

# **GASOLINA Y DIESEL DE BAJO AZUFRE: LA CLAVE PARA DISMINUIR LAS EMISIONES VEHICULARES**

VERSIÓN final EN ESPAÑOL, 21 de mayo de 2003

Katherine O. Blumberg

Michael P. Walsh

Charlotte Pera

Traducción de Luis R. Sánchez Cataño, por contrato con la Fundación Hewlett

## Resumen Ejecutivo

Es imposible limpiar el aire, o en particular reducir la contaminación del aire generada por el sector transporte, sin eliminar el azufre de los combustibles. El azufre es por sí mismo un contaminante, pero más importante aún es que el azufre impide la adopción de las principales tecnologías para el control de la contaminación. Ninguna estrategia de reducción significativa de la contaminación del aire puede dar resultado sin reducir el azufre de los combustibles a niveles cercanos a cero.

Este artículo trata sobre la necesidad de reducir el azufre en los combustibles para el sector transporte y de los beneficios que pueden alcanzarse en términos de las emisiones totales de contaminantes. El azufre impide el uso de muchas tecnologías convencionales y avanzadas para el control de contaminantes vehiculares, incluyendo monóxido de carbono (CO), partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) e hidrocarburos (HC). Los combustibles de bajo azufre son la clave para reducir las emisiones vehiculares, mediante la introducción de tecnologías avanzadas de control y nuevos vehículos con diseños más eficientes.

El azufre es un componente natural del petróleo crudo y en consecuencia se encuentra tanto en la gasolina como en el diesel. Cuando estos combustibles son quemados, el azufre se emite como bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) o como partículas de sulfatos. Cualquier reducción en el contenido de azufre en los combustibles disminuye las emisiones de estos compuestos y cuando este contenido disminuye más allá de cierto punto, el beneficio aumenta hasta una disminución importante de las emisiones totales de contaminantes.

### *Impacto del azufre sobre las Emisiones Vehiculares*

Los combustibles pobres en azufre (~150 ppm) hacen a los vehículos existentes más limpios. Estos combustibles reducen las emisiones de CO, HC, y NO<sub>x</sub> de los vehículos a gasolina equipados con catalizadores, y las emisiones de PM de vehículos a diesel, con o sin catalizadores de oxidación. Estos beneficios se incrementan cuando los vehículos están diseñados para alcanzar normas de emisión más elevadas y los niveles de azufre bajan aún más.

Los combustibles de bajo azufre (~50 ppm) permiten mayores beneficios al incorporar tecnologías avanzadas de control para vehículos diesel. Los filtros de partículas del diesel pueden usarse con combustibles de bajo azufre pero sólo alcanzan un 50% de eficiencia de control, aproximadamente. La reducción catalítica selectiva puede aplicarse en este caso para lograr un control de emisiones de NO<sub>x</sub> superior al 80%.

Combustibles de ultra bajo azufre (~10 ppm) permiten el uso de equipo de absorción de NO<sub>x</sub>, incrementando su control hasta niveles superiores al 90%, tanto en vehículos a diesel como de gasolina. Esto permite diseños de motores más eficientes, que son incompatibles con los actuales sistemas de control de emisiones. Los filtros de partículas alcanzan su máxima eficiencia con combustibles de ultra bajo azufre, cerca del 100% de reducción de PM.

### *Costos y Beneficios de la Reducción de Azufre en los Combustibles*

La tecnología necesaria para reducir el azufre a niveles ultra bajos se utiliza actualmente en muchos lugares en todo el mundo. Los costos actuales son razonables y la industria de refinación continúa desarrollando catalizadores más activos y nuevos procesos para la remoción del azufre y reducir aún más los costos.

Los estudios muestran que los beneficios de la reducción de azufre rebasan con mucho los costos, si bien la inversión requerida en refinación sigue siendo significativa. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos encontró que los beneficios ambientales y en la salud humana asociados a la reducción de azufre fueron diez veces más elevados que los costos (este estudio consideró normas de emisión contingentes más estrictas para combustibles de bajo azufre). Más aún: un estudio europeo demostró que los combustibles de ultra bajo azufre reducen significativamente los costos totales, incidiendo directamente en un mayor rendimiento del combustible. El considerable potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero es un beneficio adicional a los impactos positivos sobre la salud, sobre el ambiente y otros, derivados de la reducción del azufre.

### *Tendencias Globales hacia Combustibles de Bajo Azufre*

En el mundo desarrollado, los fabricantes de autos y las empresas de refinación han tenido que aplicar sus importantes capacidades técnicas y administrativas para cumplir con regulaciones ambientales crecientemente estrictas. Los resultados han sido niveles de azufre menores en los combustibles y normas de emisión cada vez más bajas para todo tipo de vehículos. De igual forma, los retos ambientales de largo plazo y los requerimientos más estrictos que se esperan en el futuro, están impulsando la investigación científica y el desarrollo tecnológico.

En los países en desarrollo, donde el número de vehículos se incrementa exponencialmente, los combustibles con alto contenido de azufre continúan siendo la norma, impidiendo la introducción de nuevas tecnologías vehiculares. Mediante el establecimiento de políticas para bajar los niveles de azufre y aplicar normas de emisión más estrictas, estos países pueden aliviar los impactos en la salud humana derivados del número creciente de vehículos y disminuir el esfuerzo social y tecnológico necesario para hacer más limpios sus parques vehiculares. De esta forma, los países relativamente nuevos en este campo, podrán retomar la experiencia de los países que han logrado ventajas con los combustibles de bajo azufre.

Aun más, los países deberán incrementar sus esfuerzos de cooperación para rebasar la barrera de calidad en los combustibles y moverse hacia los vehículos de baja emisión. Los beneficios locales de salud y ambientales son, por sí mismos, una razón suficiente para requerir combustibles más limpios, sin embargo no son el único punto, ya que las emisiones vehiculares han adquirido una importancia significativa a nivel global. Es un hecho, por ejemplo, que los contaminantes que tradicionalmente han sido de preocupación exclusivamente local, como las PM y el ozono a nivel del suelo, pueden tener impactos importantes en el cambio climático global. La reducción de los niveles

azufre en los combustibles del sector transporte y el impulso al control de emisiones y a los vehículos con tecnologías de uso eficiente del combustible, son los primeros pasos para reducir el impacto local y global de las emisiones vehiculares.

### *Conclusiones*

En la evaluación de opciones para reducir el azufre, varias observaciones pueden ser relevantes para el diseño de políticas.

