



**EPA**

# BOLETÍN TÉCNICO

## ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>), ¿POR QUÉ Y CÓMO SE CONTROLAN?

**C**LEAN  
**A**IR  
**T**ECHNOLOGY  
**C**ENTER



# **Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ¿Por Qué y Cómo Se Controlan?**

Preparado por

*Clean Air Technology Center (MD-12),  
Information Transfer and Program Integration Division,  
Office of Air Quality Planning and Standards,  
U.S. Environmental Protection Agency,  
Research Triangle Park, North Carolina 2711*

**U.S. Environmental Protection Agency  
Region 5, Library (PL-12J)  
77 West Jackson Boulevard, 12th Floor  
Chicago, IL 60604-3590**

## ACLARACIÓN

Este reporte ha sido revisado por la *Information Transfer and Program Integration Division* (División de Transferencia de Información e Integración de Programas) de la *Office of Air Quality Planning and Standards (OAQPS)* (Oficina de Planeación y Normas de Calidad del Aire), de la *Environmental Protection Agency (U.S. - EPA)* (Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.), y aprobado para su publicación. La aprobación no significa que el contenido de este reporte refleja los puntos de vista y políticas de la U.S. EPA.. La mención de nombres de marca o productos comerciales es sin propósito de patrocinio o recomendación para su uso. Copias de este reporte están disponibles a través del *National Technical Information Service* (Servicio Nacional de Información Técnica) del *U.S. Department of Commerce* (Departamento del Comercio en EE.UU.), *5285 Port Royal Road, Springfield, Virginia 22161*, número de teléfono (800) 553-6847.

## PROLOGO

El *Clean Air Technology Center - CATC* (Centro de Tecnología de Aire Limpio), sirve como un recurso en todas las áreas de las tecnologías emergentes y existentes de prevención y control de la contaminación, y proporciona acceso público a los datos e información sobre su uso, efectividad y costo. Además, el *CATC* proporcionará soporte técnico, incluyendo acceso a la base de conocimientos de la *EPA*, a agencias gubernamentales y otros, según sea la disponibilidad de recursos, en relación la operación, mantenimiento y la viabilidad técnica y económica, operación de estas tecnologías.

### Acceso Público y Transferencia de Información

*INTERNET / World Wide Web Home Page* (Página Principal en la Red Mundial)  
<http://www.epa.gov/tmn/catc>

### Comunicaciones

Línea Información: *CATC*: (919) 541-0800 (Inglés)  
Línea Información: *CATC/CICA* (en EE. UU.):(919) 541-1800 (Español)  
FAX: (919) 541-0242  
Correo electrónico: [catcmail@epamail.epa.gov](mailto:catcmail@epamail.epa.gov)

### Recursos de Datos

- ***RACT/BACT/LAER (RBLC)***  
Interrogue, vea y baje a un disco datos que usted seleccione sobre
  - Aplicaciones Tecnología Específicas para la Fuente
  - Requisitos Reguladores de Contaminación del Aire
- **PRODUCTOS DEL *CATC***
  - Baje a un disco reportes técnicos, información de costos y elementos de programación

### Programas y Centros Relacionados

- *U. S. -Mexico Border Information Center on Air Pollution (CICA)* - Centro de Información sobre Contaminación de Aire para la Frontera entre EE.UU y México.
- *SBAP - Small Business Assistance Program*, Programa de Asistencia a Negocios Pequeños
- *International Technology Transfer Center for Global Greenhouse Gases*, Centro Internacional de Transferencia de Tecnología para los Gases de Invernadero Globales

## RECONOCIMIENTOS

Este boletín técnico fue posible a través de los esfuerzos diligentes y persistentes de Lyndon Cox, Empleado Ambiental con Antigüedad con el Centro de Tecnología de Aire Limpio (CATC). Lyndon realizó un trabajo excepcional identificando las fuentes de información, recolectando los datos relativos y componiendo este boletín. El CATC también aprecia los comentarios útiles y oportunos y la cooperación de los siguientes colegas reseñantes:

Jim Eddinger, *Combustion Group* (Grupo de Combustión), *Emission Standards Division* (División de Normas de Emisión), *Air Quality Strategies and Standards Division* (Oficina de Estrategias y Normas de Calidad del Aire), *Office of Air and Radiation* (Oficina de Aire y Radiación), *U.S. EPA* (Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

Doug Grano, *Ozone Policy and Strategies Group* (Grupo de Política y Estrategias del Ozono), *Air Quality Strategies and Standards Division* (Oficina de Estrategias y Normas de Calidad del Aire), *Office of Air and Radiation*, (Oficina de Aire y Radiación), *U.S. EPA* (Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

William Vatauvuk, *Innovative Strategies and Economics Group* (Grupo de Estrategias y Economías Innovativas), *Air Quality Strategies and Standards Division* (Oficina de Estrategias y Normas de Calidad del Aire), *Office of Air and Radiation*, (Oficina de Aire y Radiación), *U.S. EPA* (Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

Ravi Strivastava, *Air Pollution Technology Branch* (Sección de Tecnología de Contaminación del Aire), *Air Pollution Prevention and Control Division* (División de Prevención y Control de la Contaminación del Aire), *National Risk Management Research Laboratory* (Laboratorio Nacional de Investigaciones sobre la Gestión de Riesgos), *Office of Research and Development* (Oficina de Investigación y Desarrollo), *U.S. EPA* (Agencia de Protección Ambiental en EE.UU.).

Además, el CATC agradece a los individuos, compañías e instituciones que suministraron la información sobre la tecnología de reducción de los óxidos de nitrógeno utilizada en la preparación de este boletín. Los contribuyentes se incluyen an en la sección de REFERENCIAS de este boletín.

## TABLA DE CONTENIDO

TEMA	Página
¿POR QUÉ DEBEMOS CONTROLAR LOS NO <sub>x</sub> ? .....	1
¿QUÉ ES UN ÓXIDO DE NITRÓGENO? .....	2
¿DE DONDE PROVIENEN LOS NO <sub>x</sub> ? .....	4
¿CÓMO AFECTAN LOS NO <sub>x</sub> EL MEDIO AMBIENTE? .....	5
¿EXISTEN OTROS ASUNTOS RELACIONADOS CON LOS NO <sub>x</sub> ? .....	7
¿CUALES PRINCIPIOS DE REDUCCIÓN Y CONTROL SON APLICABLES?.....	9
¿CUALES TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN SON DISPONIBLES? .....	13
COMBUSTIÓN EXTERNA .....	13
COMBUSTIÓN EXTERNA: MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN .....	13
MENOS EXCESO DE AIRE (MEA) .....	13
QUEMADORES FUERA DE SERVICIO (QFS) .....	13
AIRE DE SOBREFUEGO (ASF) .....	18
QUEMADORES DE BAJO NO <sub>x</sub> (QBN) .....	18
RECIRCULACIÓN DEL GAS DE CHIMENEA (RGC).....	18
INYECCIÓN DE AGUA O VAPOR .....	18
REDUCCIÓN DE PRECALENTAMIENTO DEL AIRE (RPA).....	18
RE-QUEMADO DE COMBUSTIBLE (RC).....	18
OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN .....	19
ESCALONIFICACIÓN DEL AIRE .....	19
ESCALONIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE .....	19
ÓXIGENO EN VEZ DE AIRE PARA LA COMBUSTIÓN .....	20
INYECCIÓN DE OXIDANTE .....	20
COMBUSTIÓN CATALÍTICA .....	20
COMBUSTIBLES ULTRA BAJOS EN NITRÓGENO.....	20
PLASMA NO TÉRMICO .....	21
COMBUSTIÓN EXTERNA: TECNOLOGÍA AÑADIDA DE CONTROL .....	21
REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (RCS) .....	21
REDUCCIÓN NO CATALÍTICA SELECTIVA. (RNCS).....	21
SORCIÓN - AMBAS ADSORCIÓN COMO ABSORCIÓN .....	21
PLANTEAMIENTOS DE TECNOLOGÍA COMBINADA .....	22

## TABLA DE CONTENIDO

TEMA	Página
COMBUSTIÓN INTERNA .....	22
COMBUSTIÓN INTERNA: MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN .....	23
QUEMADORES DE BAJO NO <sub>x</sub> (QBN) .....	23
INYECCIÓN DE VAPOR O AGUA .....	23
COMBUSTIÓN CATALÍTICA .....	23
RELACIÓN DE AIRE-COMBUSTIBLE Y TIPO DE ENCENDIDO .....	24
CARGA PRE-ESTRATIFICADA (CPE) .....	24
QUEMA POBRE .....	24
COMBUSTIÓN INTERNA: TECNOLOGÍA AÑADIDA DE CONTROL .....	25
REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (RCS) .....	25
REDUCCIÓN CATALÍTICA NO SELECTIVA (RCNS) .....	25
REACTORES DE PLASMA NO TÉRMICOS .....	25
¿AFECTA EL TIPO DE COMBUSTIBLE Y DE COMBUSTIÓN LA MITIGACIÓN?...25	
COMBUSTIBLES SÓLIDOS .....	26
COMBUSTIBLES LÍQUIDOS .....	27
COMBUSTIBLES SEMI-SÓLIDOS .....	27
COMBUSTIBLE GASEOSO .....	27
SISTEMAS DE COMBUSTIÓN .....	27
CALDERAS DE FONDO SECO - ENCENDIDAS EN LA PARED, POR EL FRENTE O EL LADO OPUESTO .....	28
CALDERAS DE FONDO SECO - ENCENDIDAS TANGENCIALMENTE .....	29
CALDERAS DE FONDO HÚMEDO CON LLAVE DE ESCORIA .....	30
LECHO FLUIDIZADO .....	31
FOGONEROS CON PARRILLAS CORREDIZAS .....	32
FOGONEROS CON PARRILLAS SEPARADORAS.....	32
TURBINAS DE GAS .....	33
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	35
¿CUANTO CUESTA LA REDUCCIÓN Y CONTROL DE NO <sub>x</sub> ? .....	36
¿SON SUFICIENTES ESTOS MÉTODOS? .....	39
CONCLUSIONES .....	45
REFERENCIAS .....	47

## FIGURAS

1. Mapa de los NO <sub>x</sub> .....	6
2. Mapa del Ozono .....	7

## TABLAS

1. Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) .....	2
2. Métodos de Control de NO <sub>x</sub> .....	10
3. Tecnologías Para Limitar los NO <sub>x</sub> de Combustión Externa .....	14
4. Tecnologías Para Limitar los NO <sub>x</sub> de Combustión Interna .....	23
5. Sistemas Comunes de Combustión .....	28
6. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Calderas de Fondo Seco Encendidas en la Pared, el Frente o el Lado Opuesto .....	29
7. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Calderas de Fondo Seco Encendidas Tangencialmente .....	30
8. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Calderas de Fondo Húmedo Llave de Escoria .....	31
9. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en las Unidades de Combustión con Lecho Fluidizado .....	32
10. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Fogoneros con Parrillas Corredizasas .....	33
11. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Fogoneros con Parrillas Separadoras .....	34
12. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Turbinas de Gas .....	35
13. Tecnologías de NO <sub>x</sub> Utilizadas en Motores Estacionarios de Combustión Interna .....	36
14. Costos de los Controles de NO <sub>x</sub> en 1993 .....	37
15. Costos de los Controles de NO <sub>x</sub> en 1997 .....	38
16. Costos Unitarios para las Tecnologías de Control de NO <sub>x</sub> para Fuentes Estacionarias que No Son Termoeléctricas .....	40

# Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ¿Por Qué y Cómo Se Controlan?

*"Cuando tratamos de observar sólo una cosa en la Naturaleza,  
nos damos cuenta que está conectada a todo lo demás."*

*John Muir*

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son una familia muy interesante e importante de compuestos químicos que contaminan el aire. Este boletín explica por qué los NO<sub>x</sub> son importantes contaminantes del aire y cómo los NO<sub>x</sub> se forman y reaccionan en la atmósfera. Este boletín también discute los principios en que están basadas todas las tecnologías de control y prevención de la contaminación por NO<sub>x</sub>; las tecnologías de control de NO<sub>x</sub> disponibles para varias fuentes de combustión; y el rendimiento y costo de las tecnologías de control de NO<sub>x</sub>.

## ¿POR QUÉ DEBEMOS CONTROLAR LOS NO<sub>x</sub>?

Los NO<sub>x</sub> representan a una familia de siete compuestos. En realidad, la *EPA* regula sólo el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) como un suplente para esta familia de compuestos porque es la forma más predominante de NO<sub>x</sub> en la atmósfera que es generada por actividades antropogénicas (humanas). El NO<sub>2</sub> no es sólo un contaminante importante del aire por sí sólo, sino que también reacciona en la atmósfera para formar ozono (O<sub>3</sub>) y lluvia ácida. Es importante notar que el ozono que deseamos minimizar es el ozono troposférico; esto es, el ozono en el aire ambiental que respiramos. No estamos hablando acerca del ozono en la atmósfera superior que no podemos respirar. El ozono estratosférico nos protege y protege a la tropósfera de la radiación ionizadora proveniente del sol.

La *EPA* ha establecido las *National Ambient Air Quality Standards - NAAQS* (Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental), para el NO<sub>2</sub> y el ozono troposférico. Las *NAAQS* definen los niveles de calidad del aire que son necesarios, con un margen razonable de seguridad, para proteger la salud pública (norma primaria) y el bienestar público (norma secundaria) de cualquier efecto adverso conocido o anticipado de la contaminación. La norma primaria y secundaria para el NO<sub>2</sub> es de 0.053 partes por millón (ppm) (100 microgramos por metro cúbico) de concentración anual aritmética promedio.

El ozono troposférico ha sido y sigue siendo un problema significativo de contaminación del aire en los Estados Unidos y es el principal constituyente del *smog* (la niebla visible que es el resultado de polución aérea contiene oxidantes fotoquímicos). Grandes porciones del país no cumplen con las normas *NAAQS* para el ozono y por lo tanto exponen a grandes segmentos de la población a niveles poco saludables de ozono en el aire. El NO<sub>2</sub> reacciona en la presencia del aire y la luz ultravioleta (UV) bajo la luz del sol para formar ozono y óxido nítrico (NO). A su vez, el NO reacciona con radicales libres en la atmósfera, que también son creados por la acción de la luz UV sobre compuestos orgánicos volátiles (COV). A su vez, los radicales libres reciclan NO a NO<sub>2</sub>. De esta manera, cada molécula de NO puede producir ozono un múltiplo de veces.<sup>40</sup> Esto continuará hasta que los COV sean reducidos a compuestos de cadenas cortas de carbón que

dejan de ser fotoreactivos (una reacción causada por la luz). Una molécula de COV puede por lo general realizar esto unas 5 veces.

Además del interés por las NAAQS para el NO<sub>2</sub> y el ozono, los NO<sub>x</sub> y los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) en la atmósfera son capturados por la humedad para formar lluvia ácida. La lluvia ácida, junto con la deposición seca y de nubes, afecta severamente ciertos ecosistemas y afecta directamente a algunos sectores de nuestra economía. Todos estos factores indican una necesidad obvia de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, para realizarlo con éxito, debemos entender la generación y el control de la "familia NO<sub>x</sub>" de contaminantes del aire.

### ¿QUÉ ES UN ÓXIDO DE NITRÓGENO?

El nitrógeno molecular diatómico (N<sub>2</sub>) es un gas relativamente inerte que compone alrededor del 80% del aire que respiramos. Sin embargo, el elemento químico nitrógeno (N), en forma monoatómica, puede ser reactivo y poseer niveles de ionización (llamados estados de valencia) desde más uno a más cinco. Por esto el nitrógeno puede formar varios óxidos diferentes. Usando el modelo Niels Bohr del átomo, el estado de valencia se relaciona al número de electrones que están deficientes (valencia positiva) o en exceso (valencia negativa) en el ion en comparación con la molécula neutral. La familia de compuestos NO<sub>x</sub> y sus propiedades se enumeran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Fórmula	Nombre	Valencia del Nitrógeno	Propiedades
N <sub>2</sub> O	óxido nitroso	1	gas incoloro soluble en agua
NO N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	óxido nítrico bióxido de dinitrógeno	2	gas incoloro ligeramente soluble en agua
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	trióxido de dinitrógeno	3	sólido negro, soluble en agua, se descompone en agua
NO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	bióxido de nitrógeno tetraóxido de dinitrógeno	4	gas café rojizo, muy soluble en agua, se descompone en agua
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	pentóxido de dinitrógeno	5	sólido blanco, muy soluble en agua, se descompone en agua

Los iones oxígeno se encuentran siempre con una valencia de menos 2. Dependiendo del número de iones de oxígeno (siempre balanceados por el estado de valencia del nitrógeno), los NO<sub>x</sub> pueden reaccionar ya sea para agotar o para incrementar las concentraciones de ozono. El ion nitrógeno en estos óxidos en realidad efectúa una danza en la que tiene (en ocasiones diversas) varios números de iones de oxígeno como compañeros. El nitrógeno cambia su número de compañeros cuando cambia su nivel de energía de ionización, Esto sucede siempre que el NO<sub>x</sub>:

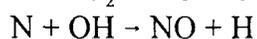
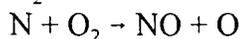
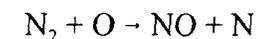
(1) es golpeado con un fotón de radiación ionizadora (UV o luz de longitud de onda corta); (2) es golpeado con suficientes fotones como para transferir juntos la energía suficiente para cambiar su nivel de ionización; (3) es catalizado; (4) es estimulado suficientemente por energía termal infraroja (IR); (5) reacciona con un radical químicamente oxidante o reductor (un fragmento iónico de una molécula); o (6) reacciona con un ion químicamente oxidante o reductor (un átomo con una carga eléctrica desbalanceada).

Cuando cualquiera de estos óxidos se disuelve en agua y se descompone, forma ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) o ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ). El ácido nítrico forma sales de nitrato cuando es neutralizado. El ácido nitroso forma sales de nitrito. De esta manera, los  $\text{NO}_x$  y sus derivados existen y reaccionan ya sea como gases en el aire, como ácidos en gotitas de agua, o como sales. Estos gases, gases ácidos y sales contribuyen en conjunto a los efectos de contaminación que han sido observados y atribuidos a la lluvia ácida.

El óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el  $\text{NO}$ , y el  $\text{NO}_2$  son los óxidos de nitrógeno más abundantes en el aire. El  $\text{N}_2\text{O}$  (también conocido como gas hilarante) es producido abundantemente por fuentes biogénicas tales como las plantas y levaduras. Es sólo levemente reactivo, y es un analgésico (o sea, a diferencia de un anestésico aún siente usted dolor, pero se siente tan bien que no le molesta). El  $\text{N}_2\text{O}$  es una sustancia agotadora de nitrógeno que reacciona con el  $\text{O}_3$  tanto en la tropósfera (o sea, por debajo de los 10,000 pies sobre el nivel del mar) como en la estratósfera (50,000 - 150,000 pies). El  $\text{N}_2\text{O}$  tiene un largo período de vida, estimado entre 100 y 150 años.

