTD, por cuanto denota un nivel mínimo que se esperaba alcanzar con la MTD.

## 6.2 Publicaciones

Es muy amplio el acervo de publicaciones que pueden apoyar al ingeniero que, responsable de la revisión reglamentaria, debe realizar un análisis MTD. A continuación se incluyen unos cuantos títulos y direcciones de Internet en las que pueden consultarse los documentos:

- *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Vol. 1: Stationary Point and Area Sources (AP-42) (EPA) (Recopilación de factores de emisión de contaminantes atmosféricos, vol. 1: fuentes estacionarias, puntuales y de área)*  
[www.epa.gov/ttn/chief/ap42](http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42)
- *EPA Air Pollution Control Cost Manual (EPA 452/B-02-001) (Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire)*  
<http://epa.gov/ttn/catc/products.html#cccinfo>
- *Air Pollution Engineering Manual (\$149) (Manual de ingeniería de la contaminación atmosférica)*  
[www.awma.org/pubs/bookstore](http://www.awma.org/pubs/bookstore)
- *Air Pollution Control Equipment Selection Guide (\$127) (Guía para la selección de equipo de control de la contaminación atmosférica)*  
[www.awma.org/pubs/bookstore](http://www.awma.org/pubs/bookstore)
- *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice, 25th Edition (\$100) (Ventilación industrial: manual de prácticas recomendadas)*  
[www.acgih.org/store](http://www.acgih.org/store)

El manual sobre factores de emisión AP-42 (disponible en línea) aporta factores de emisión para muchas categorías de fuente. Los factores de emisión representan un promedio calculado por la EPA a partir de datos disponibles de mediciones en chimeneas. Para las fuentes que utilizan diferentes tipos de controles o múltiples controles, es preciso considerar los factores de emisión específicos para cada opción. El AP-42 es un valioso punto de partida para establecer el nivel de emisiones base o de referencia antes de aplicar la MTD. Además, el AP-42 contiene descripciones de procesos y un análisis de los controles de emisión utilizados con las distintas clases de procesos.

El *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire* contiene una explicación detallada de varias tecnologías para el control de emisiones y aporta factores de costo que permiten realizar un análisis del impacto económico en términos de dólares por toneladas de emisiones reducidas por año. Las hojas de cálculo (disponibles en formato electrónico) contienen factores predeterminados para los costos de las distintas fases de construcción y operación, calculados en función de una proporción de la unidad base de control de emisiones. Si no se cuenta con el costo base para un dispositivo de control de emisiones, el manual orienta sobre el uso de factores como

dólares por metro cúbico de aire circulante por minuto (\$/mcm) como base para calcular los costos del equipo.

Los otros documentos identificados pueden resultar de utilidad en otros casos. El *Air Pollution Engineering Manual* brinda algunos detalles adicionales sobre descripciones de procesos y controles de emisión incluidos en el AP-42, en tanto que la *Air Pollution Control Equipment Selection Guide* ofrece directrices sobre los controles que son eficaces para diversos contaminantes. El manual *Industrial Ventilation* puede consultarse para evaluar campanas de captura, sistemas de conducto y chimeneas de escape en caso de que tales elementos se incluyan en el diseño y determinación de costos de un sistema con un análisis MTD. Otros documentos útiles pueden identificarse mediante búsquedas de palabras clave en Internet.

### **6.3 Dependencias estatales**

En Estados Unidos, por lo general corresponde a las dependencias estatales revisar las solicitudes de permisos para la operación de fuentes nuevas (o modificadas). De ahí que sea posible resolver dudas sobre solicitudes de permiso recientemente aprobadas dirigiéndose al ingeniero estatal responsable de su revisión. Para tales efectos, la información capturada en la base de datos RBLC incluye el nombre de la persona de contacto de la dependencia estatal responsable de la autorización. En el caso de los más recientes análisis MTD aprobados, es probable que la información no esté aún incluida en la base de datos RBLC, en cuyo caso tal vez sea necesario ponerse en contacto con la entidad federativa para conocer el nivel de reducción de emisiones.

### **6.4 Asociaciones comerciales**

Por su naturaleza, las asociaciones comerciales sirven como conducto para la transmisión de información. Cuando un fabricante o distribuidor de controles de emisión cuenta con un nuevo producto, suele difundir la información a través de una o más asociaciones comerciales. La información puede presentarse en una página en Internet, en relatorías y memorias o en publicaciones técnicas. La siguiente es una lista parcial de las asociaciones comerciales que pueden ofrecer información sobre control de emisiones y calidad del aire.

- Asociación para el Manejo de Residuos y Emisiones Atmosféricas (*Air and Waste Management Association, AWMA*)  
[www.awma.org](http://www.awma.org)
- Instituto de Compañías por un Aire Puro (*Institute of Clean Air Companies, ICAC*)  
[www.icac.com](http://www.icac.com)
- Instituto de Investigaciones Eléctricas (*Electric Power Research Institute, EPRI*)  
[www.epri.com](http://www.epri.com)
- Instituto Estadounidense del Petróleo (*American Petroleum Institute, API*)  
[www.api.org](http://www.api.org)

- Asociación Nacional de Pavimentación de Asfalto (*National Asphalt Pavement Association, NAPA*)  
[www.hotmix.org](http://www.hotmix.org)
- Asociación de Fabricantes de Cemento Pórtland (*Portland Cement Association, PCA*)  
[www.portcement.org](http://www.portcement.org)
- Foro sobre Tecnología Dísel (*Diesel Technology Forum*)  
[www.dieselforum.org](http://www.dieselforum.org)
- DieselNet  
[www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)
- Asociación de Fabricantes de Controles de Emisión (*Manufacturers of Emission Controls Association, MECA*)  
[www.meca.org](http://www.meca.org)

## 6.5 Distribuidores de equipo

Inevitablemente, entre las mejores fuentes de información sobre tecnologías para el control de emisiones se encuentran los numerosos fabricantes y distribuidores que diseñan, manufacturan e instalan tales dispositivos. Las tecnologías varían desde sistemas probados de hace tiempo hasta nuevos conceptos innovadores. Desafortunadamente, como parte de sus estrategias de venta, los fabricantes y distribuidores por lo general presentan sólo los aspectos positivos de sus dispositivos. Con todo, siempre es posible investigar a profundidad, más allá de los argumentos de venta, para conocer con detalle el funcionamiento de los sistemas de control. A continuación se presenta una lista con los nombres y direcciones en Internet de algunos de los fabricantes y distribuidores de equipo para el control de emisiones, agrupados por categorías:

- Motores dísel
  - Caterpillar [www.cat.com](http://www.cat.com)
  - Cummins [www.cummins.com](http://www.cummins.com)
  - Mack [www.macktrucks.com](http://www.macktrucks.com)
  - Detroit Diesel [www.detroitdiesel.com](http://www.detroitdiesel.com)
- Turbinas
  - GE [www.gepower.com](http://www.gepower.com)
  - Pratt & Whitney [www.pratt-whitney.com](http://www.pratt-whitney.com)
- Oxidación térmica
  - Trewin & Smith [www.tsix.com](http://www.tsix.com)
  - ADWest Technologies, Inc. [www.adwestusa.com](http://www.adwestusa.com)
  - MEGTEC Systems [www.MEGTEC.com](http://www.MEGTEC.com)
- SCR
  - Siemens [www.siemens.com](http://www.siemens.com)
  - Cormetech [www.cormetech.com](http://www.cormetech.com)
  - Johnson Matthey [www.matthey.com](http://www.matthey.com)

- Engelhard [www.engelhard.com](http://www.engelhard.com)
- Fleetguard Emission Solutions [www.fleetguard.com](http://www.fleetguard.com)
  
- Carbón
  - Barneby Sutcliffe [www.bscarbons.com](http://www.bscarbons.com)
  - John Zink Company [www.johnzinc.com](http://www.johnzinc.com)
  - Calgon [www.calgoncarbon.com](http://www.calgoncarbon.com)
  
- Búsqueda general
  - Thomas Registry of American Manuf. [www.thomasregistry.com](http://www.thomasregistry.com)

## **6.6 Relatorías y memorias**

En la investigación de un análisis MTD, el desafío estriba siempre en indagar a fondo cualesquiera nuevas técnicas para el control de emisiones que representen una innovación. A su vez, el reto para el diseñador de una nueva e innovadora tecnología de control de emisiones es difundirla y darla a conocer. Un método popular por el que ambos propósitos se logran es la presentación de ponencias en conferencias técnicas. La mayoría de las conferencias publican sus relatorías y memorias, y las ponen a disposición pública, ya sea en forma gratuita o por un precio módico.

## 7.0 Estudio de caso: motor diésel alternativo fijo

Este apartado describe un ejemplo de análisis MTD para un motor diésel. Para el estudio de caso se consideró un motor diésel de 2,000 kilowatts (kW) (2,885 caballos de fuerza [hp]), de los que suelen utilizarse en plantas de asfalto, molinos de piedra, trituradoras de metal y pequeños generadores o plantas eléctricas (de uso continuo o de emergencia). Asimismo se consideró que el motor se utiliza para la generación de electricidad en casos de emergencia, con una operación limitada a 500 horas al año. Para determinar la MTD se utilizó el método descendente descrito en el apartado 3.

### 7.1 Especificaciones del proyecto

La compañía XYZ busca aprobación para instalar una planta de energía eléctrica CAT 3516B en un sitio que cumple con las Normas Nacionales de Calidad del Aire. El generador funcionará como unidad de emergencia y su operación no rebasará las 500 horas por año. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, al equipo CAT 3516B operando a 100% de su capacidad corresponden las siguientes tasas de emisión, expresadas en gramos del contaminante por caballos de fuerza de potencia efectiva por hora:

- NO<sub>x</sub>                      6.9 g/hp-hr
- CO                         0.35 g/hp-hr
- COV                        0.13 g/hp-hr
- Partículas                0.103 g/hp-hr

Este motor Caterpillar de la serie B es una unidad de baja emisión y de mezcla pobre, lo que significa que la proporción del carburante se minimiza respecto de la cantidad de aire en la mezcla aire-combustible. Los motores anteriores, de la serie A, tenían inyección de combustible mecánica y producían emisiones de NO<sub>x</sub> del orden de 12 g/hp-hr. La tecnología de combustión de mezcla pobre se valió de la inyección electrónica para acercarse al límite de 6.9 g/hp-hr, que es la tasa de emisión de NO<sub>x</sub> establecida en California para generadores de este tamaño con motor diésel.

### 7.2 Cálculo de emisiones

Las emisiones anuales se estimaron con base en las 500 horas de operación al año. Cabe señalar que las emisiones de SO<sub>2</sub> se calcularon mediante el factor de emisión de 0.00809(%S) lb/hp-hr publicado por la EPA, presuponiendo un contenido de azufre de 0.3 por ciento.

- NO<sub>x</sub>                      8.1 tpa
- CO                        1.9 tpa
- SO<sub>2</sub>                      1.9 tpa
- COV                      0.21 tpa
- Partículas               0.16 tpa

Este estudio de caso investigó las opciones para el control de emisiones de contaminantes con tasas anuales por arriba de 1 tpa. Así, a partir de las emisiones anuales calculadas y presentadas en la lista de arriba, el análisis MTD incluyó NO<sub>x</sub>, CO y SO<sub>2</sub>.

### 7.3 Base de datos RBLC

La base de datos RBLC contiene entradas bajo la categoría de motores de combustión interna que funcionan con combustible líquido; sin embargo, sólo se reportan las emisiones de NO<sub>x</sub> y CO.

El cuadro 4 presenta los resultados de una búsqueda de *la menor tasa de emisión (Lowest Emission Rate)* en la base de datos RBLC de la EPA para la categoría de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por motores alternativos alimentados con combustible líquido. Al revisar la información sobre control de emisiones vinculada a la opción *límite de emisión estándar (Standard Emission Limit)*, se observa que las emisiones de NO<sub>x</sub> en el intervalo de 0.7 a 3.6 g/hp-hr se lograron para motores equipados con sistema de control SCR, en tanto que las emisiones de NO<sub>x</sub> en el intervalo de 5.2 a 5.6 g/hp-hr se registraron para motores con ignición retardada. Las emisiones de NO<sub>x</sub> de entre 6.4 y 6.9 g/hp-hr correspondieron a motores con tecnología de combustión de mezcla pobre, y los motores autorizados a emitir 6.9 g/hp-hr son de sistemas de uso exclusivo en casos de emergencia. Este nivel (de 6.9 g/hp-hr) es la especificación mínima para los motores alternativos fijos a base de diésel en California.