1. Mientras que los costos y beneficios varían de región a región –dependiendo del estado de las refinerías existentes, las normas vigentes de calidad de los combustibles y de emisiones de contaminantes, la calidad del aire local y otros factores- los estudios han demostrado que los costos de la reducción de azufre son viables y minimizados por los beneficios.
2. Tanto la regulación como los incentivos fiscales han probado ser instrumentos efectivos para orillar a la industria de la refinación hacia productos de bajo azufre.
3. La programación para modernizar refinerías dedicadas a la producción de combustibles de mayor calidad tiene implicaciones significativas en los costos. (Por ejemplo, una modernización que coincide con las necesidades de expansión de una refinería, puede reducir costos.) La producción y distribución de combustibles de bajo azufre deberá ser cuidadosamente coordinada con la introducción de vehículos nuevos que utilicen estos combustibles.
4. En muchos casos resulta efectivo y ventajoso realizar en un solo paso el cambio a diesel de ultra bajo azufre. Los beneficios en la reducción de emisiones totales crecen rápidamente cuando el nivel de azufre en el diesel disminuye de bajo a ultra bajo, tanto en términos de la reducción de emisiones de los vehículos existentes, como para el control de emisiones de los nuevos vehículos. Dado este aumento de los beneficios y el incremento constante de los costos, tiene sentido optar directamente por el diesel de ultra bajo azufre.
5. Deben tomarse medidas para prevenir que el azufre extraído de una corriente de combustibles sea derivado hacia otra. Por ejemplo, el combustible pesado que se utiliza en embarcaciones marinas puede representar un “sitio de disposición no controlada” para remanentes de combustibles con alto contenido de azufre.

## CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO .....	2
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. EL IMPACTO DEL AZUFRE EN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES CONVENCIONALES.....	10
2.1 Presiones Regulatorias.....	11
2.2 Vehículos a Gasolina .....	13
Catalizadores de Tres Vías Actuales .....	14
Diseños Emergentes de Catalizadores de Tres Vías. ....	15
Trampas de Captura de NO <sub>x</sub> .....	15
2.3 Vehículos a Diesel.....	17
Sin Control de Emisiones.....	18
Catalizadores de Oxidación para Vehículos Diesel .....	19
Filtros de Partículas de Diesel.....	20
Sistemas de Control del NO <sub>x</sub> .....	22
Sistemas Integrados.....	26
Tecnologías de Retrofit.....	27
2.4 Resumen .....	28
3. EL IMPACTO DEL AZUFRE EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	30
3.1 Vehículos a Gasolina .....	30
3.2 Vehículos a Diesel.....	31
3.3 Vehículos con Celdas de Combustible .....	31
4. REDUCCIÓN DE NIVELES DE AZUFRE EN LA GASOLINA Y EL DIESEL.....	32
4.1 Opciones Tecnológicas.....	32
4.2 Costos Asociados con la Desulfuración.....	34
4.3 Comparación de Costos y Beneficios.....	36
5. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS DE CERO AZUFRE.....	38
5.1 Biodiesel.....	38
5.2 Diesel de Fischer-Tropsh.....	38
6. TENDENCIAS GLOBALES HACIA LOS COMBUSTIBLES DE BAJO AZUFRE .....	40
6.1 Estados Unidos .....	40
6.2 Europa .....	42
6.3 Japón .....	43
6.4 Otras Áreas.....	44
Hong Kong .....	44
Australia .....	44
6.5 Resumen .....	44
7. CONCLUSIÓN .....	46

REFERENCIAS.....	49
APÉNDICE A – EMISIONES DE AUTOMOTORES VEHICULADOS .....	55
A.1 Monóxido de Carbono (CO).....	55
A.2 Hidrocarburos (HC) .....	56
A.3 Óxidos de Nitrógeno(NO <sub>x</sub> ).....	56
A.4 Ozono (O <sub>3</sub> ).....	57
A.5 Óxidos de Azufre (SO <sub>x</sub> ).....	58
A.6 Partículas (PM).....	59
A.7 Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	61
A.8 Resumen .....	63
APÉNDICE B – TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR EL AZUFRE EN LOS COMBUSTIBLES .....	65
B.1 Propiedades de los Combustibles Afectados por la Desulfuración.....	66
Octanaje.....	66
Cetano.....	66
Lubricidad.....	67
B.2 Hidrodesulfuración de Naftas .....	67
B.3 Adsorción de Azufre.....	69
B.4 Hidrotratamiento de Destilados Medios.....	70
B.5 Hidrocracking .....	72
B.6 Hidrotratamiento previo al cracking.....	73
B.7 Nuevas Tecnologías de Desulfuración.....	73
Biodesulfuración.....	73
Oxidación Química y Extracción.....	73
B.8 Resumen .....	74
APÉNDICE C – EL IMPACTO DE LA DESULFURACIÓN SOBRE LAS EMISIONES DE GASES DE INVERNADERO .....	76
C.1 Efectos Directos en la Refinación .....	76
C.2 Transporte y Re-refinación de Lotes Contaminados .....	77

## LISTA DE ACRÓNIMOS

CARB	California Air Resources Board - <i>Buró de Recursos Atmosféricos de California-</i>
CDPF	Catalyzed Diesel Particulate Filter - <i>Filtro Catalizador de Partículas del Diesel-</i>
CH <sub>4</sub>	Metano
CNG	Compressed Natural Gas - <i>Gas Natural Comprimido-</i>
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Bióxido de Carbono
CR-DPF	Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter - <i>Filtro de Partículas del Diesel de Regeneración Continua-</i>
DECSE	Diesel Emissions Control Sulfur Effects - <i>Efectos del Control de Azufre en las Emisiones del Diesel-</i>
DOC	Diesel Oxidation Catalyst - <i>Catalizador de Oxidación del Diesel-</i>
DPNR	Diesel Particulate NO <sub>x</sub> Reduction - <i>Reducción de Partículas y NO<sub>x</sub> del Diesel-</i>
DPF	Diesel Particulate Filter - <i>Filtro de Partículas del Diesel-</i>
DPM	Diesel Particulate Matter - <i>Material Particulado del Diesel-</i>
ECD	Emissions Control Diesel - <i>Control de Emisiones del Diesel (con un máximo de 15 ppm de azufre)-</i>
EGR	Exhaust Gas Recirculation - <i>Recirculación del Gas de Escape-</i>
EPA	Environmental Protection Agency (U.S.) - <i>Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-</i>
FCC	Fluid Catalytic Cracking - <i>Unidad de Cracking de Lecho Catalítico-</i>
FTD	Fischer-Tropsch Diesel - <i>Diesel de Fischer-Tropsch-</i>
GEI	Gases de Efecto Invernadero
g/kWh	gramos por kilowatt-hora
HC	Hidrocarburos
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - <i>Panel Intergubernamental de Cambio Climático-</i>
MECA	Manufacturers of Emission Controls Association - <i>Asociación de Productores de Equipo de Control de Emisiones</i>
Mt	Megatonelada (10 <sup>12</sup> gramos)
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
NO	Monóxido de Nitrógeno
NO <sub>2</sub>	Bióxido de Nitrógeno
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno
PM	Partículas
ppm	partes por millón
O <sub>2</sub>	Oxígeno
O <sub>3</sub>	Ozono
SCR	Selective Catalytic Reduction - <i>Reducción Catalítica Selectiva-</i>
SO <sub>2</sub>	Bióxido de Azufre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Azufre
SOF	Soluble Organic Fraction - <i>Fracción Orgánica Soluble-</i>
TWC	Three-way Catalyst - <i>Catalizador de Tres Vías-</i>