La oxidación del  $\text{N}_2\text{O}$  por el  $\text{O}_3$  puede ocurrir a cualquier temperatura y genera a la vez oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ) y  $\text{NO}$  o dos moléculas de  $\text{NO}$  unidas como su dímero, el bióxido de dinitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}_2$ ). Después el  $\text{NO}$  o  $\text{N}_2\text{O}_2$  se oxida rápidamente (en alrededor de dos horas) a  $\text{NO}_2$ . El  $\text{NO}_2$  a su vez crea una molécula de ozono a partir de una molécula de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) cuando es golpeado por un fotón de energía ionizadora proveniente de la luz solar. El  $\text{N}_2\text{O}$  es también un "Gas de Invernadero" que, como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), absorbe la radiación infraroja de longitud de onda larga para retener el calor que irradia la Tierra, y de esa manera contribuye al calentamiento global.

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de la combustión son principalmente en la forma de  $\text{NO}$ . De acuerdo a las ecuaciones Zeldovich, el  $\text{NO}$  es generado hasta el límite del oxígeno disponible (alrededor de 200,000 ppm) en el aire a temperaturas por encima de  $1300^\circ\text{C}$  ( $2370^\circ\text{F}$ ). A temperaturas menores de  $760^\circ\text{C}$  ( $1,400^\circ\text{F}$ ), el  $\text{NO}$  es generado a concentraciones mucho más bajas o no se genera en absoluto. El  $\text{NO}$  de combustión es generado en función de la relación aire a combustible y es más pronunciado cuando la mezcla está del lado magro en combustible de la relación estequiométrica <sup>50</sup> (la relación de las sustancias químicas que entran en reacción). Las ecuaciones Zeldovich son:



A excepción del  $\text{NO}$  proveniente del suelo, los relámpagos, y los incendios naturales, el  $\text{NO}$  es

antropogénico (o sea, generado por la actividad humana) en su mayor parte. Se cree que las fuentes biogénicas son responsables de menos del 10% de las emisiones totales de NO. El NO produce la misma interrupción en la absorción del oxígeno por la sangre que el monóxido de carbono (CO). Sin embargo, puesto que el NO es sólo ligeramente soluble en agua, no presenta amenaza real alguna excepto a infantes e individuos muy sensibles.

El NO<sub>2</sub> se encuentra presente en la atmósfera y en la lluvia ácida. Produce ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) al disolverse en agua. Cuando el NO<sub>2</sub> reacciona con un fotón para hacer que el O<sub>2</sub> se vuelva O<sub>3</sub>, el NO<sub>2</sub> se transforma en NO. Este NO es a su vez oxidado en cuestión de horas a NO<sub>2</sub> por medio de radicales provenientes de la fotoreacción de COV. Por lo tanto, nuestra concentración actual de ozono es el producto de la contaminación tanto de NO<sub>x</sub> como de COV.

El trióxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y el tetróxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) existen en concentraciones muy bajas en el gas de chimenea. Sin embargo, existen en concentraciones tan bajas en la atmósfera que tanto su presencia como su efecto son ignorados con frecuencia. El N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> es un par de moléculas de NO<sub>2</sub> unidas (otro dímero) y reacciona como el NO<sub>2</sub>; así, la presencia de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> puede ser enmascarada por el más abundante NO<sub>2</sub>.

El pentóxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) es la forma más altamente ionizada de óxido de nitrógeno. Es generado en el aire en una concentración muy baja, a menos que sea emitido por algún proceso (tal como una instalación productora de ácido nítrico) que esté diseñada específicamente para generarlo. El N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> es altamente reactivo, y forma ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) cuando se descompone en el agua.

Algunos expertos creen que el NO<sub>2</sub> es un buen suplente para los NO<sub>x</sub> porque el NO se convierte rápidamente en NO<sub>2</sub>, y el N<sub>2</sub>O tiene un período de vida tan largo porque no es tan altamente reactivo. Otros creen que debido a su participación en la formación del ozono, tanto el NO como el NO<sub>2</sub> deben ser considerados NO<sub>x</sub>. Aún otros creen que todos los óxidos de nitrógeno (incluyendo el N<sub>2</sub>O) necesitan ser reglamentados. El NO y el NO<sub>2</sub> son ciertamente las formas más abundantes de NO<sub>x</sub> y provienen en su mayor parte (pero no exclusivamente) de fuentes antropogénicas. El N<sub>2</sub>O es biogénico en su mayor parte, y como tal no está sujeto a regulación. Para propósitos ambientales, el uso de la concentración de NO<sub>2</sub> como un suplente de la concentración de NO<sub>x</sub> ha parecido ser suficiente, debido a que es el precursor para el ozono.

### **¿DE DONDE PROVIENEN LOS NO<sub>x</sub>?**

Los automóviles y otras fuentes móviles contribuyen alrededor de la mitad de los NO<sub>x</sub> que son emitidos. Las calderas de las plantas termoeléctricas producen alrededor del 40% de las emisiones de NO<sub>x</sub> provenientes de fuentes estacionarias.<sup>34</sup> Además, también se añaden emisiones sustanciales provenientes de fuentes antropogénicas tales como las calderas industriales, incineradores, turbinas de gas, motores estacionarios de diesel y de encendido por chispa, fábricas de hierro y acero, manufactura de cemento, manufactura de vidrio, refinerías de petróleo, y manufactura de ácido nítrico. Las fuentes naturales o biogénicas de óxidos de nitrógeno incluyen los relámpagos, incendios forestales, incendios de pastos, árboles, arbustos, pastos, y levaduras.<sup>1</sup>

Estas fuentes diversas producen diferentes cantidades de cada óxido. Las fuentes antropogénicas se pueden mostrar aproximadamente como:

Fuentes Móviles	Plantas Termoeléctricas	Todas las Demás
50%	20%	30%

Esto muestra una representación gráfica de las emisiones de nuestras dos mayores fuentes de  $\text{NO}_x$ . Si pudiéramos reducir las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de sólo estas dos categorías principales, podríamos vivir con el resto. Sin embargo, no espere usted que cualquiera de estas categorías se vuelvan cero en un futuro cercano. No podemos esperar que el automóvil, camión, autobús, y avión desaparezcan. El automóvil con cero emisiones todavía está sobre la mesa de diseño y no en la línea de producción. Además, los hábitos sociales tendrán que cambiar antes de que el consumo de electricidad pueda ser reducido.

En toda combustión hay tres oportunidades para la formación de  $\text{NO}_x$ . Estos  $\text{NO}_x$  son:

- 1.  $\text{NO}_x$  Termales** - La concentración de " $\text{NO}_x$  termales" es controlada por las concentraciones molares de nitrógeno y oxígeno y la temperatura de combustión. La combustión a temperaturas bien por debajo de  $1,300^\circ\text{C}$  ( $2,370^\circ\text{F}$ ) forma concentraciones mucho más bajas de  $\text{NO}_x$  termales.
- 2.  $\text{NO}_x$  Combustibles**- Los combustibles que contienen nitrógeno (como el carbón) crean " $\text{NO}_x$  combustibles" que resultan de la oxidación del nitrógeno ya ionizado contenido en el combustible.
- 3.  $\text{NO}_x$  Inmediatos** - Los  $\text{NO}_x$  inmediatos son formados a partir del nitrógeno molecular en el aire combinándose con combustible en condiciones ricas en combustible que existen, hasta cierto punto, en toda combustión. Este nitrógeno a su vez se oxida junto con el combustible y se convierte en  $\text{NO}_x$  durante la combustión, de la misma manera que los  $\text{NO}_x$  combustibles. La abundancia de  $\text{NO}_x$  inmediatos es disputada por los diversos escritores de artículos y reportes - probablemente porque cada uno de ellos está considerando combustibles que contienen intrínsecamente cantidades muy grandes o muy pequeñas de nitrógeno, o considerando quemadores intencionados para tener o no tener regiones ricas en combustible en la llama.

### ¿CÓMO AFECTAN LOS $\text{NO}_x$ EL MEDIO AMBIENTE?

Debido a que los  $\text{NO}_x$  son transparentes a la mayoría de las longitudes de onda de la luz (aunque el  $\text{NO}_2$  tiene un color café y el escaso  $\text{N}_2\text{O}_3$  es negro), permiten que la vasta mayoría de los fotones atraviesen y, por tanto, tienen un período de vida de por lo menos varios días. Debido a que el  $\text{NO}_2$  es reciclado a partir del  $\text{NO}$  por medio de la fotoreacción de  $\text{COV}$  para producir más ozono, el  $\text{NO}_2$  parece poseer un período de vida aún más largo y es capaz de viajar distancias considerables antes de crear ozono. Los sistemas meteorológicos generalmente viajan sobre la superficie de la tierra y permiten que los efectos atmosféricos se muevan viento abajo por varios cientos de millas. Esto fue asentado en reportes de la *EPA* hace más de veinte años. Estos

reportes encontraron que cada ciudad principal en la costa occidental de los Estados Unidos cuenta con una pluma de ozono que se extiende más de cien millas mar adentro antes de que las concentraciones disminuyan a 100 partes por mil millón (*ppb*). Otro reporte cita el mismo fenómeno para la ciudad de St. Louis. Por lo tanto, este problema no existía únicamente en la costa occidental. Puesto que el ozono en el aire limpio tiene un período de vida de sólo unas pocas horas, este fenómeno es una medida del efecto y la persistencia de tanto los COV como los NO<sub>x</sub>.

Las diferencias en las predicciones de las distancias entre la emisión de NO<sub>x</sub> y la generación de ozono pueden relacionarse con las diferencias en las velocidades (del viento) de transporte de la pluma tanto como otros factores meteorológicos y de calidad del aire. Es importante notar que, bajo las condiciones adecuadas, las plumas de las termoeléctricas pueden recorrer distancias relativamente largas durante la noche con poca pérdida de COV, NO y NO<sub>2</sub>. Estos contaminantes pueden de este modo estar disponibles y participar en reacciones fotoquímicas en ubicaciones distantes al día siguiente.<sup>41</sup> La figura 1 muestra un mapa de la concentración de NO<sub>x</sub> dibujado por el *Center for Air Pollution Impact and Trend Analysis - CAPITA* (Centro de Impacto y Análisis de Tendencias de la Contaminación del Aire), en la Universidad de Washington en St. Louis y reportado al *Ozone Transport Assessment Group - OTAG* (Grupo de Evaluación del Transporte de Ozono), un grupo nacional de trabajo que trató el problema del ozono al nivel del suelo (*smog*) y el transporte a largo plazo de la contaminación del aire a través de la parte occidental de los Estados Unidos.

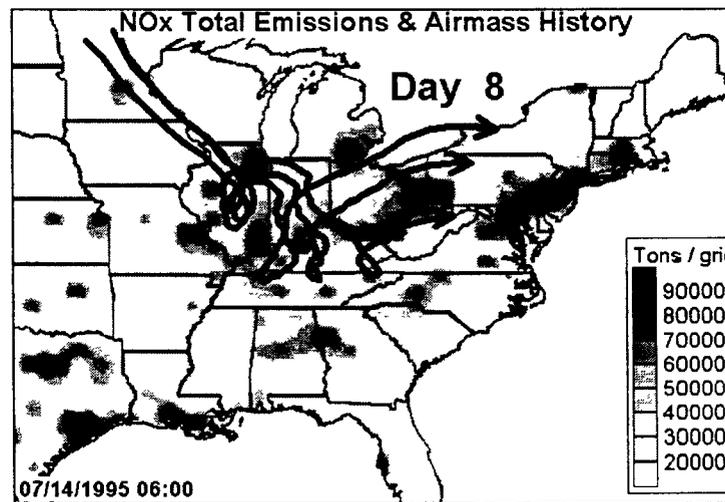


Figura 1 Mapa de los NOx

El OTAG fue producto de una asociación entre la EPA, el *Environmental Council of the States - ECOS* (Consejo Ambiental de los Estados), y varios grupos ambientales y de la industria con el objetivo de producir una evaluación a conciencia y un consenso para reducir el ozono al nivel del suelo y los contaminantes que lo causan. La versión animada de la figura 1 muestra la trayectoria de emisiones de  $\text{NO}_x$  desplazándose con el clima durante un período de 8 días.

La figura 2 es un mapa de la concentración de ozono que muestra la misma trayectoria durante el período de 8 días. La versión animada muestra las concentraciones de  $\text{NO}_x$  y ozono a la vez, moviéndose con el clima a lo largo de varios cientos de millas.<sup>5</sup>

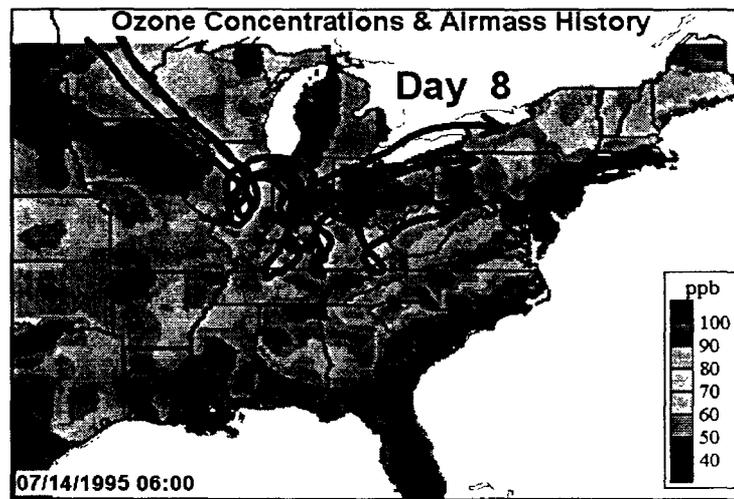


Figura 2 Mapa del Ozono

El ozono es el constituyente principal del *smog*. Entre 1970 y 1990, nosotros en los Estados Unidos hemos intentado controlar el ozono principalmente por medio del control de las emisiones de COV. Sin embargo, hemos obtenido resultados mixtos, puesto que aunque algunas zonas disminuyeron sus emisiones de COV y lograron sus objetivos de ozono, otras no los lograron. Ahora parece ser que las comunidades que fracasaron en el logro de sus objetivos de ozono pudieran no ser completamente culpables, ya que parecen afectadas por las emisiones de  $\text{NO}_x$  y COV en el aire que les llega. Para alcanzar las *NAAQS* del ozono, la EPA debe ahora reglamentar las emisiones de  $\text{NO}_x$  regionalmente.

#### ¿EXISTEN OTROS ASUNTOS RELACIONADOS CON LOS $\text{NO}_x$ ?

Sí. Los problemas de enriquecimiento de nutrientes (eutroficación) ocurren en cuerpos de agua cuando la disponibilidad ya sea de los nitratos o de los fosfatos se vuelve demasiado grande. Como resultado, la relación de nitrógeno a fósforo, silicio, y hierro y otros nutrientes es alterada. Esta alteración puede inducir cambios en el fitoplancton, producir brotes algáceos tóxicos o nocivos de color café o rojos (llamados "marea roja"), o estimular otro crecimiento vegetal. Los brotes algáceos y el crecimiento vegetal producen una sombra y causan la muerte de otras plantas

en el agua, lo que agota el contenido de oxígeno en el agua (hipoxia) cuando las plantas mueren, se hunden y se descomponen. Tal eutroficación puede volver inhabitables a los estratos de agua del fondo tanto para los animales marinos (tales como los peces y los mariscos) como para las plantas acuáticas. Puede proseguir virtualmente hasta la profundidad completa del agua. Se estima que entre el 12% y el 44% de la carga de nitrógeno de los cuerpos de agua de la costa provienen del aire.<sup>40</sup> Los lagos interiores también son afectados de esta manera.

Otra dimensión del problema es que la combustión a alta temperatura puede convertir el azufre en el combustible en  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$ . Mientras el  $\text{SO}_2$  es tóxico y forma ácido sulfuroso al ser disuelto en agua, el  $\text{SO}_3$  es tóxico e higroscópico (absorbente de agua) a la vez y forma ácido sulfúrico combinándose con la humedad en la atmósfera. El  $\text{SO}_2$  y el  $\text{SO}_3$  forman sulfitos y sulfatos cuando sus ácidos son neutralizados. Ambos ácidos pueden formar partículas sólidas reaccionando con el amoníaco en el aire. El  $\text{SO}_2$  y el  $\text{SO}_3$  también contribuyen a los cambios de pH (acidez) en el agua, los que pueden afectar adversamente tanto a la vida terrestre como a la acuática. Por eso, tanto los  $\text{NO}_x$  como los  $\text{SO}_x$  provenientes de la combustión pueden aniquilar plantas y animales.

*CAPITA* ha demostrado que existen cantidades aproximadamente iguales por peso de sulfato/sulfito, nitrato y partículas orgánicas componiendo el 90% de la Materia Particulada menor de 2.5 micras de diámetro aerodinámico (MP-2.5). Esto fue confirmado por investigadores de la Universidad Brigham Young. El Estudio de Seis Ciudades, publicado en *New England Journal of Medicine* en 1990, ha demostrado que la enfermedad y muerte prematura se correlacionan cercanamente con la cantidad de MP-2.5 en el aire. Por lo tanto, existe información epidemiológica denunciando a los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, y/o compuestos orgánicos como aerosoles de MP-2.5. Actualmente no existe evidencia que examine por separado los efectos en la salud de cada una de estas sustancias. La MP-2.5 generalmente aparece como *smog*, humo, nublado blanco, neblina o niebla que no se aclara cuando el aire se tibia. El *smog* café toma su color del bióxido de nitrógeno.

Debido a que el ácido nítrico, ácido sulfuroso y ácido sulfúrico reaccionan con el amoníaco del aire para formar cristales sólidos que son mucho menores de 2.5 micras y pueden ser sitios de formación de núcleos para el crecimiento de las partículas, necesitamos preocuparnos por cada uno de estos contaminantes. Algunas investigaciones indican que aún las partículas insolubles mucho menores de 2.5 micras de tamaño pueden exhibir efectos tóxicos severos.<sup>38</sup> Las partículas más pequeñas que han demostrado toxicidad tienen un diámetro de alrededor del 3% al 5% de la longitud de onda de cualquier color de la luz visible. Por lo tanto, estas partículas son demasiado pequeñas aún como para dispersar la luz y ni siquiera pueden ser detectadas ópticamente.

La deposición ácida ocurre a partir de los compuestos ácidos o acidificantes suspendidos en el aire, principalmente sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^{-1}$ ), que pueden ser transportados a través de grandes distancias antes de regresar a la Tierra. Esto ocurre a través de la lluvia o nieve (deposición en húmedo), niebla o agua de niebla (deposición nebulosa), o transferencia de gases o partículas (deposición en seco). Mientras la severidad del daño depende de la sensibilidad del receptor, la deposición ácida y los  $\text{NO}_x$  "representan una amenaza a los recursos naturales, ecosistemas, visibilidad, materiales, y salud pública." (sección 401(a)(1) del *Clean Air Act* - Acta de Aire Limpio).<sup>40</sup>

## ¿CUALES PRINCIPIOS DE REDUCCIÓN Y CONTROL SON APLICABLES?

La tecnología de reducción y control de  $\text{NO}_x$  es un asunto relativamente complejo. Trataremos de proporcionar una estructura al espectro de las tecnologías de prevención de la contaminación y de control de los  $\text{NO}_x$  presentando primeramente los principios que son utilizados. Después describiremos las tecnologías y estrategias más importantes para la prevención de la contaminación y el control de las emisiones.