**Cuadro 4 Resultados de la búsqueda de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por motores de combustión interna, RBLC**

Pollutant: NOX  
 Process Category: Internal Combustion Engines  
 Process Type: 17.110  
 Process Name: Fuel Oil  
 Permit Date Between 12/29/1999 And 12/29/2004

	RBLCID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT
<input type="checkbox"/>	<a href="#">VT-0013</a>	06/08/2000	MILL RIVER LUMBER, Ltd. MILL RIVER LUMBER, LTD.	<a href="#">0.7500 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">AK-0059</a>	09/29/2003	USAF EARECKSON AIR STATION USAF EARECKSON AIR STATION	<a href="#">1.0900 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PA-0209</a>	11/08/2002	BOROUGH OF CHAMBERSBURG ORCHARD PARK GENERATING STATION	<a href="#">1.5000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VT-0014</a>	09/05/2000	OKEMO MOUNTAIN INC. OKEMO MOUNTAIN INC.	<a href="#">1.6000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PA-0158</a>	06/19/2000	FORD ELECTRONICS AND REFRIGERATION, LLC FORD ELECTRONICS AND REFRIGERATION, LLC	<a href="#">3.6000 G/BHP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">AK-0053</a>	03/21/2000	TESORO ALASKA COMPANY KENAI REFINERY	<a href="#">5.2000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">NC-0074</a>	01/24/2003	BRIDGESTONE/FIRESTONE NORTH AMERICAN TIRE BRIDGESTONE/FIRESTONE NORTH AMERICAN TIRE	<a href="#">5.6700 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">AK-0060</a>	10/10/2003	WESTWARD SEAFOODS, INC. DUTCH HARBOR SEAFOOD PROCESSING FACILITY	<a href="#">6.4500 G/B-HP-H</a>

[CA-0988](#)

02/01/2003

PACIFIC BELL  
PACIFIC BELL[6.9000 G/B-HP-H](#)

El cuadro 5 presenta los resultados de una búsqueda en la base de datos RBLC con la opción de *la menor tasa de emisión (Lowest Emission Rate)* para la categoría de emisiones de CO producidas por motores alternativos alimentados con combustible líquido. Al revisar la información sobre control de emisiones vinculada a la opción *límite de emisión estándar (Standard Emission Limit)*, se observa que las cuatro entradas con emisiones menores a 1 g/hp-hr corresponden todas a unidades equipadas con un catalizador de oxidación. Las entradas restantes correspondieron a unidades para uso exclusivo de emergencia, con controles de CO calificados como “prácticas de combustión adecuadas”.

### Cuadro 5 Resultados de la búsqueda de emisiones de CO producidas por motores de combustión interna, RBLC

Pollutant: CO  
Process Category: Internal Combustion Engines  
Process Type: 17.110  
Process Name: Fuel Oil  
Permit Date Between 12/29/1999 And 12/29/2004

RBLCID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VT-0013</a>	06/08/2000 Mill River Lumber, Ltd. MILL RIVER LUMBER, LTD.	<a href="#">0.2700 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OH-0266</a>	08/15/2002 UNIVERSITY OF CINCINNATI UNIVERSITY OF CINCINNATI	<a href="#">0.3000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">AK-0059</a>	09/29/2003 USAF EARECKSON AIR STATION USAF EARECKSON AIR STATION	<a href="#">0.5000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VT-0014</a>	09/05/2000 OKEMO MOUNTAIN INC. OKEMO MOUNTAIN INC.	<a href="#">0.6000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">IA-0058</a>	04/10/2002 MIDAMERICAN ENERGY GREATER DES MOINES ENERGY CENTER	<a href="#">1.3800 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">AK-0053</a>	03/21/2000 TESORO ALASKA COMPANY KENAI REFINERY	<a href="#">1.4500 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">MN-0053</a>	07/15/2004 MN MUNICIPAL POWER AGENCY FAIRBAULT ENERGY PARK	<a href="#">1.8300 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">TX-0384</a>	08/23/2000 AVISTA-STEAG BRAZOS VALLEY ELECTRIC GENERATING FACILITY	<a href="#">3.0000 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PR-0005</a>	03/02/2000 PUERTO RICO ELECTRIC AUTHORITY (PREPA) SAN JUAN REPOWERING PROJECT	<a href="#">3.0200 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">TX-0407</a>	12/06/2002 STEAG POWER LLC STERNE ELECTRIC GENERATING FACILITY	<a href="#">3.0300 G/B-HP-H</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">TX-0262</a>	01/03/2000 ARCHER POWER PARTNERS, L.P. ARCHER GENERATING STATION	<a href="#">5.9000 G/B-HP-H</a>

## **7.4 Reglamentos vigentes en EU**

Resulta interesante observar que las presiones reglamentarias para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> de motores alternativos a base de diésel se han centrado en fuentes móviles. Sin embargo, los fabricantes que producen motores diésel para fuentes móviles son los mismos que producen las unidades para fuentes estacionarias, lo que ha resultado en una considerable reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> a partir de motores alternativos fijos en los años recientes sin que se haya promulgado una reglamentación centrada en fuentes estacionarias.

En relación específica con los motores alternativos fijos, la EPA estadounidense promulgó una nueva norma MACT (CFR 40 parte 63, subparte ZZZZ), titulada NESHAP para Motores de Combustión Interna Alternativos Fijos (*Stationary Reciprocating Internal Combustion Engine NESHAP*). Sin embargo, esta norma MACT sólo se aplica a motores que emiten más de 10 tpa de CAP. Su propósito es minimizar las emisiones de formaldehídos (incluidos entre los CAP). El control requerido consiste ya sea en instalar un catalizador de oxígeno o en establecer limitaciones a la operación. Puesto que un catalizador de oxígeno reduce también las emisiones de CO, la norma MACT contiene también los requerimientos de reducción de CO aplicables a motores fijos de uso distinto del de emergencia.

## **7.5 Recursos para las opciones de control de emisiones**

Un recurso para identificar opciones de control de emisiones es la base de datos sobre tecnologías ambientales nuevas e incipientes del Centro de Tecnología del Aire Limpio (*New and Emerging Environmental Technologies (NEET) Clean Air Technologies Database*), auspiciada por la EPA. Esta base de datos puede consultarse a través del vínculo correspondiente en la base de datos RBLC o directamente en: <<http://neet.rti.org/>>. Al hacer la búsqueda por contaminante, fuente estacionaria, emisiones capturadas y disponibilidad comercial se obtuvo una lista de opciones de control. Además, el documento *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire (EPA Air Pollution Control Cost Manual—Sixth Edition; EPA 452/B-02-001)* ofrece un capítulo sobre cada contaminante de criterio. Este manual puede consultarse electrónicamente a través de la base de datos RBLC, desde el vínculo llamado biblioteca de referencia (**Reference Library**), en: <<http://www.epa.gov/ttn/catc>>.

## **7.6 Revisión de las opciones para el control de emisiones de NO<sub>x</sub>**

A continuación se proporciona información sobre cada una de las posibles opciones de reducción de emisiones de NO<sub>x</sub>, con base en experiencias e investigaciones previas respecto de aplicaciones similares.

### **7.6.1 Reducción catalítica selectiva**

Un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) es un dispositivo de tratamiento de gases de escape que aprovecha la capacidad de ciertos compuestos —sobre todo urea o amoníaco— para reaccionar con las emisiones de NO<sub>x</sub> y formar compuestos químicos benignos. La técnica consiste en introducir en la chimenea o tubo de escape determinada cantidad del reactivo químico, el cual entra en contacto con un intrincada disposición de metales preciosos que actúan como catalizadores de la reacción química. Históricamente, los sistemas SCR han constituido

dispositivos muy eficaces para el control de emisiones de NO<sub>x</sub>. Sus desventajas estriban en que sus costos de capital tienden a ser elevados y que los escapes de los motores deben cumplir con ciertos valores de temperatura y presión para el adecuado funcionamiento de los dispositivos.

### **Impacto ambiental**

Los ejemplos anteriores muestran que la SCR ha permitido lograr importantes reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub> de motores alternativos a base de diésel. En condiciones óptimas de operación, puede anticiparse una reducción de alrededor de 90% en los NO<sub>x</sub> emitidos gracias a la instalación de un dispositivo SCR. Sin embargo, resulta sumamente difícil prever la eficacia y las tasas finales de emisión, toda vez que éstas dependen del tipo de unidad SCR, así como de la presión y la temperatura registradas en la chimenea o tubo de escape. Más aún, el efecto del dispositivo SCR en las emisiones de NO<sub>x</sub> será mínimo mientras el motor está frío. Por otra parte, si bien los índices de alimentación de amoníaco en los sistemas SCR están diseñados de manera que se reduzca al mínimo la emisión de amoníaco, la mayoría de los fabricantes especifican un índice de escape de entre 2 y 10 ppm.

### **Impacto energético**

Aunque por lo general no se considera que un sistema SCR sea un dispositivo que requiere un suministro de energía, será necesario considerar ligeros aumentos en el consumo energético. Dado que el equipo se instalará directamente en la chimenea o tubo de escape, los extractores o ventiladores de escape tendrán que realizar un mayor trabajo para alcanzar una tasa de flujo adecuada. Asimismo, los atomizadores o dispositivos para rociar el amoníaco también consumen pequeñas cantidades de energía, además de que la operación entraña ciertos aumentos indirectos en el consumo energético, por ejemplo en la energía requerida para crear y transportar el amoníaco.

### **Impacto económico**

El cuadro 6 ilustra los costos de capital y de operación totales asociados a la instalación de un dispositivo SCR en el establecimiento del estudio de caso. Fundamentalmente requerirá de un costo de capital invertido de \$384,000 y de \$62,000 al año adicionales para operar. Considerando las reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub> que se prevé alcanzar, esto se traduce en un costo de alrededor de \$22,200 por tonelada de NO<sub>x</sub> controlados, con una operación de 500 horas por año, de donde se desprende que éste es en esencia el método de control más caro de los que se presentan.

#### **7.6.2 Reducción selectiva no catalítica**

El método de reducción selectiva no catalítica (SNCR, por sus siglas en inglés) introduce en el escape del motor diésel nuevos compuestos (por lo general amoníaco o urea), los cuales descomponen las moléculas de NO<sub>x</sub> en nitrógeno y oxígeno, de manera muy parecida a lo que ocurre en la SCR. La diferencia entre ambas tecnologías es que un dispositivo SNCR carece de los catalizadores de metales preciosos que facilitan la reacción amoníaco-NO<sub>x</sub>. Los sistemas SNCR pueden realizar reducciones de 60% en las emisiones de NO<sub>x</sub>, pero sólo a temperaturas superiores a 925 °C. A temperaturas menores, la reacción se produce en forma demasiado lenta, lo que da lugar a que el amoníaco no utilizado se emita por la chimenea. Puesto que esta temperatura está muy por arriba de la temperatura estándar de operación del generador, esta opción no se consideró técnicamente viable para esta aplicación.

### **7.6.3 Reducción catalítica no selectiva**

La reducción catalítica no selectiva (NSCR, por sus siglas en inglés) utiliza un catalizador de tres vías de CO e hidrocarburos para reducir los NO<sub>x</sub> a nitrógeno y agua. El agente reductor se inyecta al escape, desde un catalizador, y por lo tanto requiere motores que operan en condiciones estequiométricas o ricas en combustible. Se consideró que esta opción era técnicamente inviable, puesto que los motores alternativos suelen ser, por su propio diseño, unidades con tecnología de combustión de mezcla pobre.

### **7.6.4 Controles de combustión**

Diversos controles de combustión, tales como controles de inyección de combustible, sistemas de enfriamiento y técnicas de combustión de mezcla pobre han sido ya incorporados al diseño del CAT 3516B. Tales dispositivos se consideraron como posibles MTD antes de que se descubriera que el motor producía emisiones de NO<sub>x</sub> por encima de los niveles permitidos, aun con estos controles en operación.

La recirculación de gases de escape (EGR, por sus siglas en inglés) es una técnica que consiste en redirigir parte de la corriente de emisiones de vuelta a la entrada del motor, lo que disminuye la temperatura de combustión y, por tanto, reduce las emisiones de NO<sub>x</sub> hasta en 15%. Este método se consideró inviable técnicamente, sin embargo, dado que los contaminantes en los gases de escape provocarían daños al sistema de alimentación y producirían mayores índices de desgaste de los motores.

Las técnicas de inyección de vapor, aplicables a calderas y turbinas, también reducen la temperatura de combustión, y para estas aplicaciones producen una reducción de 15% en las emisiones de NO<sub>x</sub>. No obstante, las partículas contenidas en el vapor oxidarían el interior de los motores y aumentarían su desgaste, por lo que se les consideró como técnicas inviables para esta aplicación.

Realizar ajustes en el encendido de los motores puede ser una forma efectiva y económica de lograr ligeras reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub>, aunque entraña el inconveniente de mayores emisiones de COV y CO. Más aún, Caterpillar señala que el retardo en la distribución del encendido puede resultar en menores eficiencia, desempeño, confiabilidad y vida del motor. Por consiguiente, se determinó que este método no era técnicamente viable para esta aplicación.

## ***7.7 Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO***

A continuación se presenta información sobre cada una de las posibles opciones para reducir las emisiones de CO, con base en experiencias e investigaciones previas respecto de aplicaciones similares.

### **7.7.1 Catalizadores de oxidación**

Los módulos de oxidación catalítica y los paquetes integrados de fábrica en los motores son la forma económica de eliminar o reducir las emisiones de monóxido de carbono, además de que tienen el beneficio colateral de también reducir las emisiones de hidrocarburos no quemados. Los catalizadores de oxígeno se fabrican con formulaciones de metales preciosos, durables y de alta eficacia, lo que les permite tener una caída de presión baja y una elevada actividad catalítica. Los catalizadores clásicos se elaboran con un sustrato metálico y cerámico de estructura apalada con

recubrimientos catalíticos específicos para cada aplicación. Los metales preciosos permiten altos niveles de destrucción a temperaturas de operación más bajas. El uso de formulaciones de alta actividad y resistencia permite la reducción de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos no quemados y de olores a temperaturas menores y con menor volumen de catalizador, lo que significa menores costos de operación y de capital, respectivamente. En algunos casos, pueden alcanzarse niveles de destrucción de los contaminantes de 98 por ciento.