# **GASOLINA Y DIESEL DE BAJO AZUFRE: LA CLAVE PARA REDUCIR LAS EMISIONES VEHICULARES**

## **I. INTRODUCCIÓN**

Las primeras regulaciones sobre especificaciones de los combustibles fueron introducidas en los Estados Unidos y Japón en la década de 1970. Estas regulaciones restringían el uso del plomo en ciertos combustibles. El plomo envenenaba las nuevas tecnologías catalíticas para el control del monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). La gasolina sin plomo fue necesaria para los convertidores catalíticos, instalados por primera vez en modelos del año 1975.

El azufre es el plomo del nuevo siglo. Como el plomo, las emisiones de compuestos de azufre causan serias preocupaciones en la salud humana y el ambiente\*. Más importante aún, el azufre inhibe el uso de tecnologías avanzadas para controlar las emisiones de otros contaminantes, incluyendo NO<sub>x</sub>, HC, CO y partículas (PM). La reducción de los niveles de azufre en los combustibles hará disminuir las emisiones vehiculares de los precursores del smog fotoquímico y otros contaminantes que ensucian nuestro aire y taponan nuestros pulmones.

Las políticas gubernamentales para prevenir el uso del plomo en los combustibles han sido instrumentadas en la mayoría de los países y proveen enormes beneficios a la salud†. Similarmente, los combustibles de bajo azufre representan una nueva herramienta para crear un aire más limpio, mejorando la salud pública y reduciendo los problemas ambientales.

Los niveles de azufre en los combustibles han empezado a reducirse y regularse en muchas partes del mundo. Algunas veces, las normas de azufre en los combustibles están emparejadas con normas más estrictas de emisiones para vehículos nuevos o programas de retroadaptación (retrofit) para reducir las emisiones de los vehículos existentes. Los beneficios presentes y futuros de los combustibles de bajo azufre son substanciales y cada vez más necesarios en un mundo con un número creciente de vehículos y mayores promedios de distancia por viaje.

Cualquier reducción del azufre disminuye las emisiones de bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y de sulfatos, y conforme los niveles de azufre disminuyen más allá de cierto punto, los beneficios aumentan para incluir la emisión total de los diferentes contaminantes. Combustibles con azufre reducido (~150 ppm) hacen más limpios a los vehículos. Combustibles de bajo azufre (~50 ppm) permiten tecnologías avanzadas para filtrar partículas y mejorar el control de NO<sub>x</sub>. Por último, los combustibles de ultra bajo azufre

---

\* El plomo, como contaminante del aire, es altamente tóxico y puede impactar el crecimiento humano y el sistema nervioso. El azufre se emite como bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y como partículas de sulfato, contaminantes que dañan la salud humana, disminuyen la visibilidad, y propician la acidificación de los ecosistemas.

† Existen aún muchos progresos por realizar. A pesar de sus obvias ventajas, el combustible sin plomo todavía no se ha hecho obligatorio, o incluso no se encuentra disponible en algunos países.

(~10 ppm) permiten grandes avances en el diseño de vehículos más eficientes y tecnología avanzada para el control de emisiones.

Reducir el azufre tiene sus costos. A diferencia del plomo, que es un aditivo del combustible, el azufre es un componente natural del petróleo crudo y ciertos compuestos azufrados pueden ser removidos más fácilmente y con menores costos que otros. Modernizar las refinerías para remover el azufre es caro e incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero, a pesar del desarrollo de nuevos catalizadores y de procesos que reducen los requerimientos de energía y los costos. Sin embargo, cuando se comparan estos costos contra el potencial de los beneficios en la reducción de emisiones vehiculares empleando combustibles de bajo azufre, los estudios muestran que los beneficios rebasan con mucho a los costos.

Este artículo intenta apoyar a los tomadores de decisiones a considerar los costos y beneficios de la reducción de azufre en los combustibles así como a formular las políticas que ofrezcan resultados óptimos dentro de sus jurisdicciones. En resumen:

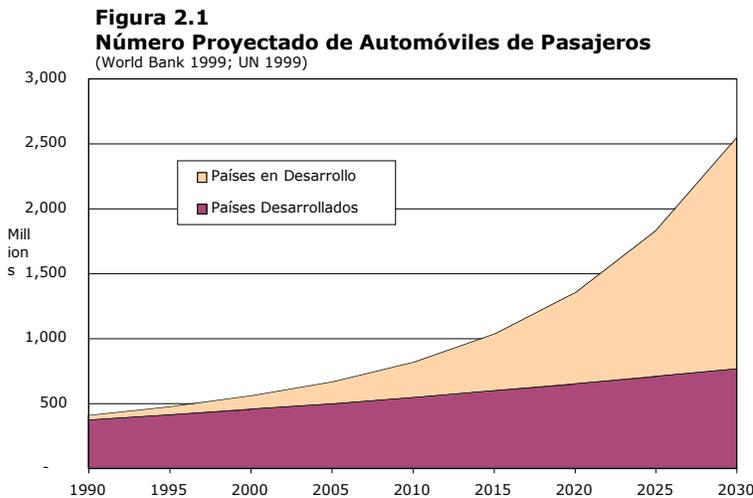
- Describe el impacto directo e indirecto del azufre de los combustibles en las emisiones y en las tecnologías de control de la contaminación.
- Discute los costos de las tecnologías de desulfuración y compara estos costos con los beneficios de la reducción de azufre.
- Resume las políticas de control de la contaminación alrededor del mundo que han impulsado el empleo de combustibles de bajo azufre.
- Proporciona observaciones de relevancia para tomadores de decisiones acerca del diseño de nuevas políticas sobre combustibles de bajo azufre.