Por favor nótese que la reducción y control de los  $\text{NO}_x$  provenientes de la manufactura de ácido nítrico y de los baños de curtido difieren de la reducción y el control en las fuentes de combustión. Todas las fuentes de combustión tienen  $\text{NO}_x$  en un gran flujo del gas de chimenea, mientras que las plantas manufactureras de ácido nítrico y los baños de curtido tratan de contener los  $\text{NO}_x$ . Los absorbedores en húmedo pueden controlar las emisiones de  $\text{NO}_x$  provenientes de plantas ácidas y del curtido, y pueden utilizar ya sea los alcalíes en agua, el agua sola, o el peróxido de hidrógeno como el líquido que captura a los  $\text{NO}_x$ .<sup>3</sup> El absorbedor en húmedo opera por medio de líquido fluyendo hacia abajo por gravedad a través de un medio de empaque, opuesto por un flujo de gas hacia arriba. Los absorbedores operan por medio del intercambio de sustancias entre gas y líquido. Esto requiere que la altura del absorbedor, el tipo de empaque, el flujo líquido, las propiedades del líquido, las propiedades del gas, y el flujo de gas deban causar colectivamente que un absorbedor tenga la eficiencia de control deseada. El capítulo 9 del *OAQPS Control Cost Manual* (Manual de Costo del Control de la *OAQPS*), proporciona una guía sobre la aplicación, medidas, y costo de estos absorbedores (llamados absorbedores de gas). Además, la Tabla 16 en este boletín presenta alguna información sobre las fuentes de  $\text{NO}_x$  que no provienen de la combustión. Aparte de eso, las fuentes de  $\text{NO}_x$  que no provienen de la combustión no son tratadas en este boletín.

Para las fuentes de combustión, este boletín define los principios de reducción y control de emisiones y establece la *Destruction and Removal Efficiency - DRE* (Eficiencia de Destrucción y Remoción), que cada tecnología es capaz de alcanzar. La efectividad de las medidas de prevención de la contaminación en reducir el  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  también es expresada en función de la DRE relativa; esto es, la cantidad de  $\text{NO}_x$  que es reducida por utilizar una tecnología de prevención en comparación con la generación de  $\text{NO}_x$  al no utilizar esa tecnología. Enseguida se discuten los tipos específicos de calderas y sistemas de combustión y tecnologías de  $\text{NO}_x$  aplicables para cada sistema. Finalmente, el costo de estas tecnologías es considerado.

Muchos sistemas de combustión nuevos incorporan métodos de prevención de  $\text{NO}_x$  dentro de su diseño y generan mucho menos  $\text{NO}_x$  que los sistemas más antiguos. Como resultado, considerar la *DRE* (aún una *DRE* relativa) para los  $\text{NO}_x$  puede resultar inapropiado. La comparación de las emisiones estimadas o reales de un sistema nuevo y bien diseñado con los  $\text{NO}_x$  emitidos por un sistema similar, bien controlado y operado pero más antiguo puede ser la mejor manera de evaluar qué tan efectivamente minimiza los  $\text{NO}_x$  un sistema de combustión nuevo.

La Tabla 2 enumera los principios o métodos utilizados para reducir los NO<sub>x</sub>. Existen básicamente seis principios, siendo el séptimo una combinación intencional de algún subgrupo de los seis.

**Tabla 2. Métodos de Control de NO<sub>x</sub> <sup>6,7</sup>**

<b>Principio o Método de Reducción o de Control de Emisiones</b>	<b>Tecnologías Exitosas</b>	<b>Método de Prevención de la Contaminación (P2) o Tecnología de Adición (A)</b>
1. Reducir la temperatura máxima.	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requemado del Gas Natural Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub> (QBN) Optimización de la Combustión Quemadores Fuera de Servicio (QFS) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor Aire de Sobrefuego (ASF) Escalonificación del Aire Reducción del Pre calentamiento del Aire Combustión Catalítica	P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2 P2
2.Reducir el tiempo de residencia a la temperatura máxima.	Inyectar Aire Inyectar Combustible Inyectar Vapor	P2 P2 P2
3. Reducción Química de los NO <sub>x</sub>	Requemado de Combustible (RC) Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub> (QBN) Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS)	P2 P2 A A
4. Oxidación de los NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico Inyectar Oxidante	A A
5. Remoción de Nitrógeno	Oxígeno en Vez de Aire Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	P2 P2
6. Utilizando un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	A A
7. Combinaciones de estos Métodos	Todos los Productos Comerciales	P2 y A

**Método 1. Reduciendo Temperatura** -- Reduciendo temperatura significa evitar la relación estequiométrica (la relación exacta de las sustancias químicas que entran en reacción).

Esencialmente, esta técnica diluye calorías con un exceso de combustible, aire, gas de chimenea, o vapor. Los controles de combustión utilizan diversas formas de esta técnica y son diferentes para los combustibles con contenido alto y bajo de nitrógeno. El control de los  $\text{NO}_x$  de la combustión de combustibles con alto contenido de nitrógeno (por ejemplo, el carbón) puede ser entendido por la relación estequiométrica neta. El control de los  $\text{NO}_x$  de la combustión de combustibles bajos en nitrógeno (tales como la gasolina y el aceite) pueden ser visto como relaciones magras contra ricas de aire a combustible. De cualquier manera, esta técnica evita la relación estequiométrica ideal porque esta es la relación que produce las temperaturas más altas que generan las concentraciones más altas de  $\text{NO}_x$  termales.

La temperatura de combustión puede ser reducida: (1) utilizando mezclas ricas en combustible para limitar la cantidad de oxígeno disponible; (2) utilizando mezclas pobres en combustible para limitar la temperatura diluyendo el suministro de energía; (3) utilizando gas de chimenea enfriado y agotado en oxígeno dentro del aire de combustión para diluir energía; (4) inyectando gas de chimenea enfriado con combustible añadido; o (5) inyectando agua o vapor. Los quemadores bajos en  $\text{NO}_x$  están basados parcialmente en este principio.<sup>8,9,10</sup> La técnica básica es reducir la temperatura de los productos de combustión con un exceso de combustible, aire, gas de chimenea, o vapor. Este método evita que la vasta mayoría del nitrógeno sea ionizada (esto es, que obtenga una valencia que no sea cero).

**Método 2. Reduciendo el Tiempo de Residencia** -- La reducción del tiempo de residencia a temperaturas de combustión altas puede ser hecho por el tiempo de encendido o inyección, también puede ser hecho por restricción de la llama a una región corta en la cual la combustión de aire llega a ser gas de chimenea. Esto es seguido inmediatamente por inyección de combustible, vapor, más aire de combustión o re-circulación de gas de chimenea. Este tiempo corto de residencia a temperatura máxima mantiene la vasta mayoría de nitrógeno de llegar a ser ionizada. Esto no representa ninguna relación al tiempo total de residencia en una caldera.

**Método 3. Reducción Química de los  $\text{NO}_x$**  -- Esta técnica proporciona una sustancia que reduce químicamente (esto es, una inversión de la oxidación) para remover el oxígeno de los óxidos de nitrógeno. Los ejemplos incluyen la Reducción Catalítica Selectiva (RCS) que utiliza amoníaco, la Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) que utiliza amoníaco o urea, y el Requemado del Combustible (RC). El plasma no térmico, una tecnología emergente, al ser utilizada con un agente reductor, reduce químicamente el  $\text{NO}_x$ . Todas estas tecnologías atentan reducir químicamente el nivel de valencia del nitrógeno a cero después de que la valencia ha llegado a ser mas alta.<sup>11</sup> Algunos quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  también están parcialmente basados en este principio.

**Método 4. Oxidación de los  $\text{NO}_x$**  -- Esta técnica levanta intencionalmente la valencia del ion nitrógeno para permitir que el agua lo absorba (esto es, basado en la mayor solubilidad de los  $\text{NO}_x$  a valencias más altas). Esto se logra por medio de un catalizador, inyectando peróxido de hidrógeno, creando ozono dentro del flujo del aire, o inyectando ozono dentro del flujo del aire. El plasma no térmico, al utilizarse sin un agente reductor, puede ser utilizado para oxidar  $\text{NO}_x$ .

Una lavadora de gas debe ser añadida al proceso para absorber las emisiones de  $N_2O_5$  a la atmósfera. Cualquier ácido nítrico resultante puede ser neutralizado por el líquido de la lavadora de gas y después ser vendido (por lo general como sal de calcio o amoníaco), o recolectado como ácido nítrico para su venta a clientes.<sup>12, 49</sup>

**Método 5. Remoción del nitrógeno de la combustión** -- Esto se logra eliminando al nitrógeno como reactivo, ya sea por medio del: (1) usando oxígeno en vez de aire en el proceso de combustión; o (2) usando combustible con un contenido ultra bajo de nitrógeno para formar menos  $NO_x$  combustibles. La eliminación del nitrógeno utilizando oxígeno tiende a producir una llama más intensa que debe ser posteriormente y adecuadamente diluida. Aunque el método 2 puede disminuir la temperatura rápidamente para evitar la formación de  $NO_x$  excesivos, no puede eliminar óxidos de nitrógeno totalmente si el aire es el medio de extinción. El gas caliente de chimenea calienta el aire que se utiliza para extinguirlo y este calentamiento genera algunos  $NO_x$  térmicos. Este método también incluye la reducción del exceso de aire neto usado en el proceso de combustión porque el aire contiene un 80 por ciento de nitrógeno. El uso de combustibles de contenido ultra bajo de nitrógeno con el oxígeno puede casi eliminar combustible e incitar los  $NO_x$ .<sup>13</sup>

**Método 6. Sorción, tanto adsorción como absorción** -- El tratamiento del gas de chimenea por la inyección de sorbentes (tales como el amoníaco, cal en polvo, óxido de aluminio, o carbón) puede remover el  $NO_x$  y otros contaminantes (principalmente el azufre). Se han realizado esfuerzos exitosos al fabricar productos de sorción en un artículos comerciales. Este tipo de tratamiento ha sido aplicado en la cámara de combustión, la chimenea, y la casa de bolsas. El uso del carbón como un absorbente no ha conducido a un producto comercial, pero a veces se utiliza para limitar las emisiones de  $NO_x$  a pesar de esto. A menudo se le refiere al método de sorción como uso de sorbente en seco, pero las suspensiones también han sido utilizadas. Este método usa la adsorción o la absorción seguida por filtración y/o precipitación electrostática para remover el sorbente.

**Método 7. Combinaciones de estos métodos** -- Muchos de estos métodos pueden ser combinados para lograr una concentración más baja de  $NO_x$  de la que se puede lograr por cualquier método por sí solo. Por ejemplo, un quemador de ciclón rico en combustible (Método 1) puede ser seguido por un quemado de combustible (Método 3) y aire de sobrefuego (Método 1). Esto ha producido una reducción de  $NO_x$  tan grande como del 70 por ciento.<sup>55</sup> Otras tecnologías de control con la finalidad de reducir principalmente las concentraciones de azufre también afectan fuertemente la concentración de óxido de nitrógeno. Por ejemplo, la tecnología  $SO_x$ - $NO_x$ - $RO_x$ - $BO_x$  (SNRB) utiliza un sorbente de cal en el gas de chimenea proveniente de la caldera para absorber el azufre. Esto es seguido por una inyección de amoníaco y RCS usando fibras de catalizador en las bolsas de filtro en las casas de bolsas. El azufre es recuperado del sorbente y regenerado por un proceso Claus. Esto ha demostrado la remoción de hasta el 90 por ciento de los  $NO_x$  junto con el 80 por ciento de los  $SO_x$ .<sup>39, 42</sup> *EBARA* del Japón reportó que un reactor de rayo de electrones con amoníaco añadido removió el 80 por ciento del  $SO_2$  y el 60 por ciento de los  $NO_x$  de una termoeléctrica en China.<sup>54</sup> *FLS Milo and Sons* reportó durante el mismo simposio que el 95 por ciento del  $SO_2$  y del 70 al 90 por ciento de los  $NO_x$  fueron removidos en

varias demostraciones de su tecnología SNAP, que está basada en un absorbedor de óxido de aluminio con regeneración Claus.<sup>5</sup>

## **¿CUALES TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN SON DISPONIBLES?**

En este reporte las tecnologías de reducción de NO<sub>x</sub> existentes se dividen en dos categorías, aplicaciones para combustión externa (por ejemplo, calderas, hornos y calentones de proceso) y aplicaciones para combustión interna (por ejemplo, motores y turbinas estacionarias de combustión interna). Estas categorías están subdivididas todavía en tecnologías para la prevención de la contaminación (que reducen la generación de NO<sub>x</sub>) y tecnologías de control de adición (que reducen las emisiones de NO<sub>x</sub>).

### **COMBUSTIÓN EXTERNA**

Las tecnologías aplicables a la combustión externa se muestran en la Tabla 3 (basada en la Tabla 2 en *Select the Right NO<sub>x</sub> Control Technology* de Stephen Wood, *Chemical Engineering Progress*, enero de 1994).

### **COMBUSTIÓN EXTERNA: MÉTODOS DE LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN**

#### **MENOS EXCESO DE AIRE (MEA)**

Excesivo flujo de aire para la combustión ha sido correlacionado con la cantidad de NO<sub>x</sub> generado. Limitando el exceso neto del flujo de aire a un nivel menor de 2% puede limitar fuertemente el contenido de NO<sub>x</sub> del gas de chimenea. Aunque existen zonas ricas y pobres en la region combustible, el exceso neto de aire total es limitado cuando se usa este planteamiento.<sup>43</sup>

#### **QUEMADORES FUERA DE SERVICIO (QFS)**

El equipo con quemadores múltiples puede tener parte de un conjunto de quemadores con algunos "quemadores fuera de servicio" (que no suministran combustible, sino aire o gas de chimenea). Esto permite que los quemadores a su alrededor suministren combustible y aire al aire o gas de chimenea fluyendo desde los QFS. El resultado es la combustión por etapas con una temperatura siempre menor que cuando todos los quemadores están en servicio. Por tanto, el NO<sub>x</sub> termal es más bajo. El grado al cual la generación de NO<sub>x</sub> es reducida depende de la relación espacial de los QFS a los demás quemadores.<sup>44</sup>

**Tabla 3. Tecnologías Para Limitar los NO<sub>x</sub> de Combustión Externa**

<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Impactos</b>	<b>Aplicabilidad</b>
Menos Exceso de Aire (MEA)	Reduce la disponibilidad del oxígeno	Modificación fácil	Baja reducción de NO <sub>x</sub>	CO alto Longitud de la llama Estabilidad de la llama	Todos los combustibles
No Estequiométrico: a. Quemadores Fuera de Servicio (QFS) b. Aire de Sobrefuego (ASF)	Combustión escalonificada	Bajo costo Sin costo capital para QFS	a. Mayor flujo de aire para el CO b. Alto costo de capital	Longitud de la llama Capacidad del extractor Presión de colector	Todos los combustibles Quemadores múltiples para QFS
Quemador de bajo NO <sub>x</sub> (QBN)	Combustión interna escenificada	Costo de operación bajo Compatible con RGC	Costo capital moderadamente alto	Longitud de la llama Capacidad del extractor Estabilidad de <i>turndown</i>	Todos los combustibles
Re-circulación del Gas de Chimenea (RGC)	<30% del gas de chimenea re-circulado con aire, disminuyendo la temperatura	Alto potencial de reducción de NO <sub>x</sub> para combustibles bajos en nitrógeno	Costo capital y costo de operación moderadamente altos Afecta la transferencia de calor y las presiones del sistema	Capacidad del extractor Presión del horno Caída en la presión del quemador Estabilidad de <i>turndown</i>	Todos los Combustibles Combustibles bajos en nitrógeno
Inyección de Agua/Vapor	Reduce la temperatura de la flama	Costo de capital moderado Reducción de NO <sub>x</sub> similar a RGC	Penalidad en la eficiencia Potencia más alta del abanico	Estabilidad de la llama Penalidad en la eficiencia	Todos los combustibles Combustibles bajos en nitrógeno
Reducción en el precalentamiento del aire	Aire no precalentado, reduce la temperatura de la llama	Alto potencial de reducción de NO <sub>x</sub>	Pérdida significativa en eficiencia (1% por 40°F)	Capacidad del extractor Penalidad en la eficiencia	Todos los combustibles como Combustibles bajos en nitrógeno

<b>Tabla 3. Tecnologías Para Limitar los NO<sub>x</sub> de Combustión Externa</b>					
<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Impactos</b>	<b>Aplicabilidad</b>
Reducción Catalítica Selectiva (RCS) (tecnología de adición)	Catalizador localizado en el flujo del aire, promueve la reacción entre el amoníaco y el NO <sub>x</sub>	Alta remoción de NO <sub>x</sub>	Costo de capital muy alto Alto costo de operación Ubicación del catalizador Aumento en la caída de presión Puede requerir enjuague con agua	Requisitos de espacio Deslizamiento del amoníaco Residuos tóxicos Desecho	Todos los combustibles
Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) (tecnología de adición) a. urea  b. amoníaco	Inyectar reactivo para reaccionar con NO <sub>x</sub>	a. Bajo costo de capital Remoción moderada de NO <sub>x</sub> Sustancia química no tóxica  b. Bajo costo de operación Remoción moderada de NO <sub>x</sub>	a. Dependiente de la temperatura Menor reducción de NO <sub>x</sub> a cargas más bajas  b. Costo de capital moderadamente alto Almacenaje, manejo, sistema de inyección del amoníaco	a. Geometría del horno Perfil de la temperatura  b. Geometría del horno Perfil de la temperatura	Todos los combustibles
Re-quemado de Combustible	Inyectar combustible para reaccionar con NO <sub>x</sub>	Costo moderado Remoción moderada de NO <sub>x</sub>	Extiende el tiempo de residencia	Perfil de la temperatura del horno	Todos los combustibles (sólido pulverizado)
Optimización de la Combustión	Cambiar la eficiencia de la combustión primaria	Costo mínimo	Extiende el tiempo de residencia	Perfil de la temperatura del horno	Gas Combustibles líquidos
Combustión Catalítica	El catalizador causa combustión a temperatura más baja	Los NO <sub>x</sub> más bajos posibles	Costo de capital muy alto Alto costo de operación Ubicación del catalizador	Requisitos de espacio Desecho	Gas Combustibles líquidos

<b>Tabla 3. Tecnologías Para Limitar los NO<sub>x</sub> de Combustión Externa</b>					
<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Impactos</b>	<b>Aplicabilidad</b>
Plasma No Térmico	El agente reductor es oxidado o se crea oxidante en el flujo	Costo moderado Fácil ubicación Alta remoción de NO <sub>x</sub>	Posibilidad de viciado Posibilidad de emisión de ozono	Utiliza energía eléctrica	Todos los combustibles
Inyectar Oxidante	Oxidante químico inyectado en el flujo	Costo moderado	Remoción de ácido nítrico	Tecnología de adición	Todos los combustibles
Oxígeno en vez de Aire	Utilizar oxígeno para oxidar combustible	Costo moderado a alto Combustión intensa	Eliminación de NO <sub>x</sub> inmediatos Alteración del horno	Equipo para manejar oxígeno	Todos los combustibles
Combustible ultrabajo en nitrógeno	Utilizar combustible bajo en nitrógeno	Elimina los NO <sub>x</sub> combustibles Sin costo capital	Aumento leve en el costo de operación	Cambio mínimo	Todos los combustibles ultrabajos en NO <sub>x</sub>
Use sorbentes en (tecnología de adición): a. Combustión b. Ducto a la Casa de Bolsas c. Ducto al Precipitador Electrostático	Utilizar una sustancia química para absorber NO <sub>x</sub> o un adsorbente para atraparlo.	Puede controlar otros contaminantes así como el NO <sub>x</sub> Costo de operación moderado	Costo de manejo del sorbente Espacio para almacenamiento y manejo del sorbente	Tecnología de adición	Todos los combustibles
Escalonificación del Aire	Admitir aire en etapas separadas	Reduce la temperatura de combustión pico	Extiende la combustión a un tiempo de residencia más largo a temperatura más baja	Añade ductos y reguladores para controlar el aire Modificación del horno	Todos los combustibles

**Tabla 3. Tecnologías Para Limitar los NO<sub>x</sub> de Combustión Externa**

<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Impactos</b>	<b>Aplicabilidad</b>
Escalonificación del Combustible	Admitir combustible en etapas separadas	Reduce la temperatura de combustión pico	Extiende la combustión a un tiempo de residencia más largo a temperatura más baja	Añade inyectores de combustible en otras ubicaciones Modificación del horno	Todos los combustibles

## **AIRE DE SOBREFUEGO (ASF)**

Cuando la combustión primaria utiliza una mezcla rica en combustible, el uso del ASF completa la combustión. Debido a que la mezcla está siempre fuera de la relación estequiométrica cuando está ocurriendo la combustión, la temperatura es mantenida baja. Después de todas las otras etapas de combustión, el resto del combustible se oxida en el aire de sobrefuego. Esto por lo general no es una cantidad enormemente excesiva de aire.