### **Impacto ambiental**

Además de la reducción definitiva en las emisiones de CO, el catalizador de oxígeno reducirá las emisiones de COV. Un impacto ambiental negativo es que a través del proceso de oxidación del CO se produce CO<sub>2</sub> (un gas de efecto invernadero).

### **Impacto energético**

El uso de un catalizador de oxidación creará una caída de presión adicional, lo que a su vez dará como resultado un ligero aumento en el consumo de energía.

### **Impacto económico**

El costo de capital de un catalizador de oxidación con capacidad para manejar un flujo de escape de 481 metros cúbicos por minuto (17,000 pies cúbicos por minuto) es de \$150,000. Con base en el costo de capital y un costo de operación estimado en \$25,000, el impacto económico sería de \$20,000/tpa de CO reducido.

## ***7.8 Revisión de las opciones para el control de las emisiones de SO<sub>2</sub>***

A continuación se presenta información sobre cada una de las posibles opciones para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>, con base en experiencias e investigaciones previas respecto de aplicaciones similares.

### **7.8.1 Dísel con ultrabajo contenido de azufre**

Por su reducido contenido de azufre, el dísel con ultrabajo contenido de azufre (ULSD, por sus siglas en inglés) es capaz de lograr considerables reducciones en las tasas de emisión de SO<sub>2</sub>. Si bien resulta marginalmente más caro que el dísel núm. 1, el ULSD representa una forma fácil, ambientalmente práctica de lograr reducciones en las emisiones sin necesidad de instalar o mantener ningún equipo nuevo o dispositivo de tratamiento poscombustión. El uso de este combustible en lugar del dísel estándar representa una importante opción candidata para el método MTD de reducción de SO<sub>2</sub>.

### **Impacto ambiental**

Además de la reducción definitiva en las emisiones de SO<sub>2</sub> (directamente proporcional a la diferencia en el contenido de azufre del combustible), uno de los beneficios colaterales del uso del ULSD es la ligera reducción en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Mediante el proceso de refinación para eliminar el azufre es posible que ocurra también una ligera reducción en el nitrógeno elemental, lo que se traduce en emisiones de NO<sub>x</sub> potencialmente menores.

## **Impacto energético**

La combustión de ULSD no entraña ningún consumo adicional de energía. Aunque las refinerías que producen este tipo de combustible sí tienen un mayor consumo energético.

## **Impacto económico**

El costo adicional del ULSD es de alrededor de 1.3 centavos de dólar por litro (\$0.05 por galón). Presuponiendo un consumo de 559 litros por hora y 500 horas de operación al año, el impacto económico de esta opción sería de \$2,300/tpa de SO<sub>2</sub> reducido.

## **7.9 Conclusiones del análisis MTD**

La técnica de evaluación descendente de la MTD señaló que si el costo no fuese un factor (o si la unidad no estuviese limitada a 500 horas de operación al año), el CAT 3516B se equiparía con un SCR para controlar las emisiones de NO<sub>x</sub>, un catalizador de oxidación para controlar el CO y se alimentaría con ULSD. Sin embargo, como este estudio de caso se ha planteado para un generador de emergencia exclusivamente (uso limitado a 500 horas anuales), el SCR está muy por arriba del umbral de \$15,000 utilizado en algunas regiones de Estados Unidos como límite de lo económicamente accesible. De manera similar, el catalizador de oxidación para CO y el ULSD para SO<sub>2</sub> se consideran económicamente inviables. Por tanto, para el presente estudio de caso la MTD estará dada por una combinación de las especificaciones de combustión de mezcla pobre para el motor y buenas prácticas de combustión, a efecto de asegurar que el CO no aumente como resultado de una combustión ineficiente.

## Cuadro 6 Análisis de costos del control de NO<sub>x</sub> por SCR para un motor de combustión interna

Unidad SCR (por unidad)

<b>COSTOS DIRECTOS</b>		Factor	
FLUJO TOTAL (mcm)	300 mcm		
<b>COSTO DEL EQUIPO ADQUIRIDO</b>			
COSTO DEL EQUIPO		A =	\$150,000
PRECALENTADORES (1 precalentador @ \$2,000.00 incluido en el costo del equipo)			
INSTRUMENTACIÓN		0.10 A	\$15,000
CONDUCTOS, EXTRACTORES Y CHIMENEAS		0.03 A	\$4,500
IMPUESTOS SOBRE LAS VENTAS		0.05 A	\$7,500
FLETE		0.05 A	\$7,500
TOTAL EQUIPO		B =	<u>\$184,500</u>
<b>MANEJO E INSTALACIÓN</b>			
MANEJO E INSTALACIÓN		0.30 B	\$55,350
BASES Y SOPORTES		0.04 B	\$7,380
ELECTRICIDAD		0.08 B	\$14,760
TUBERÍA, PINTURA		0.03 B	\$5,535
TOTAL INSTALACIÓN		0.45 B	<u>\$83,025</u>
<b>COSTOS INDIRECTOS DE INSTALACIÓN</b>			
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN		0.20 B	\$36,900
CONSTRUCCIÓN, GASTOS DE CAMPO		0.20 B	\$36,900
ARRANQUE, PRUEBAS DE DESEMPEÑO		0.01 B	\$1,845
CONTINGENCIAS		0.03 B	\$5,535
TOTAL COSTOS INDIRECTOS		0.44 B	<u>\$81,180</u>
<b>TOTAL COSTO DE CAPITAL</b>		C =	\$348,705
<b>COSTO DIRECTO ANUAL</b>			
<b>INSUMOS</b>			
ELECTRICIDAD @ \$0.08/Kwh		2,000 Kwh calculados	\$160
Amoniaco @ 19% \$0.13 / litro (\$ 0.50 / galón)		19 litros (5 galones) / hr * 300 hrs	\$750
Precalentador de la cama del catalizador			
Gas natural @ \$6.50 mmBtu		3' X 2' mantenido a at 370°C 0.05 mmBtu / hr *300 hrs	\$98
<b>MANTENIMIENTO</b>			
TIEMPO DE MANTENIMIENTO (HORAS)			156
MANO DE OBRA @ \$30.00/HR		D=	\$0
MATERIALES @ 100% DE MANO DE OBRA		E=	<u>\$0</u>
TOTAL COSTOS DIRECTOS ANUALES			\$1,008
<b>COSTO INDIRECTO ANUAL</b>			
GASTOS INDIRECTOS	0.6 (D + E)		\$0
IMPUESTO SOBRE LA PROPIEDAD	0.014 C		\$4,882
SEGURO	0.02 C		\$6,974
ADMINISTRACIÓN	0.24 C		\$8,369
RECUPERACIÓN DE CAPITAL	0.117 x C		<u>\$40,739</u>
TOTAL COSTOS INDIRECTOS ANUALES			\$60,964
<b>COSTO ANUAL TOTAL</b>			\$61,971
<b>EMISIONES CONTROLADAS (TON) = Potencial del motor x Eficiencia de control = 3.4 x 0.9 = 3.1 tpa</b>			
	3.10	90%	<u>2.79</u>

**COSTO POR TONELADA CONTROLADA**

\$22,212

## 8.0 Estudio de caso: caldera alimentada con combustóleo

Este apartado describe el proceso utilizado para determinar la MTD para una pequeña planta de generación de electricidad. La fuente de poder es una caldera de 200 millones de Btu/hr alimentada con combustóleo o aceite residual núm. 6. Los contaminantes controlados incluyen subproductos de la combustión: óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y partículas suspendidas (PS). Entre los usos comunes de una caldera de 200 millones de Btu/hr se incluyen la generación de vapor para la calefacción o el enfriamiento de un establecimiento industrial de gran tamaño o, en caso de contar con un generador eléctrico de vapor, como pequeña planta de electricidad. El estudio de caso presupone que la caldera se utiliza para la producción de vapor en un establecimiento industrial, y se encuentra en operación durante las 24 horas del día, siete días a la semana. A fin de determinar la MTD, las posibles opciones de control se examinaron mediante el método descendente descrito en el apartado 3.

### 8.1 Especificaciones del proyecto

La compañía XYZ busca aprobación para la construcción de una caldera de 200 millones de Btu/hr alimentada con combustóleo en un sitio que cumple con las Normas Nacionales de Calidad del Aire. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, corresponden a la caldera las siguientes tasas de emisión, expresadas en libras del contaminante por millones de unidades térmicas inglesas de calor suministrado (entrada calorífica).

- $\text{NO}_x$             0.40 lb/mmBtu
- CO                0.03 lb/mmBtu
- Partículas        0.10 lb/mmBtu (se presupone el uso de combustóleo con 1% de azufre)
- $\text{SO}_2$             1.0 lb/mmBtu (se presupone el uso de combustóleo con 1% de azufre)
- COV              0.005 lb/mmBtu

Las tasas de emisión corresponden a una caldera nueva diseñada para cumplir con las Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas (NSPS), de la EPA, para una unidad de 200 mmBtu/hr (subparte Db). Esta normatividad sólo incluye emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y partículas suspendidas. Las tasas de emisión para CO y COV concuerdan con los factores de emisión publicados por la EPA en su manual de referencia sobre factores de emisión (AP-42).

### 8.2 Cálculo de emisiones

Con base en una operación de 8,760 horas al año, se estimaron las emisiones expresadas en toneladas anuales:

- $\text{NO}_x$             351 tpa
- CO                26 tpa
- Partículas        88 tpa
- $\text{SO}_2$             877 tpa
- COV              4.4 tpa

En este estudio de caso, sólo se investigaron las opciones para el control de emisiones contaminantes con tasas anuales por arriba de 1 tpa. Así, a partir de las emisiones anuales calculadas y presentadas en la lista de arriba, el análisis MTD incluyó NO<sub>x</sub>, CO, partículas suspendidas, SO<sub>2</sub> y COV.

### 8.3 Base de datos RBLC

La base de datos RBLC contiene entradas bajo la categoría de “unidades de combustión externa que funcionan con combustóleo”; sin embargo, sólo se reportan las emisiones de NO<sub>x</sub>, partículas suspendidas y CO.

El cuadro 7 presenta los resultados de una búsqueda de *la menor tasa de emisión (Lowest Emission Rate)* en la base de datos RBLC de la EPA para la categoría de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por calderas alimentadas con combustóleo (100 a 250 millones de Btu/hr). Al revisar la información sobre control de emisiones vinculada a la opción *límite de emisión estándar (Standard Emission Limit)*, se observa que las menores tasas de emisión correspondieron al uso de quemadores de baja producción de NO<sub>x</sub> y a la recirculación de gases de combustión (FGR, por sus siglas en inglés). Las tasas de emisión más elevadas, en cambio, denotan la falta de controles de emisión.

**Cuadro 7 Resultados de la búsqueda de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC**

	RBLCID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT
<input type="checkbox"/>				
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">NC-0092</a>	05/10/2001	INTERNATIONAL PAPER COMPANY RIEGELWOOD MILL	<a href="#">0.3670 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VA-0270</a>	03/31/2003	VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY VCU EAST PLANT	<a href="#">0.4000 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">FL-0182</a>	12/17/1998	RAYONIER, INC. RAYONIER, INC.	<a href="#">0.4250 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">NY-0089</a>	03/19/1996	UNIVERSITY OF ROCHESTER CENTRAL UTILITIES PLANT UNIVERSITY OF ROCHESTER	<a href="#">0.4250 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OR-0031</a>	03/02/2001	POPE & TALBOT, INC HALSEY PULP MILL	<a href="#">0.4700 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">DE-0017</a>	10/26/2001	SPI POLYOLS, INC. SPI POLYOLS, INC.	<a href="#">0.4800 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">NJ-0031</a>	06/26/1997	UNIVERSITY OF MEDICINE & DENTISTRY OF NEW JERSEY UNIVERSITY OF MEDICINE & DENTISTRY OF NEW JERSEY	<a href="#">0.5500 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OH-0241</a>	11/15/2001	MILLER BREWING COMPANY MILLER BREWING COMPANY - TRENTON	<a href="#">0.7000 LB/MMBTU</a>

El cuadro 8 presenta los resultados de una búsqueda en la base de datos RBLC con la opción de *la menor tasa de emisión (Lowest Emission Rate)* para la categoría de emisiones de PS producidas por

calderas alimentadas con combustóleo (100 a 250 millones de Btu/hr). La tasa de emisión más baja correspondió al uso de un ciclón de tubos múltiples (multiclón) y un lavador de alta presión en serie para el control de las partículas.