De igual forma, se incluyen apéndices acerca de:

- Los principales contaminantes vehiculares y sus impactos en la salud humana y el ambiente.
- Las tecnologías de refinación para reducir los niveles de azufre y sus costos económicos, energéticos y ambientales.

## 2. EL IMPACTO DEL AZUFRE EN LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES CONVENCIONALES

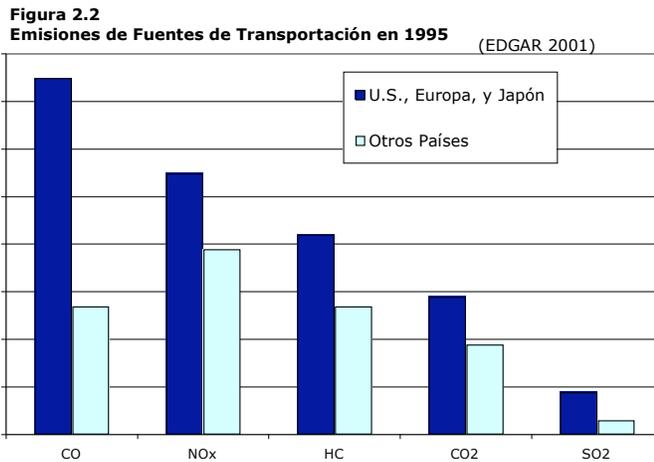
Los vehículos automotores continúan siendo la fuente principal de contaminación del aire, a pesar de los enormes avances en las tecnologías de motorización y control de la contaminación. En los países industrializados, a medida que vehículos nuevos y más limpios reemplazan a los más viejos, las emisiones totales del sector transporte empiezan a declinar, sin que haya dejado de ser la fuente más importante de contaminación del aire. De la misma forma, en el mundo en desarrollo, el número de vehículos está creciendo exponencialmente, y en ausencia de normas estrictas de control, las



emisiones de las fuentes móviles se están convirtiendo en una urgente preocupación. La figura 2.1 muestra como el número de vehículos en países en desarrollo, podría exceder el número de vehículos en el mundo industrializado en las siguientes dos o tres décadas.

Los automotores son una fuente significativa de emisiones de CO, HC, y PM, gran parte de las cuales son resultado de una combustión ineficiente o incompleta. Adicionalmente, los automotores son una de las fuentes más importantes de NO<sub>x</sub>, que junto con los HC, son los precursores esenciales del ozono troposférico (O<sub>3</sub>), el principal componente del smog fotoquímico. Todos estos contaminantes convencionales tienen importancia local por sus efectos sobre la salud humana y sus impactos ambientales, y existe cada vez una mejor comprensión de su relevancia a nivel global. Los vehículos también son una fuente importante y creciente de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el más importante de los gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global. En el apéndice A se incluye una revisión de cada uno de los principales contaminantes asociados a los automotores, incluyendo aspectos de atención más general y sus procesos químicos de formación.

emisiones de las fuentes móviles se están convirtiendo en una urgente preocupación. La figura 2.1 muestra como el número de vehículos en países en desarrollo, podría exceder el número de vehículos en el mundo industrializado en las siguientes dos o tres décadas.



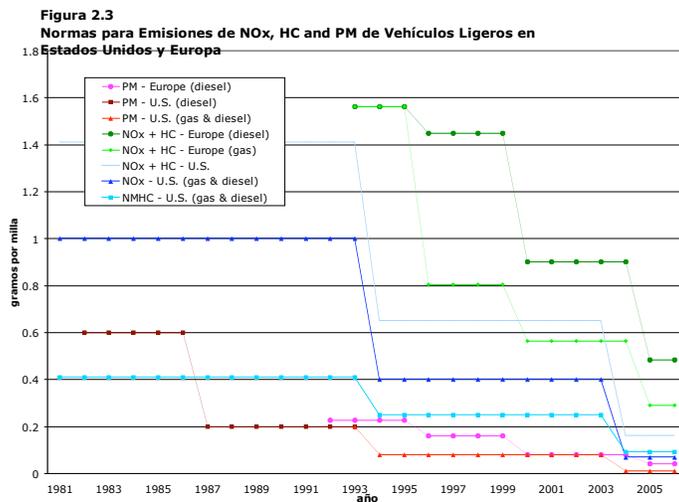
Los vehículos también son una fuente importante y creciente de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el más importante de los gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global. En el apéndice A se incluye una revisión de cada uno de los principales contaminantes asociados a los automotores, incluyendo aspectos de atención más general y sus procesos químicos de formación.

Como puede verse en la figura 2.2, el transporte es una fuente principal de CO, NO<sub>x</sub>, HC, y CO<sub>2</sub>, especialmente en aquellas zonas del mundo donde los automotores se encuentran ubicuamente. A pesar de que el transporte no es significativo como fuente directa de SO<sub>2</sub>, eliminar el azufre de la gasolina y del diesel resulta crítico para el control de otras emisiones vehiculares.

En este capítulo se describen las presiones regulatorias que han forzado a los fabricantes de vehículos a desarrollar tecnologías avanzadas para el control de emisiones. A continuación se discute el impacto del azufre de los combustibles sobre las tecnologías actuales y futuras para el control de emisiones de contaminantes, tanto de vehículos a gasolina como a diesel.

## 2.1 Presiones Regulatorias

La Unión Europea, los Estados Unidos, y otros países industrializados han luchado por mantener el paso del control de la contaminación del aire, ante el impacto de un número creciente de vehículos, mediante controles cada vez más estrictos de las emisiones. Como se muestra en la figura 2.3, una serie de pasos regulatorios han reducido dramáticamente las emisiones permitidas de contaminantes convencionales en vehículos de pasajeros. (Por ejemplo, la nueva generación de vehículos deberá ser hasta 90% más limpia que antes de las regulaciones). Los vehículos de carga también han sido sujetos a límites de emisión cada vez más estrictos, algunas veces con normas particularmente exigentes para los autobuses urbanos. Recientemente, las agencias reguladoras han empezado a ocuparse de otros vehículos, como los utilizados en la construcción y en la agricultura. En todos estos casos, la clave para cumplir con las nuevas regulaciones son el diesel y la gasolina de bajo azufre.