## **QUEMADORES DE BAJO NO<sub>x</sub> (QBN)**

Un QBN proporciona una llama estable que tiene varias zonas diferentes. Por ejemplo, la primera zona puede ser combustión primaria. La segunda zona puede ser Re-quemado de Combustible (RC) con combustible añadido para reducir los NO<sub>x</sub> químicamente. El QBN ha producido hasta el 80 por ciento de *DRE*.<sup>17,18,32,33</sup> Esta puede ser una de las tecnologías con alta *DRE* menos costosas para la prevención de la contaminación. Los QBN han tenido problemas con diseños que tenían la llama adjunta a los quemadores, resultando en una necesidad de mantenimiento. Creemos que estos problemas de diseño ya deben ser cosa del pasado.

## **RECIRCULACIÓN DEL GAS DE CHIMENEA (RGC)**

La recirculación del gas enfriado de chimenea reduce la temperatura diluyendo el contenido de oxígeno del aire de combustión y causando que el calor sea diluido en una masa mayor de gas. El calor en el gas de chimenea puede ser recuperado mediante un intercambiador de calor. Esta reducción de temperatura disminuye la concentración de NO<sub>x</sub> que se genera. Si la temperatura de combustión se mantiene por debajo de 1400 °F, la formación de NO<sub>x</sub> termales será insignificante.<sup>50</sup>

## **INYECCIÓN DE AGUA O VAPOR**

La inyección de agua o vapor causa que la estequiometría de la mezcla sea cambiada y agregue vapor para reducir las calorías generadas por la combustión. Ambas acciones causan que la temperatura de combustión sea más baja. Si la temperatura se reduce lo suficiente, los NO<sub>x</sub> termales no se formarán en una concentración tan grande.

## **REDUCCIÓN DEL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE (RPA)**

El aire es generalmente precalentado para enfriar los gases de chimenea, reducir las pérdidas de calor, y ganar eficiencia. Sin embargo, esto puede elevar la temperatura del aire de combustión a un nivel en el que los NO<sub>x</sub> se forman con mayor facilidad. Al reducir el precalentamiento del aire, la temperatura de combustión disminuye y la formación de NO<sub>x</sub> es suprimida. Esto puede disminuir la eficiencia, pero puede limitar la generación de NO<sub>x</sub>.

## **RE-QUEMADO DE COMBUSTIBLE (RC)**

La re-circulación del gas de chimenea enfriado con combustible añadido (éste puede ser gas natural, carbón pulverizado, o aún aceite atomizado) causa dilución de calorías, similar a la RGC,

y la combustión primaria puede ser disminuida. Además, cuando se añade una etapa de combustión secundaria, la presencia de combustible añadido reduce químicamente los  $\text{NO}_x$  recién generados a nitrógeno molecular. El combustible añadido se consume sólo parcialmente al reducir los  $\text{NO}_x$  y la quema se completa en una etapa posterior utilizando ya sea toberas de aire de combustión o de aire de sobrefuego. Se ha demostrado que esta técnica es efectiva con tiempos de residencia de 0.2 segundos a 1.2 segundos y ha logrado hasta el 76 por ciento de *DRE*.<sup>17</sup>

## OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

La optimización de la combustión se refiere al control activo de la combustión. En una caldera que utiliza gas natural, por medio de la disminución de la eficiencia de combustión el 100 al 99 por ciento, la generación de  $\text{NO}_x$  desciende a un nivel mucho más aceptable.<sup>14,15</sup> Para las calderas que utilizan carbón, se ha experimentado una reducción en  $\text{NO}_x$  del 20 al 60 por ciento. Estas medidas activas de control de combustión buscan encontrar una eficiencia óptima de combustión y controlar la combustión (y por tanto las emisiones) a esa eficiencia. Otro planteamiento utiliza un programa de red neural para encontrar el punto óptimo de control.<sup>16</sup> Aún otro planteamiento es el uso de *software* (programas) para optimizar suministros para el *output* (rendimiento) definido.<sup>52,53</sup>

Un vendedor disminuye la cantidad de aire que es pre-mezclado con combustible de la relación estequiométrica (la relación que produce la llama más caliente) para alargar la llama en el quemador y reducir la velocidad de liberación del calor por unidad de volumen. Esto puede funcionar donde los tubos de la caldera se encuentran bastante alejados del quemador. El monóxido de carbono, el combustible sin quemar, y el combustible parcialmente quemado que resultan pueden a continuación ser oxidados en el aire de sobrefuego a una temperatura más baja. La combustión debe ser optimizada para las condiciones que se presenten. Se ha reportado una *DRE* del 50 por ciento.<sup>14</sup>

## ESCALONIFICACIÓN DEL AIRE

El aire de combustión se divide en dos corrientes. La primera corriente es mezclada con combustible en una relación que produce una llama reductora. La segunda corriente es inyectada corriente abajo de la llama y vuelve la relación neta ligeramente excesiva en comparación a la relación estequiométrica. Se ha reportado una *DRE* del 99 por ciento.<sup>51</sup>

## ESCALONIFICACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Esta es la escalonificación de la combustión utilizando combustible en vez de aire. El combustible se divide en dos corrientes. La primera corriente alimenta a la combustión primaria que opera en una relación reductora de combustible a aire. La segunda corriente es inyectada corriente abajo de la combustión primaria, causando que la relación neta de combustible a aire sea sólo ligeramente oxidante. El combustible en exceso en la combustión primaria diluye el calor para reducir la temperatura. La segunda corriente oxida el combustible mientras reduce el  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$ . Se ha reportado que esto logra una *DRE* del 50 por ciento.<sup>51</sup>

## **OXÍGENO EN VEZ DE AIRE PARA LA COMBUSTIÓN**

Un ejemplo de esto es un quemador de ciclón donde la llama es baja e intensa. El aire, combustible, o vapor en exceso, inyectado justo después de la cámara de combustión por el método 2 es suficiente para apagar rápidamente el gas de combustión por debajo de la temperatura de formación de los  $\text{NO}_x$ . La combustión enseguida puede ser completada en aire de sobrefuego. El oxígeno ahora puede ser separado del aire a un costo lo suficientemente bajo para hacerlo económico.<sup>13</sup> Esta técnica ha reducido los  $\text{NO}_x$  hasta en un 20 por ciento<sup>23</sup> en quemadores que utilizan combustible convencional. Esta técnica también es utilizable con quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  para prevenir que se formen los  $\text{NO}_x$  inmediatos.

## **INYECCIÓN DE OXIDANTE**

La oxidación de nitrógeno a sus estados de valencia más altos vuelve a los  $\text{NO}_x$  solubles en agua. Cuando se lleva a cabo esto, un absorbedor de gas puede ser efectivo. Los oxidantes que han sido inyectados dentro del flujo de aire son el ozono, el oxígeno ionizado, o el peróxido de hidrógeno. El plasma no térmico genera iones de oxígeno dentro del flujo de aire para lograr esto. Otros oxidantes necesitan ser inyectados y mezclados en el flujo. El ácido nítrico puede ser absorbido por agua, peróxido de hidrógeno, o un fluido alcalino. El calcio o el amoníaco disuelto en el agua puede producir un fluido alcalino que reaccionará con los ácidos nítrico y sulfúrico para producir una sal de nitrato o sulfato que puede ser recuperado. De manera alternativa, el uso de agua o peróxido de hidrógeno para absorber a los  $\text{NO}_x$  puede proporcionar ácido nítrico para el mercado comercial.

## **COMBUSTIÓN CATALÍTICA**

El uso de un catalizador para causar que la combustión ocurra por debajo de las temperaturas de formación de  $\text{NO}$  puede proporcionar un medio adecuado para limitar la temperatura. Esta técnica no es utilizada a menudo porque es muy sensitiva a la carga. Sin embargo, donde es utilizada, la combustión catalítica puede lograr una concentración de  $\text{NO}_x$  menor de 1 ppm en el gas de chimenea.

## **COMBUSTIBLES ULTRA BAJOS EN NITRÓGENO**

Estos combustibles pueden evitar los  $\text{NO}_x$  que resultan del nitrógeno contenido en los combustibles convencionales. El resultado puede ser una reducción de hasta el 70 por ciento en las emisiones de  $\text{NO}_x$ .<sup>43</sup> Ahora existen aceites combustibles líquidos ultra bajos en nitrógeno. Estos aceites contienen de 15 a 20 veces menos nitrógeno que el aceite combustible estándar no. Este aceite ya está disponible comercialmente y a precios competitivos. El aceite ultra bajo en nitrógeno es utilizado más frecuentemente en el Sur de California donde la contaminación del aire es un problema en particular. El gas natural puede ser considerado un combustible bajo en nitrógeno. El coque (el material carbonizado del carbón) también puede ser un combustible ultrabajo en nitrógeno porque el nitrógeno en la fracción volátil del carbón es removida durante la producción de coque.

## **PLASMA NO TÉRMICO**

Utilizando metano y hexano como agentes reductores, se ha demostrado que el plasma no térmico remueve  $\text{NO}_x$  en pruebas de laboratorio con un ducto reactor de sólo 2 pies de largo. Los agentes reductores fueron ionizados por un voltaje transiente que creó un plasma no térmico. Los agentes reductores reaccionaron con  $\text{NO}_x$  y lograron una *DRE* del 94%. Existen indicaciones de que se puede lograr una *DRE* aún mayor. Un vendedor comercial exitoso utiliza amoníaco como agente reductor para reaccionar con los  $\text{NO}_x$  en un plasma generado por un rayo de electrones. Tal reactor tan corto puede llenar los requisitos de espacio de virtualmente cualquier planta. El reactor de plasma no térmico también puede ser utilizado sin agente reductor para generar ozono y usar ese ozono para aumentar la valencia del nitrógeno para absorción subsecuente como ácido nítrico.

## **COMBUSTIÓN EXTERNA: TECNOLOGÍA AÑADIDA DE CONTROL**

Los controles añadidos se aplican a un amplio rango de fuentes y combustibles. Esto difiere de las técnicas de prevención de la contaminación enumeradas anteriormente en que las técnicas de prevención deben ser adaptadas a las circunstancias de su uso.

### **REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (RCS)**

La RCS utiliza un catalizador para inyectar amoníaco para reducir los  $\text{NO}_x$  químicamente. Puede lograr una *DRE* de hasta un 94 por ciento<sup>34</sup> y es una de las técnicas de reducción de  $\text{NO}_x$  más efectivas. Sin embargo, esta tecnología tiene un costo inicial alto. Además, los catalizadores tienen una vida finita en el gas de la chimenea y algo de amoníaco "se cuele" sin ser reaccionado. Históricamente la RCS ha utilizado catalizadores de metales preciosos, pero ahora puede usar catalizadores de metal base y zeolita. Los catalizadores de metal base y zeolita operan a temperaturas mucho más diferentes que los catalizadores de metales preciosos.<sup>11</sup>

### **REDUCCIÓN NO CATALÍTICA SELECTIVA (RNCS)**

En la RSNC el amoníaco y la urea son inyectados dentro de una caldera o en ductos en una región donde la temperatura está entre 900°C y 1100°C. Esta tecnología está basada en la ionización del amoníaco y la urea por medio de la temperatura en vez de usar un catalizador o plasma no térmico. Esta "ventana" de temperatura - que varía depende del autor - es importante debido a que fuera de la ventana ya sea más amoníaco se cuele o se genera más  $\text{NO}_x$  que lo que se está reduciendo químicamente. Esta ventana de temperatura es diferente para la urea y el amoníaco. La reducción de los  $\text{NO}_x$  por RSNC puede tener una *DRE* de hasta el 70 por ciento.<sup>23,35,43</sup>

## **SORCIÓN – AMBAS ADSORCIÓN COMO ABSORCIÓN**

Varios métodos son utilizados para inyectar y remover adsorbente o absorbente. Un método rocía piedra caliza seca en polvo dentro del gas de chimenea. La piedra caliza reacciona enseguida con el ácido sulfúrico y el ácido nítrico. También existe un planteamiento con un secador por atomización que rocía una suspensión de cal en polvo y amoníaco acuoso dentro del gas de chimenea. La piedra caliza reacciona preferencialmente con los  $\text{NO}_x$ . La inyección en ducto de sorbentes en seco es otro ejemplo de esta técnica y puede reducir los contaminantes en tres etapas: (1) en la cámara de combustión, (2) en el ducto del gas de chimenea que conduce a la casa de bolsas, y (3) en el ducto del gas de chimenea que conduce al precipitador electrostático. Los productos secundarios formados por sorción son el yeso (sulfato de calcio) que se vende para la manufactura de cartón para pared, y el nitrato de amoníaco que se puede vender para producir un explosivo o un fertilizante. Se reporta que la sorción puede lograr hasta un 60 por ciento de *DRE*.<sup>23,31</sup> Otra versión utiliza carbón inyectado dentro del flujo de aire para concluir la captura de  $\text{NO}_x$ . El carbón es capturado en la casa de bolsas o el precipitador electrostático justo como otros sorbentes. Existen muchos absorbentes y adsorbentes disponibles.

## **PLANTEAMIENTOS DE TECNOLOGÍA COMBINADA**

Con muy poca frecuencia se utiliza un método o principio por sólo. La selección depende del tipo de sistema de combustión, tipo de caldera u otro dispositivo de conversión de energía, y el tipo de combustible usado. Las tecnologías se reducirán por la consideración de la *turndown* (relación de reducción), la estabilidad de combustión, la disponibilidad o acceso a los quemadores, los controles del suministro de aire, las impurezas del combustible, y el costo entre otros factores.

Hay muchos ejemplos y he aquí algunos de ellos. La reducción catalítica selectiva de  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$  puede ser seguida por oxidación selectiva del bióxido de azufre a trióxido de azufre. Después se forma ácido sulfúrico seguido por la absorción de ácido sulfúrico del gas de chimenea.<sup>30</sup>

Los QBN pueden ser utilizados en conjunción con la RCS o la RSNC para lograr una mayor *DRE* en total que cualquiera de estas podrían lograr por sí solas. La inyección de agua/vapor puede ser usada con la RCS para lograr una *DRE* mayor de la que la RCS puede lograr por sí sola. La requema de combustible y la RCS pueden ser usadas juntas así como por separado, para obtener la reducción máxima de  $\text{NO}_x$ .<sup>57</sup>

## **COMBUSTIÓN INTERNA**

Ahora nos dirigimos hacia la combustión interna, que generalmente ocurre a presiones elevadas. Una vez más, dividimos las tecnologías entre las técnicas para la prevención de la contaminación y las tecnologías de adición. Esto se muestra en la Tabla 4.

Estas técnicas pueden ser usadas en combinación. Las técnicas para la prevención de la contaminación no tienen que ser usadas por separado. Las técnicas de adición pueden ser usadas en secuencia después de una técnica de prevención de la contaminación cuando no imponen demandas conflictivas sobre el proceso.

**Tabla 4. Tecnologías Para Limitar los NO<sub>x</sub> de Combustión Interna**

<b>Prevención de Contaminación</b>	<b>Control de Adición</b>
Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS)
Inyección de Vapor/Agua	Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS)
Combustión Catalítica	Reducción Catalítica No Selectiva (RCNS)
Relación Aire-Combustible y Tipo de Encendido	Plasma No Térmico
Carga Pre-Estratificada	
Quemado Magro	

### **COMBUSTIÓN INTERNA: MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN**

#### **QUEMADORES DE BAJO NO<sub>x</sub> (QBN)**

Combinando el uso de QNB con una relación aire/combustible cuidadosamente controlada e inyección de agua/vapor puede generar emisiones tan bajas como 10 ppm de las turbinas de gas.<sup>46</sup>

#### **INYECCIÓN DE VAPOR O AGUA**

Para reducir la temperatura de combustión, se puede mezclar vapor o agua con el flujo de aire. Esto disminuye la temperatura de combustión por debajo de 1,400°F para limitar la generación de NO<sub>x</sub> a alrededor de 40 ppm.<sup>46</sup> Esto puede causar que aumente la concentración de CO e hidrocarburos sin quemar emitidos por una turbina. Sin embargo, éstos pueden ser quemados ya sea por un lecho de catalizador, dispositivo de poscombustión, u otra etapa de combustión. Este combustible y calor que de otra manera serían desperdiciados también pueden ser recuperados en calderas de cogeneración.

#### **COMBUSTIÓN CATALÍTICA**

Se usa un catalizador para reaccionar el combustible con el aire a una temperatura menor de la normal, a la cual no ocurre la generación de cantidades significantes de NO<sub>x</sub>. Se han reportado emisiones por debajo de 1 ppm.<sup>46</sup> Sin embargo, si esta combustión es para una turbina, la eficiencia de la turbina puede depender del logro de una temperatura más alta. Cuando se encuentra presente un catalizador, Ud. sólo necesita asegurar que los NO<sub>x</sub> no se formarán a la temperatura de combustión que resulte.

Esta tecnología tiene un costo de capital, operación y mantenimiento porque existe una inversión

inicial sustancial y un costo de reemplazo para el catalizador. La necesidad de reemplazo y, por lo tanto, los costos de reemplazo generalmente son guiados por las impurezas en el combustible. Sin embargo, la combustión catalítica probablemente genera el nivel más bajo de NO<sub>x</sub> térmicos.