**Cuadro 8 Resultados de la búsqueda de emisiones de PS producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC**

RBLCID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT
<input type="checkbox"/>			
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">NC-0092</a>	05/10/2001 INTERNATIONAL PAPER COMPANY RIEGELWOOD MILL	<a href="#">0.0562 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VA-0278</a>	03/31/2003 Virginia Commonwealth University VCU EAST PLANT	<a href="#">0.0600 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OR-0031</a>	03/02/2001 POPE & TALBOT, INC HALSEY PULP MILL	<a href="#">0.1360 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">DE-0017</a>	10/26/2001 SPI POLYOLS, INC. SPI POLYOLS, INC.	<a href="#">0.3000 LB/MMBTU HEAT INPUT</a>

El cuadro 9 presenta los resultados de una búsqueda en la base de datos RBLC con la opción de *la menor tasa de emisión (Lowest Emission Rate)* para la categoría de emisiones de CO producidas por calderas alimentadas con combustóleo (100 a 250 millones de Btu/hr). Las menores tasas de emisión reflejan el uso de “prácticas adecuadas de combustión” para controlar el CO. Asimismo, se observa que las tasas de emisión fueron menores en 2001 que en 2003. Puesto que la cantidad de CO producido por fuentes de combustión estacionarias representa una parte muy pequeña del volumen total emitido por fuentes móviles, los análisis MTD por lo general concluyen que no se requiere ningún control. Sin embargo, si se presta mayor atención a la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por fuentes de combustión estacionarias, lograda mediante modificaciones a la eficiencia de combustión de las calderas (una combustión más pobre), se observará que las emisiones de CO se disparan. Algunos estados han adoptado límites de 200 ppm de CO para asegurar que la operación de las calderas no se vuelve demasiado ineficiente.

**Cuadro 9 Resultados de la búsqueda de emisiones de CO producidas por calderas alimentadas con combustóleo, RBLC**

RBLCID	PERMIT DATE	CORPORATE/COMPANY NAME & FACILITY NAME	STANDARD EMISSION LIMIT	
<input type="checkbox"/>	<a href="#">NC-0092</a>	05/10/2001	INTERNATIONAL PAPER COMPANY RIEGELWOOD MILL	<a href="#">0.0330 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OH-0241</a>	11/15/2001	MILLER BREWING COMPANY MILLER BREWING COMPANY - TRENTON	<a href="#">0.0340 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">OR-0031</a>	03/02/2001	POPE & TALBOT, INC HALSEY PULP MILL	<a href="#">0.0350 LB/MMBTU</a>
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">VA-0278</a>	03/31/2003	Virginia Commonwealth University VCU EAST PLANT	<a href="#">0.1000 LB/MMBTU</a>

#### 8.4 Reglamentos vigentes en EU

Es posible que una caldera de 200 mmBtu/hr construida, reconstruida o modificada tenga que cumplir con las Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas (NSPS, por sus siglas en inglés) (CFR 40 parte 60 subparte Db). Las NSPS establecen las normas de emisión para SO<sub>2</sub>, partículas suspendidas y NO<sub>x</sub>. Los límites difieren en función del tipo de combustible (carbón, combustóleo, gas natural) y la clase de caldera (de baja y de alta liberación de calor, entre otros). Existe un nuevo reglamento sobre contaminantes atmosféricos peligrosos (CFR 40 parte 63 subparte DDDDD) aplicable a calderas industriales, comerciales e institucionales con emisiones de más de 10 tpa de CAP. El propósito de la reglamentación es reducir al mínimo las emisiones de metales peligrosos (cadmio, cromo, mercurio, níquel, etc.) y de compuestos orgánicos peligrosos (acetaldehídos, formaldehídos). El control de los metales se realizará con tecnología tradicional de control, incluidos lavadores y precipitadores electrostáticos (PE), en tanto que los compuestos orgánicos se controlarán mediante prácticas adecuadas de combustión, con monitoreo de niveles de CO.

#### 8.5 Recursos para las opciones de control de emisiones

Un recurso para identificar opciones de control de emisiones es la base de datos sobre tecnologías ambientales nuevas e incipientes del Centro de Tecnología del Aire Limpio (*New and Emerging Environmental Technologies [NEET] Clean Air Technologies Database*), auspiciada por la EPA. Esta base de datos puede consultarse a través del vínculo correspondiente en la base de datos RBLC o directamente en: <<http://neet.rti.org/>>. Al hacer la búsqueda por contaminante, fuente estacionaria, emisiones capturadas y disponibilidad comercial se obtuvo una lista de opciones de control. Además, el documento *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire (EPA Air Pollution Control Cost Manual—Sixth Edition; EPA 452/B-02-001)* ofrece un capítulo sobre cada

contaminante de criterio. Este manual puede consultarse electrónicamente a través de la base de datos RBLC, desde el vínculo llamado biblioteca de referencia (**Reference Library**), en: <http://www.epa.gov/ttn/catc>.

## **8.6 Revisión de las opciones para el control de emisiones de NO<sub>x</sub>**

La reducción en las emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por calderas puede lograrse ya sea modificando las condiciones de la combustión o bien aplicando alguna tecnología de tratamiento poscombustión a la corriente de escape. A menudo, ambas opciones pueden aplicarse conjuntamente. La meta de los controles de combustión es ya sea limitar la cantidad de oxígeno al interior de la cámara de combustión o bien disminuir la temperatura de combustión, pues en los dos casos se obstaculiza la formación de NO<sub>x</sub>. En las calderas de mayor tamaño, el tratamiento poscombustión de los gases de escape incluye la mayoría de las veces sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) o reducción selectiva no catalítica (SNCR, por sus siglas en inglés). A continuación se analizan todas estas técnicas.

### **8.6.1 Recirculación de gases de combustión**

La recirculación de gases de combustión (FGR, por sus siglas en inglés) consiste en reinyectar una parte de los gases de escape de vuelta al horno de la caldera, mediante el tragante o la cámara de aire del quemador. Esto permite lograr el doble objetivo del control de la combustión: disminuir la temperatura de la flama al tiempo que se reduce el contenido de oxígeno al interior de la zona de combustión. Esta técnica ha logrado reducciones en la emisión de NO<sub>x</sub> de hasta 50%. Su desventaja, al igual que ocurre con otros métodos de control de la combustión de NO<sub>x</sub>, es que menores temperaturas en el horno de la caldera dan lugar a mayores emisiones de CO, que a su vez tienen que ser controladas por otros medios.

### **8.6.2 Reducción del aire de combustión**

La reducción del aire de combustión consiste en redirigir una parte del aire contenido en la cámara de combustión para alejarlo de los quemadores y eliminarlo por la chimenea o tubo de escape. Al igual que ocurre con la FGR, esta técnica produce tanto una disminución en la temperatura de la flama como niveles reducidos de oxígeno al interior del horno de la caldera, lo que se traduce en una reducción de entre 5 y 10% en la formación de NO<sub>x</sub>. La reducción del aire de combustión también es una opción relativamente económica, pero da lugar a aumentos en las emisiones de CO.

### **8.6.3 Encendido polarizado de quemadores**

Esta técnica, más común en las calderas de mayor tamaño, consiste en alimentar los quemadores inferiores con combustible más rico que el utilizado en los niveles superiores. Ello produce una especie de combustión en dos etapas, por la que se limita el contenido de oxígeno en los quemadores inferiores. En algunos casos incluso conviene restringir por completo el flujo de combustible a los quemadores superiores, permitiendo el paso sólo del aire de los quemadores inferiores, lo que resulta en un efecto aún más marcado. Esta técnica, si bien muy específica al tipo de caldera de que se trate, permite obtener reducciones en las emisiones de NO<sub>x</sub> del orden de 10-20 por ciento.

### 8.6.4 Reducción selectiva no catalítica

La reducción catalítica no selectiva (SNCR, por sus siglas en inglés) es una técnica de tratamiento poscombustión en la que se inyecta amoníaco a la corriente de gases de combustión, el cual reacciona con los compuestos de NO<sub>x</sub>, formando nitrógeno y agua. Para que esta opción sea realmente efectiva, es preciso que al inyectar el amoníaco en la corriente ésta tenga cierta temperatura (~925 °C), y también que la cantidad de amoníaco guarde una proporción adecuada en relación con la cantidad de NO<sub>x</sub> presente. Si bien la aplicación de la SNCR en calderas no se ha generalizado tanto debido al problema de la compatibilidad de la temperatura de la corriente de escape, lo cierto es que, bien realizada, puede dar cuenta de reducciones de NO<sub>x</sub> adicionales (25-40%) a las de cualquiera de los controles de combustión utilizado.

### 8.6.5 Reducción catalítica selectiva

La reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) es similar a la SNCR en que se utiliza amoníaco como agente reactor para la reducción de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, los sistemas SCR inyectan también un catalizador que ayuda a facilitar la reacción y mejorar el desempeño. Este método también es efectivo en rangos más bajos y amplios de temperatura (260-480 °C). Además, es posible formular proporciones determinadas de NO<sub>x</sub>/amoníaco y amoníaco/catalizador, de manera que se optimice la reacción para una aplicación específica. Puesto que la SCR puede alcanzar reducciones de NO<sub>x</sub> de hasta 85% cuando se aplica en forma adecuada, su impacto económico general es de apenas \$3,520/tpa. El cuadro 10 presenta cifras para el cálculo de costos asociados a la SCR.

**Cuadro 10 Análisis de costos del control de NO<sub>x</sub> por SCR para una caldera alimentada con combustóleo**

COSTOS DIRECTOS	Factor	
COSTO DEL EQUIPO	A =	\$2,000,000
INSTRUMENTACIÓN	0.10 A	\$200,000
CONDUCTOS, EXTRACTORES Y CHIMENEAS	0.03 A	\$60,000
IMPUESTOS SOBRE LAS VENTAS	0.05 A	\$110,000
FLETE	0.05 A	<u>\$100,000</u>
TOTAL	B =	<u>\$2,470,000</u>
MANEJO E INSTALACIÓN	0.30 B	\$741,000
BASES Y SOPORTES	0.04 B	\$98,800
ELECTRICIDAD	0.08 B	\$197,600
TUBERÍA, PINTURA	0.03 B	<u>\$74,100</u>
TOTAL INSTALACIÓN	0.45 B	<u>\$1,111,500</u>
<b>COSTOS INDIRECTOS DE INSTALACIÓN</b>		
INGENIERÍA Y SUPERVISIÓN	0.20 B	\$494,000
CONSTRUCCIÓN, GASTOS DE CAMPO	0.20 B	\$494,000
ARRANQUE, PRUEBAS DE DESEMPEÑO	0.01 B	\$24,700
CONTINGENCIAS	0.03 B	<u>\$74,100</u>
TOTAL COSTOS INDIRECTOS	0.44 B	<u>\$1,086,800</u>
<b>TOTAL COSTO DE CAPITAL</b>	C =	\$4,668,300

<b>COSTO DIRECTO ANUAL</b>			
INSUMOS			\$3,000
MANTENIMIENTO			
	TIEMPO DE MANTENIMIENTO (HORAS)		150
	MANO DE OBRA @ \$40.00/HR	D =	\$6,000
	MATERIALES @ 100% DE LA MANO DE OBRA	E =	\$6,000
	TOTAL COSTOS DIRECTOS ANUALES		<u>\$15,000</u>
<b>COSTO INDIRECTO ANUAL</b>			
GASTOS INDIRECTOS	0.6 (D + E)		\$7,200
IMPUESTO SOBRE LA PROPIEDAD	0.014 C		\$65,356
SEGURO	0.02 C		\$93,366
ADMINISTRACIÓN	0.24 C		\$112,039
RECUPERACIÓN DE CAPITAL	0.149 C <sup>(1)</sup>	i = 0.08, n = 10	<u>\$695,577</u>
TOTAL COSTOS INDIRECTOS ANUALES			<u>\$973,538</u>
<b>COSTO ANUAL TOTAL</b>			\$988,538
EMISIONES CONTROLADAS (TON)		351.00 80%	<u>280.80</u>
<b>COSTO POR TONELADA CONTROLADA</b>			\$3,520

### 8.6.6 Sustitución por combustibles menos contaminantes

El mero hecho de utilizar combustóleo destilado en lugar de combustóleo residual puede dar lugar a importantes reducciones en la emisión de NO<sub>x</sub>. De acuerdo con los factores de emisión publicados, las emisiones de NO<sub>x</sub> se reducirían un 40% si se utilizara un carburante destilado. Los precios del combustóleo, tanto residual como destilado, varían día con día; el actual diferencial de precios es de \$0.16 por litro (\$0.62 por galón). Si se calcula el consumo anual de combustible con base en una operación plena de 8,760 horas al año, el impacto económico de esta opción sería de \$51,700/tpa, lo que se considera económicamente inviable.

## 8.7 Revisión de las opciones para el control de emisiones de SO<sub>2</sub>

Las emisiones de SO<sub>2</sub> serán directamente proporcionales al contenido de azufre en el combustible quemado. El combustóleo o aceite residual suele clasificarse, por su contenido de azufre, en tres categorías: 2.2%, 1.0% y 0.5%. Para el presente estudio de caso se ha presupuesto un proyecto en el que se utiliza combustóleo con 1% de azufre. A continuación se describen las opciones para el control de SO<sub>2</sub>.