Todas las normas futuras: europeas, japonesas y de los Estados Unidos, dependen de la disponibilidad de combustibles de bajo azufre. Las normas de emisiones europeas y japonesas distinguen entre vehículos a gasolina y diesel, permitiendo a los vehículos a diesel emitir cantidades superiores de NO<sub>x</sub> y PM y a los vehículos a gasolina emitir cantidades superiores de CO y HC. (Las normas de vehículos de pasajeros hasta el 2005 están incluidas en la tabla 2.1.). Se espera que las normas Euro 5 comiencen a cerrar la diferencia entre diferentes tipos de vehículos, exigiendo reducciones substanciales de NO<sub>x</sub> y PM para modelos del año 2010.

Las normas para vehículos de pasajeros del Tier 2<sup>‡</sup> de los Estados Unidos están forzando el desarrollo de tecnologías de control de PM y NO<sub>x</sub> para vehículos diesel. Las normas son neutras ante el tipo de combustible y no distinguen entre tamaños de los vehículos de pasajeros. En cambio el Tier 2 ofrece un conjunto de normas que los productores de autos pueden seleccionar, permitiendo que su promedio corporativo de emisiones de NO<sub>x</sub> sea igual o menor a 0.07 g/mi. (En la tabla 2.1, los bins 8 y 10 son las normas temporales y finales.) El Tier 2 está programado para iniciar en el 2004, al mismo tiempo que los niveles de azufre en la gasolina empiecen a decaer, y las normas estarán completamente en efecto hacia el 2009, cuando los combustibles de bajo azufre sean obligatorios.

**Tabla 2.1**

**Normas futuras vs pre-control de emisiones para vehículos de pasajeros**

gramos/milla	PM		NO <sub>x</sub>		HC		NO <sub>x</sub> + HC		CO	
	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
Pre-control (~1965)	.041	.655	3-4		7-11		10-15		80-120	
U.S. Tier 2 – bin 10	0.08		0.6		0.230		–		6.4	
U.S. Tier 2 – bin 8	0.02		0.2		0.125		–		4.2	
U.S. Tier 2 – bin 5	0.01		0.07		0.061		–		2.6	
Euro 3 – 2000	–	0.08	0.24	0.80	0.32	–	–	0.90	3.70	1.03
Euro 4 – 2005	–	0.04	0.13	0.40	0.16	–	–	0.48	1.61	0.81
Japón – 2005 (promedio)	–	0.023	0.08	0.24	0.08	0.04	–	–	1.85	1.01

Las normas futuras para vehículos de carga a diesel en Europa, Japón y los Estados Unidos dependen de la disponibilidad de combustibles de bajo azufre. Las normas de Estados Unidos para vehículos de carga a diesel están programadas para iniciar en el 2007, poco después de que sea introducido un límite de 15 ppm de azufre en el diesel, y deberá llegarse a su pleno cumplimiento hacia el 2010. Los combustibles con niveles de azufre de 50 ppm serán obligatorios en Europa y Japón en el 2005, cuando las normas de emisión entren en efecto, en tanto que se espera que

**Tabla 2.2**

**Normas para vehículos pesados a diesel en Estados Unidos, Europa y Japón**

	(g/kWh)	PM	NO <sub>x</sub>	HC	CO
E.U.A.	2004	0.13	2.68	0.67	–
	2010	0.013	0.27	0.19	–
Europa	2000 (Euro III)	0.10	5.0	0.66	2.1
	2005 (Euro IV)	0.02	3.5	0.46	1.5
	2008 (Euro V)	0.02	2.0	0.46	1.5
Japón	2003	0.18	3.38	0.87	2.22
	2005	0.027	2.0	0.17	2.22

<sup>‡</sup> Objetivo nacional de la política de calidad del aire de Estados Unidos relativo a normas de emisiones de contaminantes provenientes de fuentes vehiculares. (nota del traductor)

combustibles con niveles de 10 ppm se encuentren ampliamente disponibles para entonces. Las regulaciones establecen prácticamente una reducción de un orden de magnitud en las emisiones de PM para camiones de carga. Los Estados Unidos están exigiendo una reducción equivalente en las emisiones de  $\text{NO}_x$ , lo cual supone un reto substancial para los productores de estos vehículos.

Inicialmente los productores de vehículos pudieron cumplir las normas de emisión con convertidores catalíticos simples en vehículos a gasolina y mejoramientos del motor en los vehículos a diesel. Ahora, las normas más estrictas requieren catalizadores más activos, tecnologías avanzadas, y funcionamiento completo de los controles de emisión en todo momento. Así mismo, avances ulteriores en las tecnologías de control conducirán a reducciones substanciales en las emisiones de  $\text{CO}_2$ , mediante el uso de motores más eficientes que reduzcan el consumo de combustible entre un 15–45%, (König et al 2001). La factibilidad de exportar estas tecnologías avanzadas hacia países en desarrollo, dependerá naturalmente de la disponibilidad de combustibles de bajo azufre.

La reducción de niveles de azufre en combustibles puede disminuir las emisiones vehiculares en tres formas generales: 1) mediante la reducción directa de  $\text{SO}_2$  y partículas de sulfatos, 2) logrando un mejor funcionamiento de los sistemas de control de emisiones en los vehículos existentes, y 3) impulsando nuevas tecnologías de control y diseños vehiculares más eficientes. En las siguientes secciones se discute en detalle el impacto del azufre de los combustibles sobre las tecnologías de control de emisiones, para vehículos a gasolina y a diesel.

## **2.2 Vehículos a Gasolina**

La mayoría de los vehículos a gasolina actualmente en uso están equipados con catalizadores para el control de CO, HC y  $\text{NO}_x$ , los cuales son impactados por los niveles de azufre del combustible. El impacto del azufre es más severo conforme los vehículos están diseñados para alcanzar estándares más estrictos. Los niveles actuales de azufre en el combustible son el obstáculo primario para introducir tecnologías más avanzadas de control de emisiones en el mercado. Estas tecnologías reducirían dramáticamente los contaminantes convencionales e incluso promoverían el diseño de motores más eficientes en el uso del combustible.

La siguiente sección describe los principales aspectos relacionados con los niveles de azufre de la gasolina:

- El azufre incrementa las emisiones de los catalizadores de tres vías, el tipo más común de tecnología de control de emisiones en vehículos a gasolina
- El impacto del azufre es más importante sobre sistemas de control catalítico más eficientes y avanzados.
- Los niveles actuales de azufre constituyen una barrera significativa para la introducción de diseños de motores a gasolina más eficientes. Estos diseños requieren tecnologías avanzadas de control de emisiones que son severamente impactadas por el azufre.