## **RELACIÓN DE AIRE-COMBUSTIBLE Y TIPO DE ENCENDIDO**

Para los motores de combustión interna, el retraso de la inyección o encendido por chispa, o una relación aire-combustible que se aleja de las condiciones estequiométricas reducirán la temperatura máxima. Una temperatura pico más baja limitará la cantidad de la formación de NO<sub>x</sub>. Esta técnica puede lograr una eficiencia de control de hasta el 50 por ciento.<sup>19, 48</sup>

Cuando un catalizador de tres secciones es utilizado para motores con encendido de chispa, el gas de escape no debe contener más del 0.5 por ciento de oxígeno. Esta técnica puede lograr una efectividad de hasta un 98 por ciento.

El uso del encendido por plasma (una corriente alterna o sistema AC) en vez de un sistema de encendido por una chispa de corriente directa (DC) también puede permitir un mayor alejamiento *fuel lean* (magro en combustible) de la relación estequiométrica. Se ha reportado que las emisiones de NO<sub>x</sub> provenientes de motores de combustión interna que usan el encendido por plasma pueden ser reducidas por hasta un 97 por ciento.<sup>20,21, 45</sup>

El retraso de la inyección de combustible en un motor con encendido por compresión (diesel) puede reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>. La cantidad de esta reducción dependerá del motor, el sistema de válvulas, y el combustible. Un retraso excesivo del tiempo puede causar una inestabilidad de combustión o mal encendido.<sup>48</sup> Sin embargo, se encontrarán algunas afirmaciones de alta efectividad con un retraso ostentablemente excesivo.

## **CARGA PRE-ESTRATIFICADA (CPE)**

La CPE se refiere a un motor equipado con una cámara de precombustión que recibe una mezcla lo suficientemente rica en aire/combustible para encender con confiabilidad. Esta cámara de precombustión dispara un chorro de llama dentro de la cámara principal de combustión (cilindro). La cámara principal de combustión tiene una mezcla magra en combustible que necesita una llama de precombustión para encenderla con confiabilidad. La llama inyectada también produce un vórtice en la cámara principal de combustión que actúa como combustión de carga estratificada. Esto enciende la mezcla magra del cilindro principal con funcionamiento seguro. LA CPE puede lograr emisiones de NO<sub>x</sub> de 2 gramos por caballo de fuerza-hora (g/hp-hr) o 140 ppm.<sup>48</sup>

## **QUEMA POBRE**

Los motores accionados por gas natural que operan con una relación aire/combustible pobre en combustible son capaces de lograr emisiones bajas en NO<sub>x</sub>. Estos pueden lograr menos de 1.0 gramo por caballo de fuerza-hora de acuerdo al despacho *RACT-BACT-LAER Clearinghouse (RBLC)* (<http://www.epa.gov/ttn/catc>, después seleccione RBLC).

## **COMBUSTIÓN INTERNA: TECNOLOGÍA AÑADIDA DE CONTROL**

### **REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA (RCS)**

Tal como con las calderas, la RCS puede ser utilizada para obtener hasta un 90 por ciento de  $\text{NO}_x$ . Cuando se usa con un QBN o inyección de vapor/agua, los  $\text{NO}_x$  pueden reducirse a 5-10 ppm.<sup>46</sup> Con motores de encendido por compresión, los catalizadores de zeolita logran una *DRE* del 90 por ciento o mayor, mientras que los catalizadores con metales de base pueden lograr una *DRE* del 80 al 90 por ciento.<sup>48</sup>

### **REDUCCIÓN CATALÍTICA NO SELECTIVA (RCNS)**

La RCNS es la misma técnica utilizada en aplicaciones automovilísticas como un convertidor catalítico de tres secciones. No requiere la inyección de un agente reductor porque utiliza a los hidrocarburos sin quemar como un agente reductor. El catalizador requiere que el escape tenga no más del 0.5 por ciento de oxígeno. Esta técnica utiliza una mezcla rica en combustible que, combinada con la presión reversa proveniente del flujo de escape a través del catalizador, aumenta el consumo de combustible *brake-specific* (específico de freno) del motor. Sin embargo, se puede lograr un control del 90 al 98 por ciento de  $\text{NO}_x$ .<sup>48</sup>

### **REACTORES DE PLASMA NO TÉRMICOS**

Este planteamiento utiliza un plasma no térmico para ionizar amoníaco, urea, hexano, metano u otros agentes reductores inyectados dentro del gas de chimenea. Combinados con el efecto de la temperatura, el plasma no térmico ioniza el agente reductor que reacciona con los óxidos de nitrógeno logrando una *DRE* del 94 por ciento. Esto disminuye la cantidad de sustancias químicas reductoras que "se cuele" sin reaccionar.<sup>20,44</sup> El uso del plasma no térmico fue desarrollado para ionizar contaminantes y actúa como un catalizador para controlar  $\text{NO}_x$  en el escape de diesel.<sup>36</sup>

### **¿AFECTA EL TIPO DE COMBUSTIBLE Y DE COMBUSTIÓN LA MITIGACIÓN?**

Si, lo hacen. De nuevo aquí, encontramos un espectro de tipos, casi suficientes para que cada turbina de gas, motor de combustión interna, caldera, u horno parezcan únicos. El tipo de combustible puede variar con la vena de la mina de la que se obtuvo el carbón, el pozo en el campo petrolero de donde provino el petróleo crudo, la refinería para combustibles basados en petróleo, o el proveedor de gas natural. Por tanto la concentración de impurezas variará entre las fuentes, refinерías, y proveedores. Aún el "gas natural" (propano, butano, y monóxido de carbono) puede causar que varíe la composición del "gas natural".

El tipo de sistema de combustión (quemador de bajo  $\text{NO}_x$ , aire de sobrefuego, encendido tangencial, encendido de pared, etc.) también algunas veces limitará las opciones a veces. Cada tipo de caldera, cada tipo de combustible, cada sistema de combustión, y cada construcción de una caldera impone restricciones sobre lo que es posible. No es posible tratar cada combinación de sistema de combustión y combustible en detalle en este boletín técnico; sin embargo,

trataremos de mostrar el cuadro pintado mientras pintamos con brochazos anchos.

La selección de combustible y sistema de combustión a menudo depende de: (1) qué puede o no puede ajustarse; (2) si los ductos son adecuados para la sorción; (3) qué efecto tendrá sobre el mantenimiento de la caldera; (4) el perfil de la temperatura en el flujo; (5) cómo se puede modificar el sistema de combustión; (6) qué tipos de quemadores pueden ser utilizados; y (7) qué puede ser ya sea añadido o modificado. La lista no se termina aquí, sino que continúa. Consideremos algunos combustibles tomando en cuenta estas limitaciones.

## COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Al quemar un combustible sólido (tal como el carbón), el control de la combustión se logra primero logrando que el quemador principal gasifique la fracción volátil de un combustible. La fracción volátil es acarreada fuera del material carbonizado por el flujo de aire, oxidada en el flujo de aire, y se vuelve gas de chimenea. El material carbonizado necesita más aire de combustión para quemar y proporcionar todavía más calor, parte del cual se utiliza para volatilizar combustible adicional. Para controlar la temperatura de combustión, usted tradicionalmente limitaría el aire de combustión a través de la fracción de material carbonizado. La fracción volátil es oxidada en aire de sobrefuego o en una etapa secundaria de quemador y su aire debe ser controlado por separado. El balance del aire de combustión entre estas etapas debe ser corregida por la composición de combustible utilizado, la carga de la caldera, y las cargas transitorias. Debido a que todos estos parámetros variarán continuamente, se recomiendan previsiones para hacer ajustes de balanceo dinámicamente.

El carbón pulverizado puede ser quemado de manera similar al aceite. La llama es generalmente bien definida y, dependiendo del tamaño de las partículas, el *char* (residuo de combustible cuando todos los productos volátiles han sido quemados) puede permanecer en suspensión en el gas de chimenea a lo largo de la quema. La fracción volátil se quema en el aire aún al estar quemándose el material carbonizado. Si las partículas son demasiado gruesas, el material carbonizado sigue quemándose en su trayectoria después de abandonar la llama, pero deja de quemarse a cierto punto. El tecnicismo para esto es "carbón sin quemar (CSQ)", "carbón en la ceniza (CEC)", o "pérdida de encendido (PDE)". Estos términos se refieren al carbón en el material carbonizado que no se quema a lo largo de la trayectoria. El CSQ es minimizado moliendo las partículas y clasificándolas de manera que las mayores sean regresadas al molino de rodillo o triturador. Las partículas se volverán cenizas sueltas si son lo suficientemente pequeñas. Un CSQ en un rango del 0.5 al 5 por ciento se considera aceptable. Por lo tanto, el tamaño de las partículas en el momento de encendido es importante. Las preocupaciones principales son por controlar la estequiometría y la temperatura de combustión para minimizar el carbón sin quemar en la ceniza.

La biomasa es otro combustible sólido, pero la quema del material carbonizado de la biomasa es de menor preocupación que con el carbón. La biomasa no puede ser pulverizada en partículas más pequeñas, pero puede quemarse en cenizas en un tiempo corto. Tal como con la quema de todo material carbonizado, la ceniza y la ceniza suelta son problemas, pero pueden ser tratadas con una llave de escoria o depósito de cenizas, casa de bolsas, y/o precipitador electrostático.

## **COMBUSTIBLES LÍQUIDOS**

Los combustibles líquidos se queman como la fracción volátil del combustible sólido siempre que las gotitas sean suficientemente pequeñas. Los combustibles líquidos generalmente tienen un contenido menor de nitrógeno que los combustibles sólidos. La combustión de líquidos y gases puede ser controlada mucho más fácilmente que el material carbonizado del combustible sólido porque la combustión es menos dependiente de la historia de los últimos minutos transcurridos de demanda. La combustión también es completada esencialmente sin ceniza residual. La relación combustible-aire puede ser usada para controlar la temperatura de combustión y puede ser ajustada para minimizar la generación de  $\text{NO}_x$ . La llama puede ser bien definida y la combustión es esencialmente completada dentro de la llama. Por lo tanto, la quema de aceite o líquido del gas es diferente de la quema de carbón debido a que generalmente hay: menos nitrógeno en el combustible, una falta de material carbonizado, una quema completa dentro de la llama y una falta de cenizas.

## **COMBUSTIBLES SEMI-SÓLIDOS**

Los combustibles semisólidos son residuos de las refinerías. No se queman en limpio como los destilados y seguidos ni siquiera son líquidos a temperatura ambiental. Muchas impurezas típicamente presentes en el petróleo crudo están concentradas en el combustible residual semisólido. Estos combustibles pueden contener más nitrógeno que carbón, pero por lo general contienen menos azufre.<sup>50</sup> Por lo tanto, los combustibles semisólidos se encuentran en medio del carbón y el aceite. A menudo tienen algo menos de impurezas que el carbón (aunque pueden tener más impurezas), pero sí producen cenizas.

## **COMBUSTIBLE GASEOSO**

El gas natural es desulfurado antes de ser enviado por una tubería. Por lo tanto, el gas natural casi no contiene azufre, esencialmente no contiene impurezas, y no tiene cenizas. Lo único que varía es el contenido de calor por metro cúbico. Este desacuerdo es causado por la suplementación del gas natural con propano, gas de petróleo líquido (butano), monóxido de carbono, u otros combustibles gaseosos. Como resultado, la relación aire a combustible debe ser controlable para compensar por los cambios en la relación estequiométrica.

## **SISTEMAS DE COMBUSTIÓN**

Para obtener ventaja de una tecnología de reducción de  $\text{NO}_x$  específica, un sistema de combustión debe ya sea poseer ciertas características, o las modificaciones del sistema necesarias deben ser técnica y económicamente posibles. Por lo tanto, al identificar las tecnologías de prevención de la contaminación y control de emisiones, debemos considerar primero el diseño del sistema de combustión. Los tipos principales de sistemas de combustión se muestran en la Tabla 5.<sup>23</sup>

**Tabla 5. Sistemas Comunes de Combustión**

<b>Tipo de Unidad de Combustión</b>	<b>Combustible</b>
Calderas de fondo seco - encendidas por la pared, por el frente o al opuesto	carbón pulverizado, gas, o líquido
Calderas de fondo seco - encendidas tangencialmente	carbón pulverizado, gas, o líquido
Calderas de fondo húmedo (llave de escoria) - quemadores tipo ciclón	carbón pulverizado, gas, o líquido
Lecho fluidizado	carbón
Fogoneros con parrilla corrediza	carbón triturado
Fogoneros con parrilla extendedora	carbón triturado
Turbinas de gas	gas y líquido
Motores de combustión interna	gas y líquido

Cada tecnología de reducción de  $\text{NO}_x$  tiene implementaciones diferentes, historias de desarrollo diferentes, y por lo tanto, una posición comercial diferente. La selección de la tecnología debe ocurrir después de un estudio de ingeniería para determinar la factibilidad técnica y económica de cada tecnología de  $\text{NO}_x$ . Esto incluye cómo puede ser implementada cada tecnología y su costo. Las opciones pueden ser limitadas por la incapacidad de ajustar el flujo de aire del sistema de combustión adecuadamente, ductos que se encuentran a la temperatura equivocada, o ductos que son demasiado cortos para proporcionar un mezclado adecuado. Estos problemas pueden ser resueltos, pero pueden requerir demasiadas modificaciones para hacerlos económicos.

#### **CALDERAS DE FONDO SECO - ENCENDIDAS EN LA PARED, POR EL FRENTE O EL LADO OPUESTO**

Las calderas de fondo seco de carbón pulverizado, gas, y combustible líquido han utilizado quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  para inyectar combustible y aire proveniente de las paredes inferiores. Las calderas encendidas por el frente tienen quemadores sobre una pared. Las calderas encendidas en el lado opuesto tienen quemadores sobre las paredes al frente y al fondo. Estas calderas utilizan típicamente métodos que reducen las temperatura máxima, reducen el tiempo de residencia a la temperatura pico, o reducen los  $\text{NO}_x$  químicamente (métodos 1, 2 y 3). Estos métodos son utilizados para calderas de termoeléctricas en las que la eficiencia de combustión es de toda importancia. La oxidación de los  $\text{NO}_x$  con absorción y remoción de nitrógeno (métodos 4 y 5) representan tecnologías más nuevas que pueden ser aplicadas en el futuro. El uso de un sorbente (método 6) ya se encuentra en uso en algunas calderas. Véa la Tabla 6 para las tecnologías de  $\text{NO}_x$  utilizadas para calderas de fondo seco encendidas por la pared, por el frente o al opuesto.

**Tabla 6: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en Calderas de Fondo Seco Encendidas en la Pared, por el Frente o el Lado Opuesto.**

Método de Reducción de NO <sub>x</sub>	Técnicas Disponibles Actualmente	Eficiencia
1. Reducir la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requemado de Gas Natural (RGN) Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub> (QBN) Optimización de la Combustión Quemadores Fuera de Servicio (QFS) Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor (IAV) Precalentamiento Reducido del Aire	50-70%
2. Reducir el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Escalonificación del Combustible de Combustión Inyectar vapor	50-70%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requema de Combustible (RC) Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub> (QBN)	35-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Inyectar Oxidante Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No Existen Datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

### **CALDERAS DE FONDO SECO - ENCENDIDAS TANGENCIALMENTE**

Las calderas de fondo seco incendidas tangencialmente por carbón pulverizado, gas, o combustible líquido utilizan propulsores a chorro desde cada esquina de un horno para inyectar combustible y aire de combustión en un remolino. La mezcla inyectada de combustible y aire de combustión forma una bola de fuego en el centro de la caldera. Esta configuración de encendido se usa en termoeléctricas medianas y calderas industriales grandes. Esta técnica de combustión mantiene a las temperaturas de la llama bajas (método 1). Además, la reducción química de NO<sub>x</sub> (método 3) se usa con frecuencia. Las técnicas de oxidación de NO<sub>x</sub> (método 4) podrían ser usadas en el futuro. Los sorbentes (método 6) ya son utilizados en algunas calderas. Véa la Tabla 7 para las tecnologías utilizadas en las calderas de fondo seco incendidas tangencialmente.

**Tabla 7: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en Calderas de Fondo Seco Encendidas Tangencialmente.**

<b>Método de Reducción de NO<sub>x</sub></b>	<b>Técnicas Disponibles Actualmente</b>	<b>Eficiencia</b>
1. Reducir la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requemado de Gas Natural (RGN) Optimización de la Combustión Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor (IAV) Precalentamiento Reducido del Aire	50-70%
2. Reducir el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Escalonificación del Combustible de Combustión Inyectar Vapor	50-70%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC)	35-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No existen datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

### **CALDERAS DE FONDO HÚMEDO CON LLAVE DE ESCORIA**

Las calderas de fondo húmedo con llave de escoria usan quemadores de ciclón para crear una llama intensa. La llama es tan caliente que derrite la ceniza, que a su vez se convierte en escoria que debe ser removida a través de una llave de escoria. Se sabe que estas calderas tienen una mayor generación de NO<sub>x</sub> debido a que la temperatura de combustión es tan alta. Como resultado esta técnica de combustión a alta temperatura no es usada ampliamente porque la concentración de NO<sub>x</sub> debe ser necesariamente mayor. La remoción de nitrógeno no combustible como un reactivo del proceso de combustión (método 5) se aplica aquí. Reducir el tiempo de residencia a la temperatura pico, la reducción química de NO<sub>x</sub> y la oxidación de NO<sub>x</sub> con absorción (métodos 2, 3 y 4) también se aplican a este sistema de combustión. Además, algunas calderas con llaves de escoria pueden estar usando sorbentes (método 6). Hay reportes recientes de que se ha usado la reducción de la temperatura máxima (método 1) de manera que la ceniza apenas se derrita. Véa la Tabla 8 para las tecnologías de NO<sub>x</sub> usadas en las calderas de fondo

húmedo con llave de escoria.

**Tabla 8: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en las Calderas de Fondo Húmedo, llave de escoria.**

Método de Reducción de NO <sub>x</sub>	Técnicas Disponibles Actualmente	Eficiencia
1. Reduciendo la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requema de Gas Natural (RGN) Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor (IAV) Precalentamiento Reducido del Aire	50-70%
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Escalonificación del Combustible de Combustión Inyectar vapor	20-50%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC)	35-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
6. Removal of nitrogen	Usar Oxígeno en Vez de Aire Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No existen datos
6. Usar un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

### LECHO FLUIDIZADO

La combustión en lecho fluidizado ocurre en un lecho de carbón aplastado a través del cual fluye aire ascendente para hacer que las partículas de carbón se comporten como un fluido. La tubería de la caldera puede estar ya sea sumergida en el lecho o expuesta a los gases calientes después de que abandonan el lecho. El lecho fluidizado es controlado por temperatura (método 1). El lecho también es una región químicamente reductora en la cual el oxígeno disponible es consumido por carbón (método 3) que reduce la ionización del nitrógeno. El aire en exceso es inyectado (método 2) sobre el lecho fluidizado para completar la combustión de CO y otros materiales quemables. Esto permite la adición de piedra caliza pulverizada (método 6) al carbón en el lecho fluidizado. Los óxidos de azufre reaccionan enseguida con la piedra caliza para formar yeso, un producto comerciable. El yeso debe ser separado de la ceniza. Como resultado, la generación de NO<sub>x</sub> puede ser limitada esencialmente a los NO<sub>x</sub> inmutables y NO<sub>x</sub> combustibles. Véase la Tabla 9 para las tecnologías de NO<sub>x</sub> utilizadas para las unidades de combustión en lecho fluidizado.