### 8.7.1 Desulfuración de gases de combustión

Como tratamiento poscombustión, un sistema de desulfuración de gases de combustión (FGD, por sus siglas en inglés) utiliza un reactivo alcalino para absorber el SO<sub>2</sub> en los gases de escape y producir sulfato de sodio y de calcio. Los compuestos sólidos de sulfato obtenidos se retiran hacia otro equipo que los procesa. Las tecnologías FGD se clasifican en húmedas, semisecas y secas,

dependiendo del estado del reactivo al salir del recipiente de absorción. Se trata de procesos que pueden ser regenerativos (cuando el producto de la reacción puede tratarse y reutilizarse) o desechables (cuando los residuos se deshidratan y eliminan). Los sistemas FGD húmedos regenerativos resultan una opción atractiva puesto que tienen el potencial para controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> en niveles superiores a 95%, sus descargas de aguas residuales son mínimas y producen un compuesto de azufre con valor comercial. El impacto económico de la FGD se calculó en \$570/tpa.

### **8.7.2 Sustitución por combustibles menos contaminantes**

El mero hecho de utilizar combustóleo destilado en lugar de combustóleo residual puede dar lugar a importantes reducciones en la emisión de SO<sub>2</sub>. De acuerdo con los factores de emisión publicados, las emisiones de SO<sub>2</sub> se reducirían un 73% si se utilizara un carburante destilado. Los precios del combustóleo, tanto residual como destilado, varían día con día; el actual diferencial de precios es de \$0.16 por litro (\$0.62 por galón). Si se calcula el consumo anual de combustible con base en una operación plena de 8,760 horas al año, el impacto económico de esta opción sería de \$11,300/tpa, lo que se considera económicamente inviable.

## **8.8 Revisión de las opciones para el control de emisiones de partículas suspendidas**

El control de las partículas sólidas (PS) puede entrañar todo un desafío, ya que el tamaño y la composición de las partículas suelen variar considerablemente. Lo más común es que las partículas de mayor tamaño se eliminen de la corriente de gases de escape mediante un tratamiento poscombustión. Las partículas de menor dimensión logran escapar a estos controles en forma de vapor, y luego se condensan para formar aerosoles. Estas partículas pueden controlarse sólo si se modifica el tipo de combustible con que se alimenta la caldera.

### **8.8.1 Precipitadores electrostáticos**

Los precipitadores electrostáticos (PE) son una forma común de reducir las emisiones de PS producidas por calderas, hornos y motores. El sistema consiste en placas metálicas con carga eléctrica que atraen a las partículas cargadas, limpiando los gases de escape que se liberan por la chimenea. La eficiencia de recolección de los PE varía, dependiendo de su tamaño y calidad, pero en algunos casos se han registrado niveles de reducción superiores a 99%. El impacto económico de esta opción se calculó en \$5,430/tpa.

### **8.8.2 Filtros de tela**

Un sistema de filtros de tela es otra de las formas de control poscombustión de PS. Conformado por varias capas de filtros, junto con un sistema de limpieza, su eficacia depende del tamaño, la consistencia y la resistencia eléctrica de las partículas, así como de la cantidad de tela utilizada y la frecuencia con que se limpien los filtros. Una caldera con temperaturas más elevadas requerirá de fibras o materiales especiales para la construcción de los filtros. En muchos casos, estos sistemas han registrado niveles de eficiencia por arriba de 99 por ciento.

### **8.8.3 Ciclones**

Un ciclón consiste en inyectar aire a la corriente de escape para provocar que los gases de combustión se desplacen en espiral al interior de la chimenea o conducto de escape. Ello da lugar a que las partículas de mayor tamaño se separen del gas y se adhieran a las paredes del conducto, en forma muy similar a lo que ocurre en una centrifugadora que separa el material más denso del fluido de menor densidad. Desafortunadamente, incluso los sistemas de ciclones más eficientes sólo tienen capacidad para eliminar las partículas de mayor tamaño y, por tanto, su uso se restringe a un control de emisiones de PS previo al de sistemas de control de mayor eficiencia.

### **8.8.4 Lavadores**

Los lavadores húmedos de gases utilizan un rociador o atomizador de agua de diversos diseños y tamaños para lograr el control de emisiones de PS. Las partículas de agua se combinan con las partículas suspendidas, lo que da lugar a la formación de gotas de desecho que se condensan y caen, para su recolección, al fondo del lavador. Los lavadores húmedos pueden lograr reducciones en las emisiones de PS de hasta 95%. Desafortunadamente, estos sistemas requieren de una fuente de suministro continuo de agua y crean residuos líquidos que deben manejarse con un sistema de tratamiento de aguas residuales.

### **8.8.5 Sustitución por combustibles menos contaminantes**

El mero hecho de utilizar combustóleo destilado en lugar de combustóleo residual puede dar lugar a importantes reducciones en la emisión de PS. De acuerdo con los factores de emisión publicados, las emisiones de  $\text{NO}_x$  se reducirían un 84% si se utilizara un carburante destilado. Los precios del combustóleo, tanto residual como destilado, varían día con día; el actual diferencial de precios es de \$0.16 por litro (\$0.62 por galón). Si se calcula el consumo anual de combustible con base en una operación plena de 8,760 horas al año, el impacto económico de esta opción sería de \$98,300/tpa, lo que se considera económicamente inviable.

## ***8.9 Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO***

El monóxido de carbono se crea durante un proceso de combustión cuando el carbono excedente en el combustible reacciona con el oxígeno en el aire. Por consiguiente, sólo existen tres opciones para el control de las emisiones de CO: utilizar un combustible con menor contenido de carbono, aumentar la eficiencia de la combustión (con lo que se incrementan las emisiones de  $\text{NO}_x$ ) o aplicar un tratamiento posterior a los gases de escape.

### **8.9.1 Prácticas de combustión adecuadas**

Si bien es cierto que al aumentar la eficiencia de la cámara de combustión de la caldera se lograrán reducciones en la emisión de CO, debe considerarse también que esta práctica provocará un marcado incremento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Así, la eficiencia de la combustión deberá ubicarse en cierto intervalo que ofrezca las menores emisiones combinadas posibles de  $\text{NO}_x$  y CO dentro de los límites establecidos, de manera que se conserve la viabilidad ambiental.

### **8.9.2 Catalizadores de oxidación**

Los módulos de oxidación catalítica y los paquetes integrados de fábrica en los motores son la forma económica de eliminar o reducir las emisiones de monóxido de carbono, además de que tienen el beneficio colateral de también reducir las emisiones de hidrocarburos no quemados. Los catalizadores de oxígeno se fabrican con formulaciones de metales preciosos, durables y de alta eficacia, lo que les permite tener una caída de presión baja y una elevada actividad catalítica. Los catalizadores clásicos se elaboran con un sustrato metálico y cerámico de estructura aplanada con recubrimientos catalíticos específicos para cada aplicación. Los metales preciosos permiten altos niveles de destrucción a temperaturas de operación más bajas. El uso de formulaciones de alta actividad y resistencia permite la reducción de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos no quemados y de olores a temperaturas menores y con menor volumen de catalizador, lo que significa menores costos de operación y de capital, respectivamente. En algunos casos, pueden alcanzarse niveles de destrucción de los contaminantes de 98%. Las técnicas de oxidación catalítica se han aplicado como tratamiento poscombustión a turbinas de gas y motores alternativos, y en teoría serían también aplicables a calderas.

### **8.9.3 Catalizadores de CO**

En teoría, la oxidación de CO para convertirse en CO<sub>2</sub> podría lograrse si se añadiera el catalizador al rocío de un lavador húmedo, aplicado en el punto de mayor temperatura de la chimenea o tubo de escape. Sin embargo, esta técnica aún no se ha ensayado para esta aplicación. La incorporación de este sistema entrañaría amplios procesos de investigación y desarrollo, y se desconocerían los porcentajes de reducción en las emisiones hasta que no se hicieran mediciones previas y posteriores a la instrumentación, lo que exigiría una todavía mayor inversión de capital. Por consiguiente, se trata de una técnica que no se consideró económicamente viable para esta aplicación.

## **8.10 Conclusiones del análisis MTD**

Para PS, el fabricante del equipo especificó una tasa de emisiones de 0.1 lb/mmBtu, lo que concuerda con la norma de desempeño para fuentes nuevas que la EPA promulgó en 1984. Sin embargo, recientemente la EPA aprobó, como parte de su programa sobre contaminantes peligrosos, una norma para partículas suspendidas de 0.03 lb/mmBtu, con base en los niveles de desempeño de las calderas existentes que dan cuenta de las tasas de emisión más elevadas (12%). El análisis MTD en materia de PS concluyó que los sistemas de filtros de tela, lavador de gases o precipitador electrostático serían viables. Con base en el posible costo de operación adicional que entrañaría el mantenimiento de un sistema de filtros de tela, se eligió un PE como la mejor técnica disponible.

Para NO<sub>x</sub>, el fabricante especificó una tasa de emisión de 0.4 lb/mmBtu, que concuerda con la norma de desempeño para fuentes nuevas que la EPA promulgó en 1984. Sin embargo, se han registrado avances en la tecnología de combustión disponible en Estados Unidos, de manera que resulta fácil lograr niveles de 0.3 lb/mmBtu mediante la optimización de la combustión o la instalación de un sistema de FGR. El análisis MTD para NO<sub>x</sub> concluyó que la SCR es viable económicamente en relación con los estándares de costos vigentes en Estados Unidos, y que se trata de un sistema que puede registrar un control de más de 80% con emisiones mínimas de amoníaco.

Para SO<sub>2</sub>, el fabricante del equipo especificó una tasa de emisión de 1.0 lb/mmBtu, la cual representa un nivel fuera de los límites establecidos que requeriría de algún grado de control para cumplir con la norma de desempeño de fuentes nuevas promulgada en 1984. El análisis MTD para SO<sub>2</sub> determinó la viabilidad de aplicar algún sistema de desulfuración de gases de combustión. Con base en el potencial para revender los sulfatos capturados, se seleccionó un sistema FGD húmedo regenerativo.

Para CO, el fabricante especificó una tasa de emisión de 0.03 lb/mmBtu (50 a 100 ppm), que puede lograrse con prácticas de combustión adecuadas. Cabe observar que, con arreglo a su programa sobre contaminantes peligrosos, la EPA recientemente promulgó una norma de 400 ppm para las emisiones de CO, con base en los niveles de desempeño de las calderas existentes que dan cuenta de las tasas de emisión más elevadas (12%). En virtud de los esfuerzos para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> mediante ajustes a la combustión, los niveles de emisión de CO pueden fácilmente acercarse a 200 ppm. Puesto que el análisis MTD recomendó un control SCR (poscombustión) para las emisiones de NO<sub>x</sub>, el funcionamiento de la caldera podría cumplir con los principales puntos de eficiencia para mantener niveles de CO por debajo de la tasa especificada por el fabricante. Por tanto, el análisis MTD concluyó que el único control necesario en materia de emisiones de CO sería una “operación eficiente”.

Para COV, el fabricante especificó una tasa de emisión de 0.005 lb/mmBtu, misma que puede lograrse mediante prácticas adecuadas de combustión. La EPA da seguimiento a las emisiones de COV provenientes de calderas mediante el monitoreo de los niveles de CO, en la medida en que ambos contaminantes aumentan proporcionalmente cuando los ajustes en la operación dan lugar a una combustión ineficiente. Puesto que el análisis MTD recomendó un control SCR (poscombustión) para las emisiones de NO<sub>x</sub>, el funcionamiento de la caldera podría cumplir con los principales puntos de eficiencia para mantener niveles de COV por debajo de la tasa especificada por el fabricante. Por tanto, el análisis MTD concluyó que el único control necesario en materia de emisiones de COV sería una “operación eficiente”.

## 9.0 Estudio de caso: horno cementero que utiliza llantas como combustible alterno

Este apartado describe los procedimientos para determinar una mejor tecnología disponible para un horno cementero que utiliza llantas usadas como combustible. El estudio de caso presupone un horno cementero rotativo de proceso en seco de 150 mmBtu/hr (30 toneladas de clínker por hora), que quema llantas usadas, completas y trituradas, como fuente primaria de combustible. Esta fuente de combustible alterno se ha popularizado en años recientes en las industrias productoras de cemento, papel y generación de energía eléctrica. Las propiedades intrínsecas del material proporcionan mayor contenido de calor que el carbón y menos nitrógeno y sulfuro, lo cual puede resultar en una reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>. Este estudio supondrá la operación constante del horno. Para determinar la MTD se utilizó el proceso de evaluación descendente descrito en el apartado 3.

### 9.1 Especificaciones del proyecto

La compañía XYZ busca aprobación para construir una planta cementera que utilice llantas como combustible en un sitio que cumple con las Normas Nacionales de Calidad de Aire (NAAQS, por sus siglas en inglés). El horno rotatorio alimentado con llantas usadas se diseñó para producir 150 mmBtu/hr, y se espera que esté en operación continua. Se encontró muy poca documentación en relación con las emisiones de hornos que utilizan llantas usadas como combustible. Sin embargo, hay establecimientos en Estados Unidos, Canadá y México que actualmente queman llantas usadas, sea enteras o trituradas, a lo que se denomina combustible derivado de llantas (CDL). El cuadro 11, abajo, enlista todos los establecimientos que aparecen en la página en Internet de la Red de Justicia Energética (*Energy Justice Network*). Las tasas de emisión presentadas son hipotéticas, calculadas con base en la información recabada de algunas de las empresas enlistadas en la tabla 11, así como en información obtenida de plantas tradicionales productoras de cemento pórtland. Las emisiones se expresan en libras de sustancia contaminante por millón de unidades térmicas inglesas.