## Catalizadores de Tres Vías Actuales

En el mundo, 85% de los nuevos vehículos a gasolina están equipados con catalizadores de tres vías (three-way catalyst TWC), equipo que controla simultáneamente las emisiones de CO, HC, y NO<sub>x</sub> (MECA n.d.). Los vehículos con TWC deben operar con una relación aire combustible muy exacta, permitiendo sólo el oxígeno suficiente para oxidar completamente el carbono y el hidrógeno en el combustible. Los TWC utilizan luego el NO<sub>x</sub> en el escape para oxidar el CO y los HC a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O en tanto que el NO<sub>x</sub> se reduce a N<sub>2</sub>.

Los niveles de azufre en el combustible impactan el funcionamiento de los TWC en diferentes formas:

- El azufre del combustible reduce la eficiencia de conversión del CO, los HC y el NO<sub>x</sub>. El azufre compite con estos gases por superficie de reacción en el catalizador. El azufre de la corriente de escape se acumula en el TWC durante las condiciones de manejo normales y se libera como SO<sub>2</sub> durante los períodos de funcionamiento ricos en combustible y de alta temperatura, tales como la aceleración a fondo del vehículo. (Maricq et al, *Gasoline*, 2002). Las reducciones en los niveles de azufre de la gasolina —desde niveles de 200-600 ppm hasta 18-50 ppm— han dado como resultado reducciones correspondientes del 9-55% en las emisiones de HC y CO y del 8-77% en emisiones de NO<sub>x</sub>, dependiendo de las tecnologías vehiculares y de las condiciones de manejo (WWFC 2000). Se han alcanzado reducciones aún mayores que estas usando vehículos de baja emisión y en condiciones de manejo de alta velocidad. La emisión de contaminantes baja bruscamente cuando el azufre se reduce por debajo de 200 ppm, y se reduce aún más pronunciadamente con niveles de azufre menores a 100 ppm (WWFC 2000).
- La inhibición por azufre de los catalizadores no es completamente reversible. Aunque la conversión siempre mejorará con el uso de combustibles de bajo azufre, la eficiencia de los catalizadores no siempre regresa a su estado original después de la desulfuración. En pruebas usando 60 ppm de azufre en el combustible seguidas del uso de combustible con 930 ppm de azufre, las emisiones de HC se triplicaron de 0.04 g/milla a 0.12 g/milla. Cuando se regresó al uso del combustible de bajo azufre, las emisiones bajaron otra vez a 0.07 g/milla pero se requirieron etapas ricas en combustible (que producen temperaturas más elevadas en el escape) para regenerar completamente el catalizador y regresar a los niveles originales de emisión (MECA 1998).
- El contenido de azufre en el combustible contribuye al envejecimiento del catalizador. Los niveles altos de azufre causan una degradación más seria con el tiempo y una recuperación menos completa del catalizador, aún con temperaturas de escape elevadas (MECA 1998). Las temperaturas de regeneración elevadas también contribuyen al envejecimiento térmico del catalizador. El azufre eleva la temperatura de light-off, la temperatura a la cual la conversión catalítica tiene lugar, produciendo un incremento de las emisiones de encendido frío (FEV 1999).
- Los requerimientos de regeneración se añaden a las emisiones generales y reducen la eficiencia energética. Las fases de operación ricas en combustible necesarias para alcanzar las temperaturas de regeneración, producen incrementos significativos en

las emisiones de CO y HC. Incluso las emisiones de PM, bajo estas circunstancias, pueden competir con emisiones de diesel (Kittelsohn 1998). Adicionalmente, la combustión rica en combustible requiere mayor consumo del mismo. Los vehículos que operen a baja velocidad y baja carga tendrán menores temperaturas de escape, y en consecuencia menores oportunidades para la desulfuración y la regeneración del catalizador.

### **Diseños emergentes de Catalizadores de Tres Vías.**

Los beneficios de la reducción de azufre en los combustibles son mayores en los vehículos diseñados para cumplir normas de emisión más estrictas. Estos motores, de funcionamiento muy afinado, se acercan a eliminar la fase de operación rica en combustible, la cual es requerida para la desulfuración. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), realizó pruebas usando automóviles nuevos con un combustible estandarizado a 30 ppm de azufre y estimó incrementos variables de emisiones con el uso de combustibles comerciales con mayor contenido de azufre. El incremento de emisiones puede elevarse hasta 13 veces para los vehículos certificados como de “baja emisión”.

**Tabla 2.3 Niveles de Emisiones Vehiculares con un Incremento en el Contenido de Azufre de los Combustibles de 30 a 330 ppm (Koupal 1999)**

	NO <sub>x</sub>	HC
Incremento de emisiones en vehículos normales	8–10%	14–24%
Incremento de emisiones en vehículos de baja emisión	42–134%	24–40%

El incremento de emisiones puede elevarse hasta 13 veces para los vehículos certificados como de “baja emisión”.

Un objetivo para el mejoramiento de los TWC es tener la capacidad para acumular oxígeno. Esto podría permitir una oxidación eficiente de CO y HC durante los ciclos ricos en combustible, incluyendo períodos de pausa y aceleración. Los materiales efectivos de almacenamiento, que puedan soportar altas temperaturas de los catalizadores acoplados (adecuados para un rápido calentamiento y el mejoramiento consecuente de la conversión de encendido frío) también requieren del uso de combustibles de bajo azufre (Shelef and McCabe 2000).

Las normas de emisión más estrictas requieren de catalizadores extremadamente eficientes con una vida útil más larga. Las regulaciones recientes en Europa y los Estados Unidos requieren catalizadores calientes para tener un control superior al 98% de HC incluso cerca del fin de la vida útil del vehículo (100,000 km en Europa y 100,000 millas en Estados Unidos). Muchas ineficiencias derivadas del contenido de azufre del combustible ponen en riesgo la capacidad de los vehículos para alcanzar estas normas más estrictas, incluyendo: reducciones en la eficiencia de conversión, requerimientos adicionales de operación rica en combustible, incremento del tiempo light-off del catalizador y menor capacidad para acumular oxígeno.

### **Trampas de Captura de NO<sub>x</sub>**

Los vehículos a gasolina están bajo una presión creciente para aumentar su rendimiento energético, y por tanto reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los diseños de mezcla pobre de gasolina reducen el consumo de combustible en un 15–20% (König et al 2001). Para evitar que la mayor eficiencia energética se contraponga con una mayor emisión de contaminantes, estos motores de mezcla pobre requerirán nuevas tecnologías de

postratamiento para el control de emisiones de  $\text{NO}_x$ . Las trampas de  $\text{NO}_x$  que son la tecnología más eficiente para el control de  $\text{NO}_x$  en motores de mezcla pobre son impactadas mucho más severamente que los TWC por el azufre del combustible. Dado que los niveles elevados de azufre reducen la efectividad de las trampas y provocan incrementos en el consumo del combustible, la gasolina de ultra bajo azufre es el factor clave para incrementar la eficiencia de los vehículos a gasolina.