**Tabla 9: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en las Unidades de Combustión con Lecho Fluidizado.**

<b>Método de Reducción de NO<sub>x</sub></b>	<b>Técnicas Disponibles Actualmente</b>	<b>Eficiencia</b>
1. Reduciendo la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requema de Gas Natural (RGN) Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA)	No existen datos
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Inyectar Vapor	No existen datos
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC)	35-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No Existen Datos
6. Usar un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

### **FOGONEROS CON PARRILLAS CORREDIZAS**

Los fogoneros con parrillas corredizas causan que el carbón se mueva a medida que se quema. Así el *char* de combustión se encuentra en una zona distinta mientras las sustancias volátiles son liberadas y quemadas en otra zona. Estos fogoneros son utilizados comúnmente con calderas industriales que son más pequeñas que las termoeléctricas. Reducir la temperatura máxima, la reducción química de NO<sub>x</sub>, y los sorbentes (métodos 1,3 y 6) se aplican por lo general. Quizás la oxidación de NO<sub>x</sub> (método 4) se aplique en el futuro. Véa la Tabla 10 para las tecnologías utilizadas para los fogoneros con parrillas separadoras.

### **FOGONEROS CON PARRILLAS SEPARADORAS**

Los fogoneros con parrillas separadoras lanzan carbón sobre la parrilla en una forma controlada. El carbón es triturado, pero las partículas son típicamente más grandes que el carbón pulverizado. Por lo tanto, la combustión de las sustancias volátiles empieza mientras el carbón se encuentra en

**Tabla 10: Tecnologías Utilizadas para los Fogoneros con Parrillas Separadoras.**

<b>Método de Reducción de NO<sub>x</sub></b>	<b>Técnicas Disponibles Actualmente</b>	<b>Eficiencia</b>
1. Reduciendo la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requema de Gas Natural (RGN) Optimización de la Combustión Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor Precalentamiento Reducido del Aire	35-50%
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Escalonificación del Combustible de Combustión	50-70%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC)	55-80%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Inyectar Oxidante Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No Existen Datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

vuelo y la combustión del material carbonizado ocurre sobre la parrilla. Este sistema es utilizado con calderas algo mayores que los fogoneros con parrillas corredizas. Puede ser utilizado en plantas generadoras de energía, pero este sistema de combustión se usa principalmente para calderas industriales. Tal como los fogoneros con parrillas separadoras, reduciendo la temperatura máxima, la reducción química de NO<sub>x</sub>, y los sorbentes (métodos 1, 3 y 6) se aplican por lo general. Quizás la oxidación de NO<sub>x</sub> (método 4) se aplique en el futuro. Véa la Tabla 11 para las tecnologías de NO<sub>x</sub> utilizadas para fogoneros con parrillas separadoras.

### **TURBINAS DE GAS**

Las turbinas de gas utilizan el ciclo Brayton con un quemador para elevar la temperatura del gas después de la compresión y antes de la expansión a través de la turbina. Las turbinas usan principalmente los plan teamientos que consisten en reducir la temperatura máxima y reducir el tiempo de residencia (métodos 1 y 2) para limitar las emisiones de NO<sub>x</sub>. Debido a que la adición de partículas al flujo del aire introduciéndose a la turbina aceleraría la erosión de las aspas de la turbina, los sorbentes (método 6) sólo podrían aplicarse después de la expansión en la turbina. La reducción de NO<sub>x</sub> (método 3) ha sido utilizado para tratar los gases de escape. Muchos

**Tabla 11: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en Fogoneros con Parrillas Separadoras.**

<b>Método de Reducción de NO<sub>x</sub></b>	<b>Técnicas Disponibles Actualmente</b>	<b>Eficiencia</b>
1. Reduciendo la temperatura máxima	Recirculación del Gas de Chimenea (RGC) Requema de Gas Natural (RGN) Optimización de la Combustión Aire de Sobrefuego (ASF) Menos Exceso de Aire (MEA) Inyectar Agua o Vapor Precalentamiento Reducido del Aire	50-65%
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Escalonificación del Combustible de Combustión	50-65%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC)	35-80%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Inyectar Oxidante Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	60-80%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No Existen Datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Cámaras de Combustión Sorbente en Ductos	60-90%

operadores de turbinas aseveran que usan "prácticas de combustión buenas" que reducen las partículas que producen emisiones visibles (que ellos consideran como contaminación), pero no dicen nada sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> que no son visibles.

Las unidades de co-generación utilizan una turbina de gas y proveen combustión de aire precalentado por una caldera. El tubo de escape de una turbina de gas es típicamente 10-15% oxígeno y puede ser usado para proveer vapor a otra turbina, un calentador de proceso, un calentador ambiental o la combinación de estos. Si la turbina es usada para generar electricidad, puede restringir lo que puede hacerse. Partículas sorbentes pueden ser introducidas a un flujo después de dejar una turbina de gas para poder controlar los NO<sub>x</sub>. También, se han tenido algunos éxitos en la reducción de la concentración de NO<sub>x</sub> cuando se ha quemado combustibles de biomasa. Véa la Tabla 12 para las tecnologías de NO<sub>x</sub> utilizadas en turbinas de gas..

**Tabla 12: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Utilizadas en Turbinas de Gas.**

<b>Método de Reducción de NO<sub>x</sub></b>	<b>Técnicas Disponibles Actualmente</b>	<b>Eficiencia</b>
1. Reduciendo la temperatura máxima	Requemado de Gas Natural (RGN) Quemadores de Ultrabajo NO <sub>x</sub> Inyectar Agua o Vapor Precalentamiento Reducido del Aire Combustión Catalítica	70-85%
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Escalonificación del Aire de Combustión Inyectar Vapor	70-80%
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción No Catalítica Selectiva (RNCS) Requemado de Combustible (RC) Quemadores de Bajo NO <sub>x</sub> (QBN)	70-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	No Existen Datos
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en Nitrógeno	No Existen Datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Ductos	60-90%

## MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Los motores de combustión interna usan una relación de aire a combustible y sincronización de encendido/inyección para controlar la temperatura máxima y el tiempo de residencia. Esto puede reducir la concentración de NO<sub>x</sub> que es generada al reducir la temperatura pico (método 1). Los ajustes a la sincronización de las válvulas puede reducir el tiempo de residencia a la temperatura pico (método 2) para controlar la formación de NO<sub>x</sub>. La reducción química de NO<sub>x</sub> (método 3) es utilizada en los convertidores catalíticos para reducir los NO<sub>x</sub> a N<sub>2</sub>. Algunos motores estacionarios usan el método 3 y la oxidación de NO<sub>x</sub> (método 4) a la vez. Un reactor de plasma no termal fue desarrollado para el tratamiento de las emisiones de diesel, pero de acuerdo a nuestros conocimientos aún no se ha comercializado. Un sistema de ignición de plasma permite mayor libertad en la relación de aire a combustible y la sincronización del encendido de motores con encendido por chispa. Véa la Tabla 13 para las tecnologías de NO<sub>x</sub> utilizadas por motores estacionarios de combustión interna.

**Table 13: Tecnologías de NO<sub>x</sub> Actualmente Utilizadas en Motores Estacionarios de Combustión Interna.**

Método de Reducción de NO <sub>x</sub>	Técnicas Disponibles Actualmente	Eficiencia
1. Reduciendo la temperatura máxima	Relación Aire/Combustible Sincronización de la Ignición/Tipo de Ignición Combustión Pre-Estratificada	20-97%
2. Reduciendo el tiempo de residencia a la temperatura máxima	Sincronización de la Válvula	No Existen Datos
3. Reducción Química de NO <sub>x</sub>	Reducción Catalítica Selectiva (RCS) Reducción Catalítica No Selectiva (RCNS)	80-90%
4. Oxidación de NO <sub>x</sub> con Absorción Subsecuente	Reactor de Plasma No Térmico (RPNT)	80-95%
5. Remoción de Nitrógeno	Combustible Ultra Bajo en NO <sub>x</sub>	No Existen Datos
6. Uso de un Sorbente	Sorbente en Ductos de Escape	60-90%

### ¿CUANTO CUESTA LA REDUCCIÓN Y EL CONTROL DE NO<sub>x</sub>?

El costo de la reducción y el control de NO<sub>x</sub> ha ido cambiando rápidamente con reducciones dramáticas en años recientes. La Tabla 14 presenta el costo en 1993 tal como se encuentra en el documento de *Alternative Control Techniques Document NO<sub>x</sub> Emissions from Industrial/Commercial/Institutional (ICI) Boilers* (EPA 453/R-94-022), Técnicas Alternativas para Emisiones de NO<sub>x</sub> Provenientes de Calderas Industriales, Comerciales e Institucionales.

El *EPA Region III Low NO<sub>x</sub> Control Technology Study (1994)*, Estudio sobre la Tecnología de Controles de Bajo NO<sub>x</sub> de la Región III de la EPA en 1994, afirma que los quemadores de bajo NO<sub>x</sub> tenían efectos tanto beneficiosos sobre los costos de operación como perjudiciales para los quemadores, su expectativa de vida, y las calderas en que fueron instalados. La calidad del carbón y algunos diseños de calderas causaron que los NO<sub>x</sub> permanecieran altos aún después de que los quemadores de bajo NO<sub>x</sub> fueron instalados. Los costos capitales se encontraron en un rango de \$1.91 a \$54.24 por kW. Los costos de operación se encontraron en un rango de \$-23,000 (una ganancia) a \$1,113,750 por año. Por tanto, no se pudieron obtener presupuestos confiables del costo respecto a la operación de quemadores de bajo NO<sub>x</sub>. La calidad del carbón, la capacidad de

**Tabla 14. Costos de los Controles de NO<sub>x</sub> en 1993.**

Dispositivo de Control	Capital Baja	Capital Alta	Operación Baja	Operación Alta	Baja	Alta
	\$/MMBTU	\$/MMBTU	\$/MMBTU	\$/MMBTU	\$/tonelada	\$/tonelada
QBN	650	8.300	340	1.500	240	4.300
QBN + RGC					650	7.630
RSNC	1.600	3.300	680	1.200	N/A	N/A
(ESTIMACIÓN PARA 1994)					700	1.300
RCS	2.400	20.000	1.500	5.800	1.810	10.900
(ESTIMACIÓN PARA 1993)					500	2.800

la caldera y el diseño del quemador estuvieron entre las variables que influenciaron este costo. Muchas plantas ni siquiera pudieron dar un presupuesto. La reducción catalítica no selectiva cuesta entre \$700 y \$1,300 por tonelada de NO<sub>x</sub> reducido. La reducción catalítica selectiva cuesta entre \$500 y \$2,800 por tonelada de NO<sub>x</sub> reducido.<sup>25</sup> Sin embargo, el costo por tonelada de NO<sub>x</sub> removida para todas las tecnologías parece ser cada vez menor.

Estos costos varían de acuerdo a la técnica de control, tipo de combustible, grado de combustible, tamaño de caldera, motor o turbina, tipo de caldera, o turbina y otros factores. Otros costos también cambiaban con el tiempo. Por lo tanto usted necesita examinar los costos de estas tecnologías de control de NO<sub>x</sub> para una aplicación específica y a un tiempo particular.

Estos presupuestos de costo preliminares serán reducidos todavía más a manera que se gane experiencia de operación, se agudice la competencia, y las iteraciones de diseño eliminen el alto mantenimiento o los rasgos que acortan la vida. La confianza en esta perspectiva del futuro está basada en reportes de que algunos usuarios de quemadores de bajo NO<sub>x</sub> que ya habían observado en 1994 que los costos de operación podrían ser reducidos para hacer que la incorporación de esta tecnología redituara una ganancia neta. Los costos de la RCS y la RNCS también podrían haber disminuido todavía más allá puesto que hoy ya existe competencia por estas tecnologías.

Este análisis fue respaldado por las cantidades de costo de 1997. Estas se presentan en la Tabla 15. Esta tabla proviene de *Analyzing Electric Power Generation Under the CAAA*<sup>26</sup> (El Análisis de la Generación de Energía Eléctrica Bajo la Enmienda del Acta de Aire Limpio). Parece ser que la competencia y los diseños mejorados todavía están guiando los costos hacia abajo. La tabla fue presentada en esa publicación y se presenta aquí para su conveniencia.

Tabla 15. Costos de los Controles de NO<sub>x</sub> en 1997.

Generación de Energía Eléctrica Bajo la Enmienda del Acta de Aire Limpio (CAAA) -- Presupuesto de Costos <sup>26</sup>					
Tipo de Caldera	Tipo de Control	Costo de Capital, \$/kW	O & M Fijos, \$/kW/año	O& M Variables, mil/kWh	% de Control
Incendiado por Pared	QBN sin ASF	16,8	0,25	0,05	67,5
Incendiado por Pared	QBN con ASF	22,8	0,35	0,07	67,5
Incendiado Tang.	QBN con ASF	32,3	0,49	0	47,3
	QBN Inc.Tang. con ASFS	34,7	0,53	0	52,3
	QBN Inc.Tang. con AASF	46,7	0,71	0,02	57,3
Quemadores de Celda	Control de Combustión No Conectado	22,8	0,34	0,07	60
Ciclón	Requemado de Carbón	70,7	1,07	0,25	50
Fondo Húmedo	Control de Combustión	9,6	0,14	0,05	50
Incendiado Vertical	Control de Combustión	10,8	0,17	0,05	40
	RCS -Vel.Baja de NO <sub>x</sub>	69,7	6,12	0,24	70
	RCS -Vel.Alta de NO <sub>x</sub>	71,8	6,38	0,4	80
	RNCS -Vel.Baja de NO <sub>x</sub>	16,6	0,24	0,82	40
	RNCS-Ciclón	9,6	0,14	1,27	35
	RNCS -Vel.Alta de NO <sub>x</sub>	19	0,29	0,88	35
	Requem. Gas Nat. -Bajo	32,4	0,49		40
	Requem. Gas Nat. -Alto	32,4	0,49		50

Nótese que en la Tabla 8 se usan los siguientes acrónimos:

QBN es un quemador de bajo NO<sub>x</sub>

AASF son ambos aires de sobrefuego: acoplado de cerca y por separado

ASF es aire de sobrefuego acoplado de cerca

Control de Combustión es control combinado

ASFS es el aire de sobrefuego por separado

El *The Institute of Clean Air Companies* (Instituto de Compañías de Aire Limpio) también sugiere que en 1999 la RCS costará entre \$50 y \$80 por kW para un *retrofit* (agregación de equipo a unidades existentes), que se relaciona a entre \$400 y \$1,800 por tonelada de NO<sub>x</sub> que es destruido.<sup>34</sup> Su presupuesto de costo para la RNCS varía entre \$5 y \$15 por kW, que se relaciona a entre \$400 y \$2,000 por tonelada de NO<sub>x</sub> que es destruido.<sup>35</sup> La efectividad de costo no se correlaciona únicamente con la capacidad de la caldera - otras variables tales como el tipo y la

calidad del combustible, el tipo de caldera, el diseño de RNCS/RCS, etcétera entran dentro del análisis.

Aunque el estudio *Performance of Selective Catalytic Reduction on Coal-fired Steam Generating Units* (Funcionamiento de la Reducción Catalítica Selectiva en Unidades Generadoras de Vapor que Utilizan Carbón) trataba de Alemania, citó un rango de costo reciente para la RCS de \$52 a \$77 por kW, con unidades de *retrofit* tendiendo hacia costos más bajos. Así, los costos en Alemania fueron muy parecidos a los costos en los Estados Unidos, excepto que los costos de *retrofit* son generalmente más altos en los Estados Unidos.

La Tabla 16, Costos de Unidades para Tecnologías de NO<sub>x</sub> para Fuentes Estacionarias No Utilitarias, proviene del reporte *Ozone Transport Rulemaking Non-Electricity Generating Unit Cost Analysis* (Análisis de Costo para Unidades No Generadoras de Electricidad, Reglamentación del Transporte de Ozono). El reporte fue preparado para la EPA por *Pechan-Avanti Group*. Indica las eficiencias y los presupuestos de costo para varias tecnologías de NO<sub>x</sub> para el año 2007. Esto parece ser una estimación conservadora de la eficiencia y el costo. Las eficiencias indicadas en la tabla tienden a ser menores que las eficiencias demostradas actualmente. Los costos se basaron en información histórica y, por lo tanto, deben ser presupuestos altos debido a que los costos de la tecnología de NO<sub>x</sub> parecen ir descendiendo con el tiempo. La tabla se incluyó aquí para indicar la eficiencia relativa y el costo de las tecnologías de NO<sub>x</sub> para tipos específicos de sistemas de combustión.

El documento *Alternative Control Techniques Document--Emissions from Stationary Reciprocating Internal Combustion Engines* (Técnicas Alternativas de Control--Emisiones Provenientes de Motores Estacionarias de Combustión Interna), contiene algoritmos de costo para las técnicas de prevención de la contaminación y tecnología de control aplicadas a los motores de combustión interna. Los costos para la eliminación de NO<sub>x</sub> van desde \$250 a \$1,300 por tonelada para motores mayores de 1,000 caballos de fuerza. Para motores menores el costo va de \$400 a mayor de \$3,500 por tonelada.

### **¿SON SUFICIENTES ESTOS MÉTODOS?**

SI, estos métodos son suficientes para alcanzar el objetivo actual de reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> por 2 millones de toneladas debajo de las emisiones de 1980.<sup>47</sup> El objetivo parece estar fijo en un nivel que se puede lograr basándose en el estado de la tecnología de NO<sub>x</sub> en 1996. Sin embargo, tendremos que ver si la realización de nuestro objetivo actual proporciona el alivio requerido. Un grupo de normas todavía más exigente pudiera ser necesario en algún tiempo futuro.