- NO<sub>x</sub>            0.40 lb/mmBtu (controladas con SNCR)
- CO              0.03 lb/mmBtu
- Partículas     0.06 lb/mmBtu (controladas con ciclón y filtros de tela)
- SO<sub>2</sub>            0.04 lb/mmBtu
- COV            0.03 lb/mmBtu

Nuevamente, estos números representan tasas teóricas, con base en diversos datos, algunos contradictorios, debido a la limitada información con que se cuenta para este tipo de aplicación. Se partió del presupuesto de que el bajo contenido de azufre en las llantas usadas resultaría en menores tasas de SO<sub>2</sub> en comparación con las producidas por la combustión de carbón y combustóleo. Asimismo, las elevadas temperaturas de flama que cabe esperar sugirieron valores bajos para las emisiones de CO y COV.

**Cuadro 11 Lista de establecimientos estadounidenses y canadienses que utilizan llantas como combustible**

Estado	Población	Compañía	Planta	Tipo
AL	Leeds	Lehigh	<a href="#">Leeds</a>	Cementera
AL	Theodore	Holcim		Cementera
AL	Mobile	IPSCO Steel		Horno de arco eléctrico
AR	Foreman	Ash Grove		Cementera
AZ	Tucson	California Portland	<a href="#">Rillito</a>	Cementera
BC	Port Alberni	Pacifica Papers		Fábrica de papel especializado (1,200 toneladas/día de papel cubierto de bajo gramaje, para directorios telefónicos y prensa)
BC	Richmond	LaFarge		Cementera
BC	Tilbury	CBR		Cementera
CA	Baja	Cemex		Cementera
CA	Cupertino	Kaiser Cement		Cementera
CA	Davenport (cerca de Santa Cruz)	RMC Lonestar	Davenport	
CA	Lebec	National Cement Co.		Cementera
CA	Lucerne Valley	Mitsubishi Cement Co.	Cushenbury	Cementera
CA	Modesto	Modesto Energy Limited Partnership (MELP)		Incinerador de llantas específicamente
CA	Mojave	California Portland	<a href="#">Mojave</a>	Cementera
CA	Monolith	Calaveras Cement Co.		Cementera
CA	Ora Grande	Riverside		Cementera
CA	Redding	California Portland		Cementera
CA	Redding	Calaveras Cement Co.		
CA	Riverside	Riverside Cement Co.	Crestmore	Cementera
CA	San Bernardino	California Portland	<a href="#">Colton</a>	Cementera
CA	Victorville	Southwestern Portland Cement	Quarry	Cementera
CO	Portland	Holnam		Cementera
CT	Sterling	Exter Energy Limited Partnership		Incinerador de llantas específicamente
FL	Brooksville	FL Crushed Stone		Cementera
FL	Brooksville	Southdown		Cementera
FL	Ridge	Wheelabrator Technologies	Ridge	Incinerador
FL	Suwannee	Suwannee American (Anderson-Columbia)		Cementera
GA	Clinchfield	Medusa		Cementera
IA	Mason City	Holcim		Cementera
ID	Inkom	Ash Grove		Cementera

IL	Ford Heights	KTI Inc. / Casella Waste Systems		Incinerador de llantas específicamente
IL	LaSalle	Illinois Cement		Cementera
IL	Oglesby	Lone Star		Cementera
KS	Humboldt	Monarch		Cementera
MD	Frederick	ESSROC		Cementera
MD	Hagerstown	Independent		Cementera
MD	Hagerstown	St. Lawrence		Cementera
MD	Union Bridge	Lehigh		Cementera
MN	Preston	Heartland Energy and Recycling		Incinerador de llantas específicamente
MO	Cape Girardea	Lone Star		Cementera
MO	Clarksville	Holcim		Cementera
MO	Columbia	Missouri University		Planta de generación eléctrica (produce vapor y electricidad para toda la universidad)
NE	Norfolk	<a href="#">Nucor Steel</a>	<a href="#">Nucor Steel Nebraska</a>	Horno de arco eléctrico
NE	Louisville	<a href="#">Ash Grove Cement</a>	<a href="#">Louisville Plant</a>	Cementera
NY	Hempstead	American Ref-Fuel		Incinerador de basura
NY	Hudson	Holcim / St. Lawrence Cement		Cementera
NY	Ticonderoga	International Paper		Fábrica de papel
NY	Auburn	<a href="#">Nucor Steel</a>	<a href="#">Nucor Auburn</a>	Horno de arco eléctrico
NY	Niagara Falls	<a href="#">WPS Empire State</a>		Planta de generación eléctrica
OR	Durkee	Pt. Ash Grove		Cementera
PA	Bessemer	ESSROC		Cementera
PA	Point Twp.	Tractebel/Viking		Incinerador de madera
PA	Allentown	Lehigh		Cementera
PA	Whitehall	LaFarge		Cementera
PA	Chester	Kimberly-Clark		Fábrica de papel (pañuelos de papel)
PA	Ebensberg	El Paso Corp.	Cambria Cogen	Planta de generación eléctrica
PA	Evansville	Lehigh Portland Cement		Cementera
PA	Lock Haven	International Paper		Fábrica de papel
QC	Joliette	St. Lawrence		Cementera
SC	Harleyville	Blue Circle		Cementera
TN	Chattanooga	Signal Mt.		Cementera
TX	Midlothian	Holcim		Cementera
TX	Midlothian	No.Tex.Cem		Cementera
UT	Devil's Slide	Holcim		Cementera
UT	Leamington	Ash Grove		Cementera
WA	Seattle	Ash Grove		Cementera

WA	Seattle	Holcim		Cementera
WI	Ashland	Xcel	Bay Front	Planta de generación eléctrica de caldeo por carbón
WV	Grant Town	American Bituminous Power LP	Grant Town Power Plant	Planta de generación eléctrica
WV	Martinsburg	Capitol Cement		Cementera

## 9.2 Cálculo de emisiones

Usando las tasas de emisiones esperadas enlistadas arriba, y con base en la producción prevista de 150 mmBtu/hr durante 8,760 horas de operación por año, se calcularon los siguientes valores expresados en toneladas al año. Nótese que algunos factores de emisión están dados en libras por tonelada de clínker producido. El calor promedio requerido para producir una tonelada de clínker de cemento es de 5 mmBtu.

- NO<sub>x</sub>            262 tpa
- CO                20 tpa
- Partículas       39 tpa
- SO<sub>2</sub>             26 tpa
- COV              20 tpa

En este estudio de caso, las opciones para el control de emisiones contaminantes en el marco del análisis MTD se evaluaron para contaminantes con tasas anuales por arriba de 1 tpa. Así, a partir de las emisiones calculadas y presentadas en la lista de arriba, el análisis MTD incluyó NO<sub>x</sub>, partículas, SO<sub>2</sub>, CO y COV.

## 9.3 Base de datos RBLC

La búsqueda en la base de datos RBLC no arrojó entradas en la categoría de hornos cementeros que utilizan CDL.

## 9.4 Reglamentos vigentes en EU

Una planta productora de cemento pórtland que sea construida, reconstruida o modificada posiblemente tendrá que cumplir con las Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas (CFR 40 parte 60, subparte F). Las NSPS establecen una norma de emisión de partículas suspendidas de 0.136 kg por tonelada (0.3 libras por tonelada, o aproximadamente 0.06 lb por mmBtu/hr) para un horno cementero. Asimismo, hay un reglamento sobre máxima tecnología de control factible (normas MACT) para contaminantes atmosféricos peligrosos (CFR 40 parte 63, subparte LLL) de la industria productora de cemento tipo pórtland. El objetivo de esta reglamentación es reducir al mínimo la emisión de los componentes peligrosos que se encuentran en las partículas suspendidas y las emisiones orgánicas. La norma para partículas establecida en las NSPS se conserva sin cambios en la norma MACT; sin embargo, ésta es más clara con respecto a las distintas tecnologías para la producción de cemento. Además, la norma MACT incluye un límite de 50 ppm para emisiones de COV.

## 9.5 Opciones para el control de emisiones

Un recurso para identificar opciones para el control de emisiones es la base de datos sobre tecnologías ambientales nuevas e incipientes del Centro de Tecnología del Aire Limpio (*New and Emerging Environmental Technologies [NEET] Clean Air Technologies Database*), auspiciada por la EPA. Esta base de datos puede consultarse a través del vínculo correspondiente en la base de datos RBLC o directamente en: <<http://neet.rti.org>>. Al hacer una búsqueda por contaminante, fuente estacionaria, emisiones capturadas y disponibilidad comercial se obtuvo una lista de opciones de control. Además, el documento *Manual de la EPA de costos de control de la contaminación del aire (EPA Air Pollution Control Cost Manual—Sixth Edition; EPA 452/B-02-001)* ofrece un capítulo sobre cada contaminante de criterio. Este manual puede consultarse electrónicamente a través de la base de datos RBLS, desde el vínculo llamado biblioteca de referencia (**Reference Library**), en: <<http://www.epa.gov/ttn/catc>>. Otro recurso fue un manual de orientación sobre técnicas alternativas de control y emisiones de NO<sub>x</sub> para las plantas productoras de cemento editado por EPA (*Alternative Control Techniques Document—NO<sub>x</sub> Emissions from Cement Manufacturing; EPA-453/R-94-004*).

## 9.6 Tecnologías para el control de partículas

Si bien el uso de llantas trituradas como combustible ofrece reducciones significativas en las emisiones de CO, SO<sub>2</sub> y HCT en comparación con los combustibles de origen fósil, datos históricos y experiencia previa indican que las llantas presentan tasas de emisión de partículas considerablemente más elevadas, así como tasas de emisión de ciertos metales, en particular plomo (Pb), arsénico (As) y zinc (Zn). Se prevé que las tasas de emisión de partículas no controladas pueden alcanzar niveles de aproximadamente 20 lb/mmBtu, mientras que la norma NSPS para hornos cementeros es de 0.136 kg por tonelada (0.06 lb/mmBtu). A fin de cumplir con las normas de calidad del aire, el fabricante del equipo propuso una tecnología de control de gases de combustión integrada por un ciclón seguido de un sistema de filtros de tela. Dado que el uso de llantas trituradas como combustible es un método relativamente único para generar energía, aún son escasas las tecnologías de control diseñadas específicamente para los hornos cementeros que funcionan a base de CDL. No obstante, se ha utilizado una gama amplia de opciones de control de partículas en aplicaciones similares, lo que ofrece soluciones prácticas aplicables también en los casos en que se emplea CDL.

### 9.6.1 Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (PE) son una herramienta común para recolectar las partículas contenidas en los gases de combustión. Consisten en placas o tubos metálicos con carga eléctrica instalados al interior de la chimenea o tubo de escape. Un primer conjunto de placas está cargado negativamente, lo que provoca que las partículas que pasan a través de las placas adquieran una carga negativa. El segundo conjunto de placas, cargado positivamente, atrapa las partículas cargadas. Las investigaciones realizadas indican que el uso de PE ha sido la única solución para el control de partículas suspendidas en los gases producidos por la combustión de CDL; de ahí que sea una opción muy atractiva como MTD.

## **Impacto ambiental**

Los sistemas PE han logrado reducciones de emisión de PS de hasta 99% en aplicaciones de control para unidades alimentadas con CDL. Además, pueden redundar en reducciones significativas de SO<sub>2</sub>. Es importante observar que ocasionalmente es preciso limpiar las placas del precipitador, lo que genera pequeñas cantidades de desechos sólidos; fuera de ello, los PE no generan efectos ambientales adversos.

## **Impacto energético**

Se requiere de energía eléctrica para cargar las placas del precipitador electrostático. La cantidad de energía requerida depende del tipo de dispositivo utilizado, el flujo de gases de escape y la tasa de reducción deseada.

## **Impacto económico**

Un sistema PE típico tendrá un costo de \$15/scfm de flujo de escape. Para un sistema de estas dimensiones ello equivaldría aproximadamente a \$750,000 de costo de capital total, o alrededor de \$17,300 por tonelada reducida.

### **9.6.2 Lavadores húmedos**

Los lavadores húmedos se han utilizado como opción para el control de emisiones de partículas suspendidas en muchas aplicaciones para fuentes estacionarias; sin embargo, la documentación disponible sobre la aplicabilidad de esta técnica a plantas que utilizan CDL es muy escasa. Teóricamente, los lavadores húmedos de gases son un medio práctico para reducir las partículas en cualquier aplicación. El principio de su funcionamiento consiste en rociar o inyectar con un atomizador agua al interior de la chimenea o tubo de escape. Las partículas de agua chocan con las de ceniza y caen en un área recolectora. Las desventajas de estos sistemas son que se requiere un suministro constante de agua y se producen aguas residuales. Además, se desconoce qué tan eficiente resultará la técnica para controlar los contaminantes específicos producidos por la combustión de llantas usadas (Zn, As, Pb, etc.). Aunque viable, no se considera ésta como la mejor opción de control debido a sus efectos ambientales adversos y la incertidumbre respecto de su capacidad para limpiar apropiadamente el humo de dichos metales pesados.