Los motores de mezcla pobre incrementan la relación aire-combustible, y por tanto reducen el consumo de combustible. Los motores de mezcla pobre proveen un beneficio automático para el control de CO y HC, que se forman en cantidades menores y pueden ser fácilmente oxidados en la mezcla rica en oxígeno del escape. El reto viene con el control de  $\text{NO}_x$  en un medio abundante en oxígeno. Las trampas de captura de  $\text{NO}_x$  enfrentan menores retos técnicos en motores de gasolina que en los de diesel, dado que la temperatura de combustión puede ser más fácilmente controlada. Las trampas de captura de  $\text{NO}_x$  proporcionan eficiencias por encima de 90% en la captura y conversión de  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$ , pero exigen combustibles virtualmente libres de azufre para un uso eficiente (ACEA 2000).

Las trampas de captura operan mediante la incorporación de óxidos básicos en el catalizador, los cuales en su turno reaccionan con el  $\text{NO}_2$  oxidado en presencia de exceso de  $\text{O}_2$ , para formar nitratos regularmente estables. El  $\text{NO}_x$  puede ser capturado de esta manera durante condiciones de combustión pobre (exceso de oxígeno). Conforme el medio de captura se acerca a su saturación, o cuando existe aceleración, el motor funcionará con mezclas ricas de combustible, generando CO y gases de HC. Esto provoca la liberación de  $\text{NO}_2$  que reacciona, como en un TWC, oxidando el CO y los HC a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , respectivamente, mientras se reduce simultáneamente a  $\text{N}_2$ .

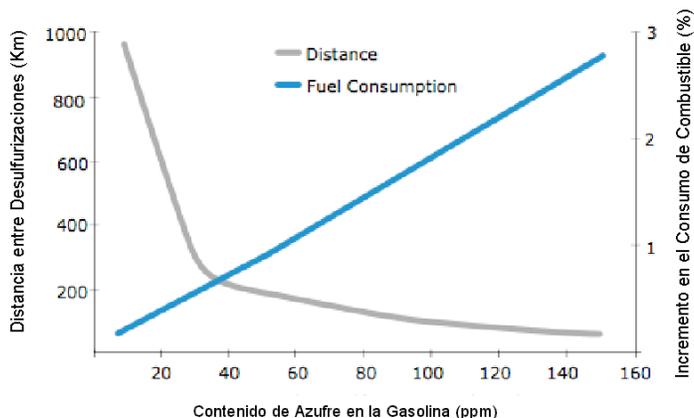
Las trampas de captura de  $\text{NO}_x$  son altamente eficientes con combustibles libres de azufre, pero el azufre reduce su eficiencia, tiempo de vida y durabilidad (ACEA 2000). El bióxido de azufre compite con los  $\text{NO}_x$  por superficie de captura en el catalizador. Los sulfatos capturados en el catalizador se adhieren a su superficie con mayor fuerza que los nitratos y sólo pueden ser removidos con mezclas ricas en combustibles y altas temperaturas de combustión. La eficiencia original del catalizador podría no recuperarse nunca después del envenenamiento con azufre, especialmente en vehículos muy afinados, de baja emisión, los cuales no pueden alcanzar temperaturas suficientemente elevadas para la desulfuración (MECA 1998). El azufre también impide el uso de materiales catalizadores más eficientes que no requieren una regeneración frecuente pero que son altamente sensibles al azufre (ACEA 2000).

La combustión de una mezcla rica, a alta temperatura, necesaria para purgar el azufre del catalizador, reduce significativamente los beneficios de eficiencia energética de los motores de mezcla pobre. Cuando la eficiencia del catalizador cae del 95% al 90%, las emisiones de  $\text{NO}_x$  en el escape se duplican y ocurre la desulfuración (ACEA 2000). Con combustibles virtualmente libres de azufre, las trampas de captura de  $\text{NO}_x$  pueden retener cerca del 95% de la captura sin necesidad de regenerarse por más de 5,000 millas. Con 7 ppm de azufre, ocurre una caída de la eficiencia al 90% después de 1,695 millas, requiriéndose la desulfuración. Como se muestra en la figura 2.4, con

combustibles por encima de 40 ppm de azufre la distancia entre eventos de desulfuración cae por un poco más de 100 millas. Esta distancia entre eventos de desulfuración se relaciona directamente con el consumo de combustible (ACEA 2000).

En Japón, los catalizadores de absorción de  $\text{NO}_x$  comercialmente disponibles requieren del uso de gasolina de grado premium, que tiene un contenido promedio de azufre de 6 ppm (EPA 1999; ACEA 2000). El potencial completo de esta tecnología de control de emisiones —la cual incrementa dramáticamente la eficiencia del combustible— sólo será posible con gasolina de ultra bajo azufre.

Figura 2.4  
Efecto del Azufre del Combustible en la Distancia entre Desulfuración y el Consumo de Combustible - BMW (ACEA 2000)



### 2.3 Vehículos a Diesel

Los motores a diesel ofrecen algunos beneficios de emisiones sobre los de gasolina. Los motores diesel convencionales típicamente usan solamente 70% del combustible requerido por un motor de gasolina comparable, reduciendo significativamente las emisiones de  $\text{CO}_2$  por milla. Al igual que los motores de mezcla pobre de gasolina en desarrollo, los motores diesel proveen un beneficio automático en el control de CO y HC. Cuando el oxígeno está ampliamente disponible, pocas de estas especies son producidas y son fáciles de oxidar en la corriente de escape. El diesel tiene el beneficio adicional de una baja volatilidad que virtualmente elimina las emisiones evaporativas de HC. Las emisiones promedio de CO en vehículos diesel de uso común son un orden de magnitud menores que las de un vehículo equivalente a gasolina. Las emisiones totales de HC son de casi una tercera parte de los vehículos a gasolina.

La principal preocupación en los motores a diesel son las emisiones de  $\text{NO}_x$  y PM. En el pasado, los fabricantes de vehículos a diesel se apoyaron principalmente en el mejoramiento de los motores diesel para poder cumplir normas de emisión más estrictas. En consecuencia, queda un limitado potencial para reducciones adicionales de  $\text{NO}_x$  a través de modificaciones en el motor (tales como la recirculación de los gases de escape y el retraso del tiempo de inyección), y los niveles de emisión actuales no son suficientes bajos como para cumplir con las normas venideras más estrictas en los Estados Unidos. Las emisiones de PM, a pesar de que son drásticamente menores que las de los primeros vehículos a diesel, continúan siendo un orden de magnitud o más superiores que las de los vehículos a gasolina con un funcionamiento apropiado.