Como una nación de alta tecnología y con una gran población urbana y suburbana, dependemos de los automóviles, autobuses, aviones, ferrocarriles, y camiones para la transportación. Además dependemos de la energía eléctrica para las computadoras, las luces, el aire acondicionado y el comercio. Por lo tanto, parecemos estar atrapados en un dilema, puesto que, mientras que dependemos de la transportación, los vehículos producen la mayoría de nuestros NO<sub>x</sub>. Mientras

**Tabla 16: Costos Unitarios para las Tecnologías de Control de NO<sub>x</sub> para Fuentes Estacionarias que No Son Termoeléctricas.**

Tipo de Fuente/Tipo de Combustible	Tecnología de Control	Porcentaje de Reducción (%)	Temporada de Ozono Efectividad de Costo (\$1990/tonelada)	
			Pequeña*	Grande*
Calderas de ICI - Carbón/Pared	RNCS	40	1.870	1.380
Calderas de ICI - Carbón/Pared	QBN	50	3.490	2.600
Calderas de ICI - Carbón/Pared	RCS	70	2.910	2.450
Calderas de ICI - Carbón/CQR	RNCS - Urea	75	1.220	910
Calderas de ICI - Carbón/Fogonero	RNCS	40	1.810	1.350
Calderas de ICI - Carbón/Ciclón	RNCS	35	1.480	1.110
Calderas de ICI - Carbón/Ciclón	Requemado de Carbón	50	3.730	710
Calderas de ICI - Carbón/Ciclón	NGR	55	3.730	710
Calderas de ICI - Carbón/Ciclón	RCS	80	1.840	1.560
Calderas de ICI - Aceite Residual	QBN	50	940	1.020
Calderas de ICI - Aceite Residual	RNCS	50	5.600	1.950
Calderas de ICI - Aceite Residual	QBN + RGC	60	2.670	920
Calderas de ICI - Aceite Residual	RCS	80	3.460	1.840
Calderas de ICI - Aceite Destilado	QBN	50	2.810	4.950
Calderas de ICI - Aceite Destilado	RNCS	50	10.080	3.520
Calderas de ICI - Aceite Destilado	QBN + RGC	60	5.960	1.810
Calderas de ICI - Aceite Destilado	RCS	80	6.480	3.460
Calderas de ICI - Gas Natural	QBN	50	1.950	1.560
Calderas de ICI - Gas Natural	RNCS	50	8.400	2.930
Calderas de ICI - Gas Natural	QBN + RGC	60	6.110	1.420
Calderas de ICI - Gas Natural	OT + IA	65	1.620	760
Calderas de ICI - Gas Natural	RCS	80	5.190	2.770
Calderas de ICI - Leña/Corteza/CQR	RNCS - Urea	55	2.090	1.430
Calderas de ICI - Leña/Corteza/CQR	RNCS - Amoniaco	55	1.660	1.210
Calderas de ICI - ASM/ Fogonero	RNCS - Urea	55	2.610	1.830
Calderas de ICI - Gas de Proceso	QBN	50	1.950	1.560
Calderas de ICI - Gas de Proceso	QBN + RGC	60	6.110	1.420
Calderas de ICI - Gas de Proceso	OT + IA	65	1.620	760
Calderas de ICI - Gas de Proceso	RCS	80	4.990	2.570
Calderas de ICI - Coque	RNCS	40	1.870	1.380
Calderas de ICI - Coque	QBN	50	3.490	2.600
Calderas de ICI - Coque	RCS	70	2.910	2.450
Calderas de ICI - GPL	QBN	50	2.810	4.950
Calderas de ICI - GPL	RNCS	50	10.000	3.440
Calderas de ICI - GPL	QBN + RGC	60	5.960	1.810
Calderas de ICI - GPL	RCS	80	6.240	3.220
Calderas de ICI - Bagasse	RNCS - Urea	55	2.090	1.430
Calderas de ICI - Residuos Líquidos	QBN	50	940	1.020
Calderas de ICI - Residuos Líquidos	RNCS	50	5.560	1.910
Calderas de ICI - Residuos Líquidos	QBN + RGC	60	2.670	920
Calderas de ICI - Residuos Líquidos	RCS	80	3.320	1.710
Motores de Combustión Interna - Aceite	IR	25	1.840	1.160
Motores de Combustión Interna - Aceite	RCS	80	4.690	1.850

Tipo de Fuente/Tipo de Combustible	Tecnología de Control	Porcentaje de Reducción (%)	Temporada de Ozono Efectividad de Costo (\$1990/tonelada)	
			Pequeña*	Grande*
Motores de Combustión Interna - Gas	IR	20	2,430	1,320
Motores de Combustión Interna - Gas	RELACION AF	20	3,730	900
Motores de Combustión Interna - Gas	AF + IR	30	3,430	1,080
Motores de Combustión Interna - Gas	L-E (Velocidad Mediana)	87	890	N/A
Motores de Combustión Interna - Gas	L-E (Velocidad Baja)	87	4,000	1,500
Motores de Combustión Interna - Gas	RCS	90	5,547	1,075
Motores de CI - Gas, Diesel, GPL	IR	25	1,840	1,160
Motores de CI - Gas, Diesel, GPL	RCS	80	4,690	1,850
Turbinas de Gas - Aceite	Inyección de Agua	68	3,080	1,540
Turbinas de Gas - Aceite	RCS + Inyección de Agua	90	4,240	1,860
Turbinas de Gas - Gas Natural	Inyección de Agua	76	3,590	1,750
Turbinas de Gas - Gas Natural	Inyección de Vapor	80	2,490	1,190
Turbinas de Gas - Gas Natural	QBN	84	1,170	240
Turbinas de Gas - Gas Natural	RCS + QBN	94	4,850	1,140
Turbinas de Gas - Gas Natural	RCS + Inyección de Vapor	95	3,750	1,570
Turbinas de Gas - Gas Natural	RCS + Inyección de Agua	95	5,040	2,060
Turbinas de Gas - Combustible para Propulsión	Inyección de Agua	68	3,080	1,540
Turbinas de Gas - Combustible para Propulsión	RCS + Inyección de Agua	90	4,240	1,860
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	QBN	45	8,290	2,320
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	QBN + RCG	48	10,130	4,000
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	RNCS	60	6,210	3,230
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	QUBN	74	5,110	1,450
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	RCS	75	18,970	12,520
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	QBN + RNCS	78	7,160	3,630
Calentadores de Proceso - Aceite Destilado	QBN + RCS	92	18,770	10,910
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	QBN + RGC	34	8,330	3,290
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	QBN	37	6,010	1,690
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	RNCS	60	3,730	2,050
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	QUBN	73	3,080	860
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	QBN + RNCS	75	4,730	2,510
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	RCS	75	10,560	7,170
Calentadores de Proceso - Aceite Residual	QBN + RCS	91	11,170	6,550
Calentadores de Proceso - Gas Natural	QBN	50	5,250	4,290
Calentadores de Proceso - Gas Natural	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Calentadores de Proceso - Gas Natural	RNCS	60	5,560	3,740
Calentadores de Proceso - Gas Natural	QUBN	75	3,580	2,870
Calentadores de Proceso - Gas Natural	RCS	75	24,840	16,760
Calentadores de Proceso - Gas Natural	QBN + RNCS	80	6,960	5,080
Calentadores de Proceso - Gas Natural	QBN + RCS	88	23,880	16,500
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	QBN	50	5,250	4,290
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	RNCS	60	5,560	3,740
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	QUBN	75	3,580	2,870
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	RCS	75	24,840	16,760
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	QBN + RNCS	80	6,960	5,080
Calentadores de Proceso - Gas de Proceso	QBN + RCS	88	23,880	16,500
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	QBN	45	8,290	2,320

Tipo de Fuente/Tipo de Combustible	Tecnología de Control	Porcentaje de Reducción (%)	Temporada de Ozono Efectividad de Costo (\$1990/tonelada)	
			Pequeña*	Grande*
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	QBN + RGC	48	10,130	4,000
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	RNCS	60	6,210	3,230
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	UQBN	74	5,110	1,450
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	RCS	75	18,970	12,520
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	QBN + RNCS	78	7,160	3,630
Calentadores de Proceso - Gas Propano Líquido	QBN + RCS	92	18,770	10,910
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	QBN + RGC	34	8,330	3,290
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	QBN	37	6,010	1,690
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	RNCS	60	3,730	2,050
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	UQBN	73	3,080	860
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	QBN + RNCS	75	4,730	2,510
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	RCS	75	10,560	7,170
Calentadores de Proceso - Otro Combustible	QBN + RCS	91	11,170	6,550
Manufactura de Acido Adípico	Reducción Térmica	81	1,000	1,000
Manufactura de Acido Adípico	Absorción Extendida	86	210	210
Manufactura de Acido Nítrico	Absorción Extendida	95	840	840
Manufactura de Acido Nítrico	RCS	97	1,010	1,010
Manufactura de Acido Nítrico	RNCS	98	940	940
Recipiente - Manufactura de Vidrio	Empuje Eléctrico	10	17,050	17,050
Recipiente - Manufactura de Vidrio	Precautado del <i>cullet</i>	25	2,240	2,240
Recipiente - Manufactura de Vidrio	QBN	40	4,040	4,040
Recipiente - Manufactura de Vidrio	RNCS	40	3,320	3,320
Recipiente - Manufactura de Vidrio	RCS	75	4,550	4,550
Recipiente - Manufactura de Vidrio	OXY-Encendido	85	10,960	10,960
Manufactura de Vidrio - Plano	Empuje Eléctrico	10	5,540	5,540
Manufactura de Vidrio - Plano	QBN	40	1,660	1,660
Manufactura de Vidrio - Plano	RNCS	40	1,380	1,380
Manufactura de Vidrio - Plano	RCS	75	1,490	1,490
Manufactura de Vidrio - Plano	OXI-Encendido	85	4,530	4,530
Manufactura de Vidrio - Prensado	Empuje Eléctrico	10	20,910	20,910
Manufactura de Vidrio - Prensado	Precautado del <i>cullet</i>	25	1,930	1,930
Manufactura de Vidrio - Prensado	QBN	40	3,570	3,570
Manufactura de Vidrio - Prensado	RNCS	40	3,080	3,080
Manufactura de Vidrio - Prensado	RCS	75	5,170	5,170
Manufactura de Vidrio - Prensado	OXI-Encendido	85	9,310	9,310
Manufactura de Cemento - Seco	Encendido de Horno Medio	30	1,110	1,110
Manufactura de Cemento - Seco	QBN	30	1,340	1,340
Manufactura de Cemento - Seco	RNCS - Basado en Urea	50	1,280	1,280
Manufactura de Cemento - Seco	RNCS - Basado en NH <sub>3</sub>	50	1,490	1,490
Manufactura de Cemento - Seco	RCS	80	6,850	6,850
Manufactura de Cemento - Húmedo	Encendido de Horno Medio	30	1,010	1,010
Manufactura de Cemento - Húmedo	QBN	30	1,260	1,260
Manufactura de Cemento - Húmedo	RCS	80	5,840	5,840
Molinos de Hierro y Acero - Recalentado	LEA	13	3,160	3,160
Molinos de Hierro y Acero - Recalentado	QBN	66	720	720
Molinos de Hierro y Acero - Recalentado	QBN + RGC	77	900	900
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	QBN	50	1,350	1,350
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	QBN + RGC	60	1,790	1,790
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	RNCS	60	3,130	3,130

Tipo de Fuente/Tipo de Combustible	Tecnología de Control	Porcentaje de Reducción (%)	Temporada de Ozono Efectividad de Costo (\$1990/tonelada)	
			Pequeña*	Grande*
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	QBN + RNCS	80	3,460	3,460
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	RCS	85	8,490	8,490
Molinos de Hierro y Acero - Recocido	QBN + RCS	90	9,070	9,070
Molinos de Hierro y Acero - Galvanizado	QBN	50	1,170	1,170
Molinos de Hierro y Acero - Galvanizado	QBN + RGC	60	1,370	1,370
Combustores de Residuos Municipales	RNCS	45	2,140	2,140
Incineradores de Residuos Médicos	RNCS	45	8,570	8,570
Calentones de Espacio - Aceite Destilado	QBN	50	2,810	4,950
Calentones de Espacio - Aceite Destilado	RNCS	50	10,000	3,440
Calentones de Espacio - Aceite Destilado	QBN + RGC	60	5,960	1,810
Calentones de Espacio - Aceite Destilado	RCS	80	6,240	3,220
Calentadores de Espacio - Gas Natural	QBN	50	1,950	1,560
Calentadores de Espacio - Gas Natural	RNCS	50	8,330	2,860
Calentadores de Espacio - Gas Natural	QBN + RGC	60	6,110	1,420
Calentadores de Espacio - Gas Natural	OT + IA	65	1,620	760
Calentadores de Espacio - Gas Natural	RCS	80	4,990	2,570
Reformadores Encendidos por Amoníaco, No Gas	QBN	50	1,950	1,560
Reformadores Encendidos por Amoníaco, No Gas	RNCS	50	8,330	2,860
Reformadores Encendidos por Amoníaco, No Gas	QBN + RGC	60	6,110	1,420
Reformadores Encendidos por Amoníaco, No Gas	OT + IA	65	1,620	760
Reformadores Encendidos por Amoníaco, No Gas	RCS	80	4,990	2,570
Reformadores Encendidos por Amoníaco y Aceite	QBN	50	940	1,020
Reformadores Encendidos por Amoníaco y Aceite	RNCS	50	5,560	1,910
Reformadores Encendidos por Amoníaco y Aceite	QBN + RGC	60	2,670	920
Reformadores Encendidos por Amoníaco y Aceite	RCS	80	3,320	1,710
Hornos de Cal	Encendido de Horno Medio	30	1,110	1,110
Hornos de Cal	QBN	30	1,340	1,340
Hornos de Cal	RNCS - Basada en Urea	50	1,280	1,280
Hornos de Cal	RNCS - Basada en NH <sub>3</sub>	50	1,490	1,490
Hornos de Cal	RCS	80	6,850	6,850
Incineradores Comunitarios e Industriales	RNCS	45	2,140	2,140
Incineradores Industriales	RNCS	45	2,140	2,140
Hornos Recuperadores de Pulpa de Sulfato	QBN	50	1,950	1,560
Hornos Recuperadores de Pulpa de Sulfato	RNCS	50	8,330	2,860
Hornos Recuperadores de Pulpa de Sulfato	QBN + RGC	60	6,110	1,420
Hornos Recuperadores de Pulpa de Sulfato	OT + IA	65	1,620	760
Hornos Recuperadores de Pulpa de Sulfato	RCS	80	4,990	2,570
Prod de Amoníaco, Desulfurización de Alimento	QBN + RGC	60	6,110	1,420
Producción de Plásticos - Específicos, (ABS) Resina	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Manufactura de Almidón, Operaciones Combinadas	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Manufactura de Productos Secundarios del Coque, Encendido Bajo del Horno	RNCS	60	3,130	3,130

Tipo de Fuente/Tipo de Combustible	Tecnología de Control	Porcentaje de Reducción (%)	Temporada de Ozono Efectividad de Costo (\$1990/tonelada)	
			Pequeña*	Grande*
Fundición Primaria del Cobre, Horno de Fund. Repetida	QBN + RGC	60	1,790	1.790
Producción de Hierro; Horno Explosivo; Estufas de Calentamiento Explosivo	QBN + RGC	77	900	900
Producción de Acero; Contenedores de Remojo	QBN + RGC	60	1.790	1.790
Equipo Encendido por Combustible; Calentadores de Proceso, Gas Propano	QBN + RGC	55	7.610	5.890
Prod. Secund de Aluminio, Horno de Fund y Repetición	QBN	50	1,350	1,350
Fundiciones de Acero, Horno de Tratamiento por Calor	QBN	50	1.350	1,350
Equipo Encendido por Combustible; Hornos. Gas Natural	QBN	50	1,350	1,350
Concreto Asfáltico, Secador Rotatorio. Planta Conv.	QBN	50	5,250	4,290
Manufactura de Arcilla Cerámica. Secado	QBN	50	5,250	4,290
Lavado del Coque-Secador Térmico; Lecho Fluidizado	QBN	50	3,490	2,600
Manuf Fibra de Vidrio, Tipo Textil. Horno de Recup	QBN	40	4,040	4,040
Arena/Grava, Secador	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Unidades de <i>Cracking</i> con Cat Fluido; Un de <i>Cracking</i>	QBN + RGC	55	7,610	5,890
Recubierto Conv. de Producto, Baño de Lavado en Ácido	QBN	50	5,250	4,290
Producción de Gas Natural, Compresores	RCS	20	5,547	1,075
En Proceso, Coque Bituminoso: Horno de Cemento	RNCS - Basada en Urea	50	1,280	1,280
En Proceso; Coque Bituminoso, Horno de Cal	RNCS - Basada en Urea	50	1,280	1,280
En Proceso. Coque Bituminoso, Genérico	RNCS	40	1,420	1,060
Uso de Combustible en Proceso, Aceite Residual, Gen	QBN	37	6,010	1,690
Uso de Combustible en Proceso, Gas Natural, Gen	QBN	50	5,250	4,290
En Proceso, Gas de Proceso, Horno de Coque/ Explosión	QBN + RGC	55	7,610	5,890
En Proceso, Gas de Proceso, Gas del Horno de Coque	QBN	50	5,250	4,290
Operaciones de Recubrimiento de Superficies; Calentadores de Recubr. de Superficies; Gas Natural	QBN	50	5,250	4,290
Residuos Tóxicos, Guv : Otros Incineradores; Fango	RNCS	45	2,140	2,140

NOTA: \*Los valores del costo por tonelada de fuentes pequeñas son utilizados para estimar los costos de control para todas las fuentes con emisiones de NO<sub>x</sub> en 1995 por debajo de 1 tonelada diaria. Si el valor de base diario de NO<sub>x</sub> en la temporada de ozono es de una tonelada o más, se utiliza el valor del costo por tonelada de las fuentes grandes

N/A = no es aplicable. La población de motores de velocidad mediana que utilizan gasolina se consideran pequeños

consumimos energía eléctrica como parte de nuestra economía de mercado, la generación de energía eléctrica también genera por encima del 40 por ciento de nuestros  $\text{NO}_x$  provenientes de fuentes estacionarias en 1995.<sup>34</sup>

También necesitamos generar menos  $\text{NO}_x$  sin tomar en cuenta el nivel de ionización del nitrógeno. Actualmente en 1999, no somos capaces de hacer esto. Por lo tanto, debemos hacer lo mejor que podamos y esperar que aguantemos mientras buscamos el descubrimiento y la reducción de costo de la "tecnología mejor" que sea capaz de alcanzar el objetivo de sustentabilidad. El material de referencia sugiere que la tecnología de prevención de la contaminación y control de vanguardia en 1999 es capaz de alrededor de un 94 a 99 por ciento de control de  $\text{NO}_x$  o 1 a 5 ppm de  $\text{NO}_x$ .<sup>27,28</sup>

Como todos conocemos, la tecnología a la vanguardia siempre cuesta más debido a que la ingeniería aún no ha cambiado de factibilidad a reducción de costo, y la competencia en la tecnología no está completamente desarrollada. Por lo tanto, podemos esperar que la tecnología sea más económica con el tiempo y también que mejore su capacidad. Deberíamos esperar observar un cambio de objetivo con el tiempo a medida que avanza la tecnología, y a medida que el objetivo alcanzable se vuelve más exigente y más posible económicamente. Una vez, las capacidades que tenemos hoy parecían más allá de la imaginación, y los costos parecían prohibitivos. Vivimos en un tiempo interesante donde la tecnología de prevención, reducción, y control de  $\text{NO}_x$  se está volviendo más capaz y más económica.

## CONCLUSIONES

1. Los combustibles diversos requieren diferentes técnicas de combustión, reducción y control. Los carbones diversos poseen un contenido variable de ingredientes volátiles. El contenido de nitrógeno del combustible es importante, como lo son el contenido de azufre, plomo, mercurio y otros contaminantes. Se han desarrollado combustibles ultrabajos en nitrógeno y ya son competitivos en costo. De este modo, podemos lograr algún control de  $\text{NO}_x$  a partir de las concentraciones disminuidas de nitrógeno en el combustible sin invertir en diseños modificados de quemadores.<sup>29</sup>
2. El diseño de la caldera, el motor de combustión interna, o la turbina de gas tiene un efecto principal en la operación. La formación de  $\text{NO}_x$  tiende a aumentar con un aumento de la capacidad de la caldera, debido a que las calderas más grandes tienden a tener una combustión más intensa con mayores temperaturas de combustión y un mayor tiempo de residencia para los gases de chimenea. Lo mismo parece ser cierto para los motores y las turbinas.
3. La escalonificación de la combustión es implícita en varias técnicas de prevención de la contaminación. La aplicación en conjunto (o el uso de tecnología de control híbrida) de técnicas de control de  $\text{NO}_x$  (primero RNCS, después RCS en el ducto, y después sorción antes del precipitador electrostático a lo que se le refiere como "lustrar") se ha utilizado para lograr una reducción en total de más de 90 por ciento del  $\text{NO}_x$  y 80 por ciento del  $\text{SO}_x$ , aún sin usar quemadores de bajo  $\text{NO}_x$  para disminuir la generación de  $\text{NO}_x$ .