### **9.6.3 Filtros de tela**

Un sistema de filtros de tela consiste en varias capas de material similar a una tela, a través de las cuales se hace pasar el flujo de gases. Los filtros de tela retienen las partículas secas y exhalan aire fresco. Si bien son muy eficientes, tienen el doble inconveniente de que entrañan un elevado costo de capital y crean una caída de presión en la cámara de combustión, la cual, a su vez, da lugar a incrementos en los costos de operación, al tiempo que puede tener efectos imprevistos sobre el proceso de combustión. Aun cuando la alta temperatura de los gases de escape y el contenido orgánico de las partículas implican desafíos para el diseño de los sistemas de filtros de tela, la tecnología se ha utilizado en aplicaciones con desafíos similares. La obligación de cumplir con la norma NSPS de emisión de partículas suspendidas podría exigir a los hornos cementeros la eficiencia de control que ofrecen los filtros de tela.

#### **9.6.4 Ciclones**

Un ciclón simplemente acelera la velocidad de los gases de salida, ocasionando que las partículas mayores se separen del fluido, en forma muy similar a lo que ocurre en una centrifugadora. Ya que este método sólo remueve las partículas mayores, en muy pocas ocasiones se utiliza como solución única a la emisión de partículas. Además, el ciclón ocasiona una caída de presión, de manera similar a un filtro de tela, lo cual reduce la eficiencia de combustión y podría, de hecho, ocasionar un incremento en la tasa de emisión de ciertos contaminantes para esta aplicación. Se consideró que esta opción es inviable.

### **9.7 Revisión de opciones para el control de emisiones de NO<sub>x</sub>**

De acuerdo con las investigaciones realizadas, los datos que arrojan las pruebas muestran un decremento esperado de 20-30% en las emisiones de NO<sub>x</sub> cuando se utilizan llantas usadas como combustible, en comparación con el carbón. En consecuencia, la tasa de emisión objetivo se determinará con base en una revisión realizada de documentos de la EPA (para emisiones de NO<sub>x</sub>), por la que se encontró una tasa de emisiones no controladas de NO<sub>x</sub> de aproximadamente 1.0 lb/mmBtu. Si se considera el uso de CDL y el control derivado de un sistema SNCR, se puede conseguir una tasa de emisión de 0.4 lb/mmBtu. Por tanto, habrán de aplicarse métodos adicionales de control de NO<sub>x</sub>. Ya que se trata de un proyecto sin precedentes, se presupone que los controles de NO<sub>x</sub> aplicables a hornos alimentados con carbón tendrán efectos similares a los que utilicen llantas usadas como combustible. Al revisar información proveniente de otros hornos cementeros se encuentra que los sistemas SNCR tienen gran popularidad como alternativa para el control de las emisiones de NO<sub>x</sub>. Además, se explorarán otras opciones.

#### **9.7.1 Quemadores de baja producción de NO<sub>x</sub>**

Un quemador de baja producción de NO<sub>x</sub> (LNB, por sus siglas en inglés) es un quemador especialmente diseñado para controlar las temperaturas de la flama, de manera tal que se minimicen las emisiones de NO<sub>x</sub>. Al forzar la entrada de aire adicional en la zona externa de la combustión, se genera una combustión por etapas que limita las emisiones de NO<sub>x</sub> en tanto reduce la temperatura de la flama y el tiempo de residencia. Este sistema resulta eficaz como solución única para el control de las emisiones de NO<sub>x</sub>, pero a menudo se le complementa con la reducción del aire de combustión (RAC) o con un sistema de reducción selectiva no catalítica (SNCR).

#### **Impacto ambiental**

Es usual que los LNB generen reducciones de NO<sub>x</sub> en una escala de 30-50% cuando no se complementan con la reducción del aire de combustión (RAC). El uso de la técnica RAC aumentará los porcentajes de reducción. Sin embargo, la aplicación de técnicas de reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> que entrañan menores temperatura de flama y tiempo de residencia, como es el caso de los LBN, tiene el inconveniente de incrementar las emisiones de CO.

#### **Impacto energético**

Los LNB sólo requieren un ligero incremento en el consumo de energía. Las temperaturas de flama más bajas asociadas con estos sistemas significan en esencia una menor eficiencia de combustión, lo cual resulta en la necesidad de consumir más combustible para alcanzar el mismo poder de salida.

Además, un LNB utiliza compresores para controlar el flujo de aire, los cuales requieren de pequeñas cantidades de energía para operar.

### **Impacto económico**

Instalar un LNB en un dispositivo nuevo (en lugar de readecuar un quemador existente) es sorprendentemente barato, con un costo aproximado de \$0.3/kWh. Presuponiendo una eficiencia de reducción de 40% en las emisiones de NO<sub>x</sub>, este sistema tendrá un costo aproximado de \$62 por tonelada de NO<sub>x</sub> removida. Agregar un sistema RAC con una razón de \$0.5/kWh y una eficiencia esperada de 60% reduciría este costo a \$60 por tonelada de NO<sub>x</sub> removida.

### **9.7.2 Reducción selectiva no catalítica**

Un sistema de reducción selectiva no catalítica (SNCR) es un dispositivo de tratamiento poscombustión que aprovecha la capacidad de ciertos compuestos —por lo general urea o amoníaco— de reaccionar con las emisiones de NO<sub>x</sub> para formar compuestos químicos benignos. A temperaturas de 925 °C, la reacción se produce muy rápidamente, resultando en reducciones significativas de NO<sub>x</sub>. Históricamente, los sistemas SNCR han sido dispositivos muy exitosos para el control de NO<sub>x</sub> en aplicaciones con corrientes de escape de muy elevada temperatura. Los inconvenientes de la SNCR son que sus costos de operación tienden a ser muy altos y que los gases de escape deben cumplir con ciertos valores de temperatura y presión para que el dispositivo funcione de manera adecuada.

### **Impacto ambiental**

En condiciones de operación óptimas, la instalación de un SNCR permite lograr reducciones en las emisiones NO<sub>x</sub> aproximadamente 60% superiores a las de cualquier control de emisiones previo a la combustión (como LNB o RAC). Sin embargo, la eficiencia y las tasas de emisión finales resultan muy difíciles de anticipar debido a que dependen de la unidad SNCR, así como de la presión y temperatura que alcance el cañón de la chimenea. Si bien las tasas de alimentación de amoníaco en los sistemas SNCR están concebidas para reducir al mínimo la emisión de amoníaco, la mayoría de los fabricantes especifica una tasa de emisión de este compuesto de entre 2 y 10 pmm.

### **Impacto energético**

Los atomizadores de amoníaco requieren cierto consumo de energía, además de que la operación del sistema SNCR también implica cierto aumento indirecto en el consumo energético, entre otros motivos por la energía necesaria para crear y transportar el amoníaco. Fuera de ello, los sistemas SNCR no tienen un efecto significativo en el uso de energía.

### **Impacto económico**

La instalación de un sistema SNCR para un proyecto de esta envergadura tiene un costo esperado de alrededor de \$60,000, además de los costos de mantenimiento anual y de la urea. A este precio, con una eficiencia esperada de 60%, el sistema costará \$22,800 por tonelada de NO<sub>x</sub> removida. Si se le aplica junto con un sistema LNB y RAC, se esperaría que la eficiencia total del sistema se incrementara hasta aproximadamente 90%. En estas condiciones, el costo total será de \$15,200 por tonelada de NO<sub>x</sub> removida.

### **9.7.3 Reducción catalítica selectiva**

Un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés) trabaja de manera muy similar a un sistema SNCR. La diferencia entre ambos es que los sistemas SCR tienen además una malla catalítica de metales preciosos en el cañón de la chimenea que facilita una reacción más eficiente en un intervalo de temperatura más amplio. Si bien permiten que la SCR sea más eficiente que la SNCR, los catalizadores utilizados en los sistemas SCR son muy caros y no del todo necesarios en condiciones en las que se cumplen las temperaturas de reacción ideales. Ya que el costo del catalizador incrementa los, de por sí, altos costos por tonelada de un SNCR, se consideró que esta opción es técnicamente inviable.

## **9.8 Revisión de las opciones para el control de emisiones de CO**

Durante el proceso de combustión se genera monóxido de carbono cuando el carbono excedente en el combustible reacciona con el oxígeno en el aire. En consecuencia, sólo hay tres opciones para su control: 1) utilizar un combustible con menor contenido de carbón, 2) incrementar la eficiencia de la combustión (con lo que se incrementan las emisiones de  $\text{NO}_x$ ) o 3) aplicar un tratamiento poscombustión a los gases de escape.

### **9.8.1 Prácticas adecuadas de combustión**

Si bien es cierto que al aumentar la eficiencia de la cámara de combustión de la caldera se lograrán reducciones en la emisión de CO, debe considerarse también que esta práctica provocará un marcado incremento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Así, la eficiencia de la combustión deberá ubicarse en cierto intervalo que ofrezca las menores emisiones combinadas posibles de  $\text{NO}_x$  y CO dentro de los límites establecidos, de manera que se conserve la viabilidad ambiental.

### **9.8.2 Catalizadores de oxidación**

Los módulos de oxidación catalítica y los paquetes integrados de fábrica en los motores son la forma económica de eliminar o reducir las emisiones de monóxido de carbono, además de que tienen el beneficio colateral de reducir también las emisiones de hidrocarburos no quemados. Los catalizadores de oxígeno se fabrican con formulaciones de metales preciosos, durables y de alta eficacia, lo que les permite tener una caída de presión baja y una elevada actividad catalítica. Los catalizadores clásicos se elaboran con un sustrato metálico y cerámico de estructura aplanada con recubrimientos catalíticos específicos para cada aplicación. Los metales preciosos permiten altos niveles de destrucción a temperaturas de operación más bajas. El uso de formulaciones de alta actividad y resistencia permite la reducción de monóxido de carbono (CO), de hidrocarburos no quemados y de olores a temperaturas menores y con menor volumen de catalizador, lo que significa menores costos de operación y de capital, respectivamente. En algunos casos, pueden alcanzarse niveles de destrucción de los contaminantes de 98%. Las técnicas de oxidación catalítica se han aplicado como tratamiento poscombustión a turbinas de gas y motores alternativos, y en teoría serían también aplicables a calderas.

### **9.8.3 Catalizadores de CO**

En teoría, la oxidación de CO para convertirse en  $\text{CO}_2$  podría lograrse si se añadiera el catalizador al rocío de un lavador húmedo, aplicado en el punto de mayor temperatura de la chimenea o tubo de

escape. Sin embargo, esta técnica aún no se ensaya para esta aplicación. La incorporación de este sistema entrañaría amplios procesos de investigación y desarrollo, y se desconocerían los porcentajes de reducción en las emisiones hasta que no se hicieran mediciones previas y posteriores a la instrumentación, lo que exigiría una todavía mayor inversión de capital. Por consiguiente, se trata de una técnica que no se consideró económicamente viable para esta aplicación.

## **9.9 Revisión de las opciones para el control de emisiones de SO<sub>2</sub>**

Las emisiones de SO<sub>2</sub> serán directamente proporcionales al contenido de azufre en el combustible quemado. Las llantas suelen tener un contenido de azufre muy bajo, en comparación con los combustibles líquidos o sólidos con los que tradicionalmente se alimentan los hornos cementeros. A continuación se describe una de las opciones para el control de SO<sub>2</sub>.

### **9.9.1 Desulfuración de gases de combustión**

Como tratamiento poscombustión, un sistema de desulfuración de gases de combustión (FGD, por sus siglas en inglés) utiliza un reactivo alcalino para absorber el SO<sub>2</sub> en los gases de escape y producir sulfato de sodio y de calcio. Los compuestos sólidos de sulfato obtenidos se retiran luego hacia otro equipo que los procesa. Las tecnologías FGD se clasifican en húmedas, semisecas y secas, dependiendo del estado del reactivo al salir del recipiente de absorción. Se trata de procesos que pueden ser regenerativos (cuando el producto de la reacción puede tratarse y reutilizarse) o desechables (cuando los residuos se deshidratan y eliminan). Los sistemas FGD húmedos regenerativos resultan una opción atractiva puesto que tienen el potencial para controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> en niveles superiores a 95%, sus descargas de aguas residuales son mínimas y producen un compuesto de azufre con valor comercial.

## **9.10 Conclusiones del análisis MTD**

Para PS, el fabricante del equipo especificó una tasa de emisión de 0.06 lb/mmBtu, equiparable a la norma de desempeño para fuentes nuevas emitida en 1977 y la norma MACT de promulgación más reciente. Debido a la decisión de utilizar llantas como combustible, se requerirá de los mejores controles de partículas disponibles sólo para cumplir con la normatividad vigente. Reducir los niveles de emisión de partículas más allá de las normas vigentes no parece razonable. Así, se considera que un sistema combinado de ciclón y filtros de tela sería la MTD. (El propósito del ciclón, como control previo, es reducir el costo de mantenimiento de los filtros de tela.)

Para el NO<sub>x</sub>, el fabricante especificó una tasa de emisión de 0.4 lb/mmBtu, equiparable a la tasa derivada del control con un sistema SNCR. Este análisis de MTD para NO<sub>x</sub> identificó que la técnica SCR es capaz de alcanzar una mayor eficiencia de control. Sin embargo, la carga de partículas y las altas temperaturas de los gases de escape podrían resultar problemáticos para la SCR. Actualmente, en EU hay una gran controversia en torno a la capacidad de los sistemas SCR para controlar las emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por los hornos cementeros. El estado de Nueva York aprobó la construcción de una nueva planta productora de cemento con un dispositivo SNCR que controla aproximadamente 60% de las emisiones de NO<sub>x</sub>. Un grupo ambientalista que cuestionó la decisión durante el proceso de audiencias públicas, aportó información sobre una planta productora de cemento en Alemania que evidenciaba la utilización exitosa de un sistema SCR para controlar las emisiones de NO<sub>x</sub> en los procesos de un horno cementero. El fabricante del catalizador SCR en

Estados Unidos señaló que, al menos por el momento, no consideraba que podría garantizar el uso efectivo de la SCR para controlar las emisiones de los gases de escape de un horno cementero a lo largo del tiempo, debido al daño potencial ocasionado por la estructura química del polvo que produce el cemento.

Para SO<sub>2</sub>, el vendedor especificó una tasa de emisión de 0.04 lb/mmBtu, lo que representa una tasa sin mecanismos de control gracias al bajo contenido de azufre que se anticipa en las llantas. Así, este análisis MTD de las emisiones de SO<sub>2</sub> concluye que no es económicamente viable el control adicional de SO<sub>2</sub>.

Para CO, el vendedor especificó una tasa de emisión de 0.03 lb/mmBtu, que puede lograrse mediante prácticas de combustión adecuadas. En virtud de los esfuerzos para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> mediante controles adicionales, los niveles de emisión de CO pueden reducirse al mínimo optimizando la combustión. Puesto que el análisis MTD recomendó un control SCR (poscombustión) para las emisiones de NO<sub>x</sub>, el funcionamiento de la caldera podría cumplir con los principales puntos de eficiencia para mantener niveles de CO por debajo de la tasa especificada por el fabricante. Por tanto, el análisis MTD concluyó que el único control necesario en materia de emisiones de CO sería una “operación eficiente”.

Para COV, el fabricante especificó una tasa de emisión de 0.03 lb/mmBtu, que puede lograrse mediante prácticas de combustión adecuadas. El nivel de 0.03 lb/mmBtu corresponde aproximadamente a 50 ppm, que es la norma MACT para la industria productora de cemento pórtland. Puesto que el análisis MTD recomendó un control SNCR (poscombustión) para las emisiones de NO<sub>x</sub>, el funcionamiento de la unidad podría cumplir con los principales puntos de eficiencia para mantener niveles de COV por debajo de la tasa especificada por el fabricante. Así, el análisis MTD concluyó que el único control necesario en materia de emisiones de COV sería una “operación eficiente”.

## Apéndice A. Normas de Desempeño para Fuentes Nuevas

### CFR 40 parte 60 - NORMAS DE DESEMPEÑO PARA FUENTES NUEVAS (NEW SOURCE PERFORMANCE STANDARDS, NSPS)

Subparte	Título
Cb	Grandes unidades de combustión de desechos urbanos
Cc	Confinamientos urbanos de desechos sólidos
Cd	Unidades de producción de ácido sulfúrico
Ce	Incineradores de desechos hospitalarios/médicos/infecciosos
D	Generadores eléctricos alimentados con combustibles fósiles y a vapor
Da	Plantas de vapor para la generación de energía eléctrica
Db	Generadores industriales/comerciales/institucionales a base de vapor
Dc	Pequeños generadores industriales/comerciales/institucionales a base de vapor
E	Incineradores
Ea	Unidades de combustión de desechos urbanos (de construcción posterior a diciembre de 1989 y anterior a septiembre de 1994)
Eb	Grandes unidades de combustión de desechos urbanos (de construcción posterior a septiembre de 1994 o reconstrucción posterior a junio de 1996)
Ec	Incineradores de desechos hospitalarios/médicos/infecciosos (de construcción posterior a junio de 1996)
F	Plantas de cemento Pórtland
G	Plantas de producción de ácido nítrico
H	Plantas de producción de ácido sulfúrico
I	Plantas de asfalto
J	Refinerías de petróleo
K	Tanques de almacenamiento (construidos entre el 11 de junio de 1973 y el 19 de mayo de 1978)
Ka	Tanques de almacenamiento (construidos entre el 18 de mayo de 1978 y el 23 de julio de 1984)
Kb	Tanques de almacenamiento (iniciados después del 23 de julio 1984)
L	Plantas de fundición secundaria de plomo
M	Plantas de producción secundaria de lingotes de bronce y latón
N	Plantas siderúrgicas construidas después del 11 de junio de 1973
Na	Plantas siderúrgicas construidas después del 20 de enero de 1983
O	Plantas de tratamiento de aguas residuales
P	Cobre
Q	Zinc
R	Plomo
S	Plantas de reducción primaria de aluminio
T	Industria de fertilizantes fosfatados
U	Plantas productoras de ácido superfosfórico
V	Plantas productoras de fosfato diamónico
W	Plantas productoras de superfosfato triple
X	Establecimientos de almacenamiento de superfosfato triple granulado
Y	Plantas de preparación de carbón
Z	Establecimientos de producción de ferroaleaciones
AA	Siderúrgicas: hornos de arco eléctrico
AAa	Siderúrgicas: hornos de arco eléctrico y tanques de descarburización con argón-oxígeno construidas después del 17 de agosto de 1983
BB	Fábricas de pulpa (de papel) kraft
CC	Fábricas de vidrio
DD	Silos de granos con elevador mecánico
EE	Recubrimiento de muebles metálicos
GG	Turbinas de gas estacionarias
HH	Plantas de producción de cal
KK	Plantas de producción de baterías de plomo ácido
LL	Plantas de procesamiento de minerales metálicos

MM	Operaciones de recubrimiento de carrocerías de automóviles y camiones ligeros
NN	Plantas de producción de roca fosfórica
PP	Plantas de producción de sulfato de amoníaco
QQ	Industria de las artes gráficas: rotograbado
RR	Operaciones de recubrimiento de etiquetas y cintas adhesivas
SS	Recubrimiento industrial de superficies: grandes dispositivos
TT	Recubrimiento de bobinas y conductores metálicos
UU	Procesamiento de asfalto y manufactura de productos de asfalto para techar
VV	Fugas de COV en la industria de manufactura de sustancias químicas orgánicas sintéticas
WW	Industria de recubrimiento de envases metálicos para bebidas
XX	Terminales de almacenamiento y distribución de gasolina
AAA	Nuevos calentadores residenciales de madera
BBB	Industria llantera
DDD	Industria de producción de polímeros
FFF	Recubrimientos e impresión con vinil flexible y uretano
GGG	Fugas de COV en refinerías de petróleo
HHH	Establecimientos de producción de fibras sintéticas
III	Procesos de unidades de oxidación por aire en industria de manufactura de sustancias químicas orgánicas sintéticas
JJJ	Solventes derivados del petróleo para el lavado en seco
KKK	Plantas de procesamiento de gas natural en tierra
LLL	Procesamiento de gas natural en tierra
NNN	Operaciones de destilación en la industria de manufactura de sustancias químicas orgánicas sintéticas
OOO	Plantas de procesamiento de minerales no metálicos
PPP	Plantas de producción de lanas aislantes de fibra de vidrio
QQQ	Emisiones de COV de sistemas de tratamiento de aguas residuales de refinerías de petróleo
RRR	Manufactura de sustancias químicas orgánicas sintéticas
SSS	Establecimientos de recubrimiento de cintas magnéticas
TTT	Recubrimiento industrial de superficies: partes plásticas para máquinas de oficina
UUU	Calcinadoras y secadoras en industrias mineras
VVV	Recubrimiento polimérico para sustratos
WWW	Confinamientos urbanos de desechos sólidos
AAAA	Pequeños confinamientos de desechos urbanos (iniciados después de agosto de 1999 o de reconstruidos a partir de junio de 2001)
BBBB	Pequeñas unidades de combustión de desechos urbanos (de construcción posterior a agosto de 1999)
CCCC	Incineración de residuos sólidos (de inicio posterior a noviembre de 1999 o reconstrucción posterior a junio de 2001)
DDDD	Incineración de residuos sólidos (de inicio posterior a noviembre de 1999)

## Apéndice B. Normas Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos

### Normas Nacionales de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Peligrosos (*National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants, NESHAP*)

Última actualización: 13 de diciembre de 2004

NORMA NESHAP (MACT) / Categorías de fuentes afectadas	Subparte del CFR
Industria aeroespacial	GG
Asbestos	M
Procesamiento de asfalto y manufactura de productos de asfalto para techar	LLLLL
Recubrimiento de carrocerías de automóviles y camiones ligeros*	III

Operaciones con residuos de benceno*	FF
Fabricación de barcos	VVVV
Manufactura de ladrillos y productos estructurales de arcilla	JJJJJ
Alfarería / Manufactura de cerámica con arcilla	KKKKK
Fabricación de productos de celulosa	UUUU
Galvanoplastia con cromo	N
Hornos de coque: impulsión, enfriamiento y baterías*	CCCCC
Hornos de coque	L
Fuentes de combustión en fábricas de celulosa y papel kraft, soda y sulfatado (MACT II: Celulosa y papel)	MM
Esterilizadores comerciales	O
Limpiadores desengrasantes orgánicos	T
Lavado en seco	M
Bancos de prueba para motores	PPPPP
Impresión, recubrimiento y teñido de telas	OOOO
Producción de ferroatleaciones	XXX
Operaciones para la fabricación de espumas de poliuretanos flexibles	MMMMM
Producción de espumas de poliuretanos flexibles	III
Manufactura de productos de fricción	QQQQQ
Distribución de gasolina (etapa 1)	R
Disposiciones generales	A
MACT + normas genéricas	YY
MACT + normas genéricas	YY
Combustión de residuos peligrosos	Parts 63,261 and 270
NESHAP sobre compuestos orgánicos peligrosos	F, G, H, I
Producción de ácido clorhídrico	NNNNN
Calderas y calentadores industriales, comerciales e institucionales	DDDDD
Torres de enfriamiento industrial	Q
Industria siderúrgica	FFFFF
Fundiciones de hierro y acero*	EEEEE
Recubrimiento industrial de superficies: grandes dispositivos	NNNN
Operaciones de acabado de pieles	TTTT
Producción de cal	AAAAA
Recubrimiento de cintas magnéticas	EE
Producción de levaduras alimenticias (antes Levadura para panadería)	CCCC
Operaciones de carga de embarcaciones marinas	Y
Células de mercurio en plantas cloroalcalinas (antes Producción de cloro)	IIII
Recubrimiento de envases metálicos	KKKK
Recubrimiento de bobinas y conductores metálicos	SSSS
Recubrimiento de muebles metálicos	RRRR
Producción de lanas minerales aislantes	DDD
Producción de recubrimientos misceláneos	HHHHH
Recubrimiento de partes y productos metálicos misceláneos	MMMM
Producción y procesos de compuestos químicos orgánicos misceláneos	FFFF
Confinamientos urbanos de desechos sólidos	AAAA
Transmisión y almacenamiento de gas natural	HHH
Operaciones de recuperación de residuos fuera de sitio	DD
Producción de petróleo y gas natural	HH
Distribución de compuestos orgánicos líquidos (distintos de la gasolina)	EEEE
Recubrimiento de papel	JJJJ
Refinerías de petróleo	CC
Refinerías de petróleo	UUU
Elaboración de productos farmacéuticos	GGG
Ácido fosfórico	AA
Fertilizantes fosfatados	BB
Recubrimiento de partes plásticas	PPPP

Productos de madera laminada y contrachapado (antes Manufactura de contrachapados y tablas de aglomerado)	DDDD
Producción de poliols de poliéter	PPP
Polímeros y resinas I	U
Polímeros y resinas II	W
Polímeros y resinas III	OOO
Polímeros y resinas IV	JJJ
Producción de cloruro y copolímeros de polivinil	J
Fabricación de cemento pórtland	LLL
Producción primaria de aluminio	LL
Fundición primaria de plomo	TTT
Producción primaria de cobre	QQQ
Refinación primaria de magnesio	TTTTT
Recubrimientos para las artes gráficas	KK
Plantas de tratamiento de propiedad pública (POTW, por sus siglas en inglés)	VVV
Celulosa y papel, MACT I	S
Celulosa y papel, MACT III	S
Motores de combustión interna alternativos	ZZZZ
Manufactura de productos refractarios	SSSSS
Producción de compuestos plásticos reforzados	WWWWW
Fabricación de llantas de caucho	XXXX
Producción secundaria de aluminio	RRR
Plantas de fundición secundaria de plomo	X
Fabricación de semiconductores	BBBBB
Recubrimientos para la construcción y reparación de barcos	II
Rehabilitación ambiental de sitios	GGGGG
Extracción de solventes para la producción de aceites vegetales	GGGG
Turbinas de combustión estacionarias*	YYYY
Proceso de decapado de acero con HCL	CCC
Procesamiento de taconita/mineral de hierro	RRRRR
Producción de tetrahidrobencaldehídos (antes Producción de dímeros de butadieno)	F
Recubrimiento de productos de madera para la construcción (antes Páneles de madera)	QQQQ
Recubrimiento de muebles de madera	JJ
Producción de lanas de fibra de vidrio	NNN