4. La combustión de gas natural y destilados de petróleo puede ser controlada de una manera casi igual que la combustión de carbón pulverizado. Las mayores diferencias entre el carbón y el gas natural o aceite son que el gas y el aceite: (1) generalmente son más bajos en azufre y ceniza; (2) por lo general son más bajos en nitrógeno; y (3) probablemente son más bajos en plomo y mercurio. De este modo, el gas y el aceite no desactivan el catalizador usado en la reducción catalítica selectiva (RCS) a la misma velocidad que lo hacen el carbón o los combustibles semisólidos.
5. Los productos semisólidos de petróleo pueden en realidad tener niveles más altos de azufre, nitrógeno y otras impurezas que el carbón. No tienen tanto material carbonizado o ceniza como el carbón, pero tienen más que los destilados más ligeros.
6. Debemos esperar que tendencia en declive del costo de la tecnología de control continúe a medida que se adquiere experiencia, las técnicas de encendido se adaptan a los combustibles, las fallas en el diseño son corregidas, y aparecen nuevos diseños. Debemos esperar ver a los costos volverse menores por la competencia entre los proveedores de tecnologías con éxito.
7. La tecnología de control de  $\text{NO}_x$  parece capaz de más que sólo alcanzar el objetivo actual de la *EPA* y esto debe proporcionar créditos de emisión que pueden ser intercambiados con aquellas firmas que decidan continuar emitiendo emisiones controladas deficientemente. La venta de estos créditos por plantas sobrecontroladas pueden contrarrestar aún más cualquier costo neto que se incurra en adoptar estas tecnologías.
8. Los sistemas de control de  $\text{NO}_x$  ya se encuentran disponibles. La disponibilidad de estas tecnologías fue parte de la base del *NOx SIP Call* y los reglamentos del Título IV.
9. Ha habido una incentiva económica para hacer la combustión más eficiente y para innovar las maneras de controlar los óxidos de nitrógeno. Sin embargo, la cantidad de tiempo y dinero que debe ser invertida para una prueba a toda escala de una estrategia es significativa. La aceptación requiere que una tecnología se pruebe y tenga éxito antes de que aún se contemple una prueba a mayor escala. Esto demora la aceptación de técnicas mejoradas.
10. Parece no haber ninguna tecnología de control que sea claramente superior para todos los sistemas de combustión, calderas, motores, o combustibles. A falta de un ganador en claro, uno debe seleccionar combustibles y tecnología de control de  $\text{NO}_x$  o ya sea entre aquéllas ya probadas, o de un número creciente de ideas nuevas y prometedoras.
11. El fin de la búsqueda de tecnologías de control todavía no está a la vista, y la búsqueda debe continuar. Las investigaciones en el pasado deben de necesidad dar respuestas ambivalentes, porque hay tantos factores conflictivos. Sin embargo, con un costo menor de \$150 por tonelada de  $\text{NO}_x$  prevenida y con hasta el 80 por ciento de eficiencia de control, el quemador de bajo  $\text{NO}_x$ , donde es aplicable, parece estar entre las tecnologías menos caras de control de emisiones. La RCS es más cara, pero se puede obtener hasta el 94 por ciento de eficiencia de control. La RNCS

puede ser adoptada sin el costo inicial de catalizador, aunque es algo menos efectiva. Las tecnologías de QBN, RCS y RNCS son todas viables a lo largo de un amplio espectro de aplicaciones.

10. La investigación y el desarrollo tendrán que continuar para buscar respuestas más efectivas y tratar de balancearlas contra el costo y la eficiencia. El costo se reducirá a medida que la tecnología avance, se adquiera experiencia en la operación, la competencia se agudice, las fallas en diseño se corrijan, y se vuelvan disponibles mejores diseños. La confiabilidad sólo se puede adquirir con el tiempo. El costo se reducirá con el tiempo y la experiencia. Además debemos esperar que el nivel de efectividad de la tecnología de prevención y control de la contaminación mejore con el tiempo.

## REFERENCIAS:

1. *Nitrogen Oxides*

[www.ccinet.ab.ca/casa/nitrogen.htm](http://www.ccinet.ab.ca/casa/nitrogen.htm)

2. *Pollution Engineering Magazine Online*

[www.manufacturing.net...eng/archives/1995/pol10401.95/04adp3f0.htm](http://www.manufacturing.net...eng/archives/1995/pol10401.95/04adp3f0.htm)

3. *Alternative Control Techniques - Nitric Acid and Adipic Acid Manufacturing Plants*

EPA 450/3-91-026

4. *Bay Journal, July/August 1996*

[www.gmu.edu/bios/Bay/journal/96-08/ozone.htm](http://www.gmu.edu/bios/Bay/journal/96-08/ozone.htm)

5. *A Graphical Explanation of a regional Ozone Episode*

[capita.wustl.edu/otag/reports/03epi95/03epi95.html](http://capita.wustl.edu/otag/reports/03epi95/03epi95.html)

6. *XONON*

[www.catalytica-inc.com/cs/nox\\_control.html](http://www.catalytica-inc.com/cs/nox_control.html)

7. *Summary of NO<sub>x</sub> Control Technologies and Their Availability and Extent of Application*,

EPA 450/3-92-004

8. *Sourcebook: NO<sub>x</sub> Control Technology Data*, EPA 600/2-91-029

9. *Fully Engineered Approach to Acid Rain Control*, F. Bauer, *Energy Engineering*, Vol. 91,

No.4, 1994

10. *Alternate Control Techniques Document - NO<sub>x</sub> Emissions from Cement Manufacturing*

EPA-453/R-94-004

11. *Put a Lid on NO<sub>x</sub> Emissions*, J. Czarnecki, C. Pereira, M. Uberoi, K. Zak, *Pollution Engineering*, November 1994
12. *Combined Corona/Catalyst Process for Low-Temperature NO<sub>x</sub> Control*  
[es.epa.gov/ncerqa\\_abstracts/sbir/other/air/helfritch.html](http://es.epa.gov/ncerqa_abstracts/sbir/other/air/helfritch.html)
13. *Reducing NO<sub>x</sub> Emissions*, B. Chambers, *Glass Industry*, May 1993
14. *Marathon Monitors*  
[www.marathonmonitors.com/glassnox.htm](http://www.marathonmonitors.com/glassnox.htm)
15. *Active Control of a Natural Gas-Fired Burner*  
[ucicl.eng.uci.edu/research/active-control/](http://ucicl.eng.uci.edu/research/active-control/)
16. *NICE3: More Electricity, Fewer Emissions from Coal-Fired Boilers*  
[es.epa.gov/program/p2dept/energy/nice3/nice3-2.html](http://es.epa.gov/program/p2dept/energy/nice3/nice3-2.html)
17. *Gas Reburning for High Efficiency NO<sub>x</sub> Control Boiler Durability Assessment*, B. A. Folsom,  
T. Sommer, D. Engelhardt, and S. Freedman, 96-RP139.04, *Air & Waste Management Assn.*
18. *Regulatory Developments in NO<sub>x</sub> Controls for Utility Boilers*, C. Harrison, 96-RP139.03,  
*Air & Waste Management Assn.*
19. *Alternative Control Techniques Document -- NO<sub>x</sub> Emissions from Stationary Reciprocating Internal Combustion Engines*, EPA 453/R-93-032
20. *Plasma versus Thermal Effects in Flue Gas NO<sub>x</sub> Reduction Using Ammonia Radical Injection*, K. Chess, S. Yao, A. Russell and H. Hsu, *Journal of the Air & Waste Management Association*, August, 1995, p.627
21. *CNG Installing NO<sub>x</sub>-reduction System in Compressor Stations*, *Oil & Gas Journal*, Sept. 26, 1994
22. *NO<sub>x</sub> Control Technology Requirements Under the United States 1990 Clean Air Act Amendments Compare to Those in Selected Pacific Rim Countries*, C. A. Miller, R. Hall, R. Stern, EPA 600/A-94-259
23. *Nitrogen Oxides Control Technology Fact Book*, Leslie L. Sloss, Noyes Data Corp., 1992
24. *Alternate Control Techniques Document -- NO<sub>x</sub> Emissions from Industrial/Commercial/Institutional (ICI) Boilers*, EPA 453/R-94-022

25. *EPA Region 3 Low-NO<sub>x</sub> Control Technology Study*, K. Bruce, C. Castaldi, J. Cook, D. Lachapelle, Acurex Environmental Corporation, Acurex Report FR-97-116
26. *Analyzing Electric Power Generating Under the CAAA*, Office of Air and Radiation, 1998
27. *SNRB Catalytic Baghouse Laboratory Pilot Testing*, G. Akudlac, G. Farthing, T. Szymanski, R. Corbett, *Environmental Progress*, Vol.11, No. 1, 1992
28. *Cement Kiln NO<sub>x</sub> Control*, A. McQueen, S. Bortz, M. Hatch, and R. Leonard, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 1 January/February 1995
29. *States' Report on Nitrogen Oxides Reduction Technology Options for Application by the Ozone Transport Assessment Group*, OTAG, 1996
30. *Retrofit control technology reducing NO<sub>x</sub> emissions*, S. Kuehn, *Power Engineering*, February, 1994
31. *Advanced emissions control brings coal back to New Jersey*, *Power*. 1994
32. *Overview of NO<sub>x</sub> Emission Control for Utility Boilers*, J. E. Staudt, *Proceedings of the American Power Conference*, 1993
33. *Select the Right NO<sub>x</sub> Control Technology*, S. Wood, *Chemical Engineering Progress*, January 1994
34. *Selective Catalytic Reduction Control of NO<sub>x</sub> Emissions*, SCR Committee of Institute of Clean Air Companies, November 1997
35. *Selective Non-Catalytic Reduction for Controlling NO<sub>x</sub> Emissions*, SNCR Committee of Institute of Clean Air Companies, October 1997
36. *Emission Control Potential for Heavy-Duty Diesel Engines*, OMS Fact Sheet, EPA 420-F-95-009b, June 1996, [www.epa.gov/omswww/noxfact2.htm](http://www.epa.gov/omswww/noxfact2.htm)
37. *Effects of Biogenic Emission Uncertainties on Regional Photochemical Modeling of Control Strategies*, S. Roselle, Atmospheric Sciences Modeling Division, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, *Atmospheric Environment*, Vol. 28, No. 10, pp 1757-1772, 1994, Elsevier Science Ltd.
38. *Relationships Between Respiratory Disease and Exposure to Air Pollution*, G. Oberdorster, R. Gelein, C. Johnston, P. Mercer, N. Corson, and J. Finkelstein, International Life Sciences Institute, Washington DC, 1998, pp 216-229

39. *The SO<sub>x</sub>-NO<sub>x</sub>-RO<sub>x</sub>-BO<sub>x</sub> Flue Gas Cleanup Demonstration Project*  
[www.fe.doe.gov/coal\\_power/fs\\_snr.html](http://www.fe.doe.gov/coal_power/fs_snr.html)
40. *Nitrogen Oxides: Impacts on Public Health and the Environment*, EPA 452/R-97-002
41. *Final Report, Volume II: Summary and Integration of Results*, OTAG Air Quality Analysis Workgroup, D. Guinnup and B. Collom
42. *Combined SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>*  
[www.worldbank.org/html/fpd/.../EA/mitigatn/thermair/aqsocbsn.htm](http://www.worldbank.org/html/fpd/.../EA/mitigatn/thermair/aqsocbsn.htm)
43. *Cleaver-Brooks, Emissions*  
[www.cleaver-brooks.com/Emissions1.html](http://www.cleaver-brooks.com/Emissions1.html)
44. *Methods for Reducing NO<sub>x</sub> Emissions*, C. Latta, Roy F. Weston Inc., *Plant Engineering*, September 1998
45. *Plasma Ignition System Reduces NO<sub>x</sub> Emissions*, M. Manning, *Pipeline & Gas Journal*, October 1995, pp. 26-30
46. *Low-Emission Gas Turbines Using Catalytic Combustion*, S. Vatcha, *Energy Conversion Management*, Vol. 38 No. 10-13, pp. 1327-1334
47. *Factsheet: Phase I of the NO<sub>x</sub> Reduction Program*  
[nsdi.epa.gov/acidrain/nox/noxfs.html](http://nsdi.epa.gov/acidrain/nox/noxfs.html)
48. *Alternative Control Techniques Document -- NO<sub>x</sub> Emissions from Stationary Reciprocating Internal Combustion Engines*. EPA-453/R-93-032, July 1993
49. *The Economic Feasibility of using Hydrogen Peroxide for the Enhanced Oxidation and Removal of Nitrogen Oxides from Coal-Fired Power Plant Flue Gases*, J. Hatwood, C. Cooper, *AWMA Journal*, March 1998
50. *Fossil Fuel Combustion, A Source Book*, W. Bartok and A. Sarofim, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons
51. *Maximum Achievable Control Technology for NO<sub>x</sub> Emissions from Thermal Oxidation*, P. Nutcher and D. Lewandowski, 94-WA74A.03, *Air and Waste Management Association, Annual Meeting*, Cincinnati, OH, June 19-24 1994
52. *GNOCIS - 1999 Update on the Generic NO<sub>x</sub> Control Intelligent System*, G. Warriner, A.J.A. Sorge, M. Slatsky, J. Noblett, J. Stallings, *EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium*, Atlanta, August 1999

53. *Obtaining Reduced NO<sub>x</sub> and Improved Efficiency Using Advanced Empirical Optimization on a Boiler Operated in Load-Following Mode*, P. Patterson, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Atlanta, August 1999

54. *Simultaneous SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, and NO<sub>x</sub> Removal by Commercial Application of the EBA Process*, S. Hirano, S. Aoki, M Izutsu, and Y. Yuki, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Atlanta, August 1999

55. *The State of the Art in Cyclone Boiler Nox Reduction*, D. O'Connor, R. Himes, T, Facchiano, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Atlanta, August 1999

56. *Update on SNAP Technology for Simultaneous SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> Removal*, K. Felsvang, V. Boscak, S. Iversen, P. Anderson, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Atlanta, August 1999

57. *Advanced Reburning for SIP Call NO<sub>x</sub> Control*, EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Atlanta, August 1999

*The Following are General Background References, which were used for general information. They were used in multiple places. The facts presented were also used to develop a consistent picture of NO<sub>x</sub> generation and abatement technology in the face of many conflicting claims and pieces of data. They also were used to understand and reconcile the conflicts in data from different combustion devices.:*

*Performance of Selective Catalytic Reduction on Coal-fired Steam Generating Units*, U.S. EPA., Acid Rain Division, 1997

*Alternate Control Techniques Document - NO<sub>x</sub> Emissions from Iron and Steel Mills*  
EPA-453/R-94-065

*Nitrogen Chemistry and NO<sub>x</sub> Control in a Fluid Catalytic Cracking Regenerator*, X. Zhao, A. Peters, G. Weatherbee, *Industrial Engineering Chemical Research*, Vol.36, No. 11, 1997, American Chemical Society

*Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emission: Technology Driven by Regulation*, C. T. Bowman, *Twenty-fourth Symposium (International) on Combustion/ The Combustion Institute*, 1992, pp. 859-878

*Advanced Biomass Reburning for High Efficiency NO<sub>x</sub> Control*  
[es.epa.gov/ncercqa\\_abstracts/sbir/other/air/seeker.html](http://es.epa.gov/ncercqa_abstracts/sbir/other/air/seeker.html)

*The Regional Transport of Ozone*  
[www.epa.gov/ttn/otag/about\\_1.html](http://www.epa.gov/ttn/otag/about_1.html)

*OTAG Analysis with PPM*  
[www.epa.gov/capi/otagmain.html](http://www.epa.gov/capi/otagmain.html)

*About OTAG*  
[envpro.ncsc.org/OTAGDC/about\\_otag.html](http://envpro.ncsc.org/OTAGDC/about_otag.html)

*Air Quality Analysis Working Group*  
[capita.wustl.edu/otag](http://capita.wustl.edu/otag)

*Clean Air Technology News, Institute of Clean Air Companies, Summer 1998 and Winter 1998*

*Post Combustion Control of Oxides of Nitrogen Emissions from a 900 TPD Processed Refuse Fuel Boiler, J. Zakaria, L. Wolfenden, J. Mc Conlogue, G. Pierce, The 1994 National Waste Processing Conference, ASME, 1994*

*Cost Estimates for Selected Applications of NO<sub>x</sub> Control Technologies on Stationary Combustion Boilers (Draft Report), The Cadmus Group, Inc. and Bechtel Power Corporation for U.S. EPA, March 1996.*

*Ozone Transport Rulemaking Non-Electric Generating Unit Cost Analysis, Prepared by Pechan-Avanti Group for U.S. EPA (Contract Nos. 68D40102 & 68D98052), September 17, 1998.*

**TECHNICAL REPORT DATA**  
(Please read Instructions on reverse before completing)

1. REPORT NO EPA-456/F-00-002		2.	3. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	
4. TITLE AND SUBTITLE Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), ¿ Por Qué y Cómo Controlan?			5. REPORT DATE November 1999	
			6. PERFORMING ORGANIZATION CODE	
7. AUTHOR(S)			8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO	
9. PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS Clean Air Technology Center (MD-12) Information Transfer and Program Integration Division Office of Air Quality Planning and Standards U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711			10. PROGRAM ELEMENT NO	
			11. CONTRACT/GRANT NO	
12. SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711			13. TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED Final	
			14. SPONSORING AGENCY CODE	
15. SUPPLEMENTARY NOTES For more information, call the CATC Information Line at (919) 541-0800 or access the CATC Web page at <a href="http://www.epa.gov/ttn/catc">www.epa.gov/ttn/catc</a>				
16. ABSTRACT This is the Spanish version of EPA-456/F-99-006a. The purpose of this document is to educate people about nitrogen oxides, how they are formed, the danger that they represent, and how emissions can be controlled. This knowledge is needed to make an informed choice of the control technology that is to be used.				
17. KEY WORDS AND DOCUMENT ANALYSIS				
a. DESCRIPTORS		b. IDENTIFIERS/OPEN ENDED TERMS		c. COSATI Field/Group
nitrous oxide, nitric oxide, nitrogen dioxide, dinitrogen pentoxide, nitrous acid, nitric acid, ozone, volatile organic compounds, VOC, generation, pollution prevention, control technology, control technologies, emission control, acid rain, combustion, boilers, gas turbines, internal combustion engines, cost of emission controls, air pollution		air pollution control technology, combustion, pollution prevention, nitrogen oxides, boilers, internal combustion engines, diesel engines		
18. DISTRIBUTION STATEMENT Release Unlimited, Available from the OAQPS TTN Web Page and NTIS		19. SECURITY CLASS (Report) Unclassified		21. NO. OF PAGES
		20. SECURITY CLASS (Page) Unclassified		22. PRICE