Recientemente, el mejoramiento del diseño y la calibración del motor en los vehículos de pasajeros a diesel ha reducido las emisiones de  $\text{NO}_x$  y PM a cerca de la mitad, conservando las ventajas de economía energética de 59% sobre el promedio de los

vehículos a gasolina de peso equivalente (Stang, Koeberlein, and Ruth 2001). Esto ha puesto a las próximas normas de emisión de Estados Unidos y de otros países dentro del rango de alcance, asumiendo el uso de controles avanzados de emisiones. Con un rendimiento energético del diesel de 70 mpg, los camiones ligeros y vehículos deportivos requerirán de un 60% de eficiencia de control postcombustión de  $\text{NO}_x$  para alcanzar el bin 8, que es el menos estricto de las normas del *Tier 2* de los Estados Unidos, y aproximadamente una eficiencia de 85% para alcanzar el bin 5, que representa el nivel promedio de certificación. A 30 mpg, las eficiencias requeridas serán de 83 y 95% (Johnson 2002). La eficiencia promedio para alcanzar el bin 2 de las normas para PM será de aproximadamente 83% (Stang, Koeberlein, and Ruth 2001). En vehículos de pasajeros, los nuevos motores son cada vez mejores, reduciendo la necesidad de control adicional para emisiones de  $\text{NO}_x$  y PM a un rango del 30 al 50% de eficiencia (Johnson 2003).

Debido a su eficiencia de combustible y gran poder, los motores diesel han sido fuertemente favorecidos para aplicaciones de uso pesado. En tanto que las regulaciones del pasado se enfocaron primariamente en vehículos de carga ligera, las regulaciones más recientes en los Estados Unidos, Europa y Japón también han especificado los niveles de emisión para vehículos diesel de uso pesado. Las normas de emisión también han comenzado a extenderse a otros motores, tales como equipo de construcción y generadores. Históricamente estos vehículos y maquinarias han enfrentado pocas regulaciones, lo que ha favorecido que consuman los combustibles de diesel con mayor contenido de azufre.

Las nuevas tecnologías de control de emisiones en desarrollo tienen el potencial de permitir que todos los tipos de motores diesel cumplan normas más estrictas de emisión, mientras se mantiene o aún se incrementa su ventaja comparativa en eficiencia energética. Una variedad de nuevos diseños para filtros de partículas está siendo mejorada, y se han desarrollado nuevos tipos de sistemas de control de  $\text{NO}_x$ . La investigación en curso es alentadora, si bien el enfoque por ahora es reducir los costos, optimizar los sistemas y la durabilidad de largo plazo. Aunque la investigación para promover la tolerancia al azufre continúa, aparentemente todas estas tecnologías de postratamiento requieren de combustibles de ultra bajo azufre para alcanzar su máximo beneficio.

### **Sin Control de Emisiones**

En los vehículos a diesel la reducción del azufre no solamente reduce las emisiones de  $\text{SO}_2$ , también reduce significativamente las emisiones de partículas. En una corriente de escape rico en oxígeno como la de los vehículos a diesel un porcentaje variable del  $\text{SO}_2$  formado durante la combustión es oxidado hasta  $\text{SO}_3$ , el cual se disuelve en el vapor de agua presente hasta formar vapor de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). El  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es una de las pocas sustancias que es capaz de nucleación homogénea, lo cual parece ser el mecanismo más importante para iniciar la formación de partículas ultrafinas en las corrientes de escape del diesel, produciendo partículas de nueva formación de aproximadamente 1 nm (Shi and Harrison 1999). A pesar de que las partículas de sulfato sólo constituyen una pequeña fracción del volumen o la masa de partículas, en cambio

son una fracción relativamente grande del número total de partículas. Y las nanopartículas de sulfato proveen un área relativamente grande en la cual condensan las especies de HC, dando como resultado un crecimiento del tamaño y la toxicidad de estas partículas (Shi and Harrison 1999).

Aun sin el beneficio de controles adicionales de emisiones, reducir los niveles de azufre en el diesel reduce tanto las emisiones de PM como los efectos carcinogénicos y tóxicos de las partículas formadas (Bünger et al 2000). Una variedad de pruebas ha soportado esta conclusión. En Dinamarca una reducción en los niveles de azufre en el combustible de 440 a 0.7 ppm llevó a una reducción del 56% en el número de partículas emitidas por vehículos a diesel (Wåhlin et al 2001). Pruebas japonesas en camiones a diesel han demostrado que una reducción en azufre del combustible de 400 a 2 ppm disminuye las emisiones de PM a la mitad (WWFC 2000). En camiones a diesel de carga pesada en los Estados Unidos, una reducción en el azufre del combustible de 368 a 54 ppm produjo una disminución de 14% en la masa de emisiones de PM (MECA 1999).

Adicionalmente las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden dar lugar a la formación de partículas secundarias (partículas que se forman en el ambiente a partir de otras partículas y gases.) Los modelos de la EPA predicen que más del 12% del SO<sub>2</sub> emitido en áreas urbanas se convierte en la atmósfera en sulfatos (Darlington and Kahlbaum 1999.) Esto significa que los vehículos a diesel y a gasolina en los Estados Unidos serían responsables hasta por ocho veces más de las emisiones de PM de las que son contabilizadas actualmente en los inventarios de emisiones (EPA 2001.) Las áreas urbanas se beneficiarían más de esta reducción en las emisiones de SO<sub>2</sub>, ya que el aire contaminado de las ciudades contiene concentraciones mayores de los ingredientes que catalizan la reacción de SO<sub>2</sub> a sulfato. Aún con los actuales parques vehiculares, la reducción de azufre en los combustibles tendría un impacto significativo en las concentraciones de PM primarias y secundarias en las áreas urbanas.

### **Catalizadores de Oxidación para Vehículos a Diesel**

Los Catalizadores de Oxidación para Vehículos a Diesel (*Diesel oxidation catalysts, DOC*) son la tecnología de postratamiento de control de emisiones más común en los vehículos diesel actuales. A pesar de no estar tan ampliamente extendida como los TWC en vehículos a gasolina, los DOC son muy similares a los primeros catalizadores usados para motores de gasolina. Los catalizadores de oxidación trabajan oxidando el CO, los HC y la fracción orgánica soluble de las PM a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, en la corriente de escape rica en oxígeno de los motores diesel.

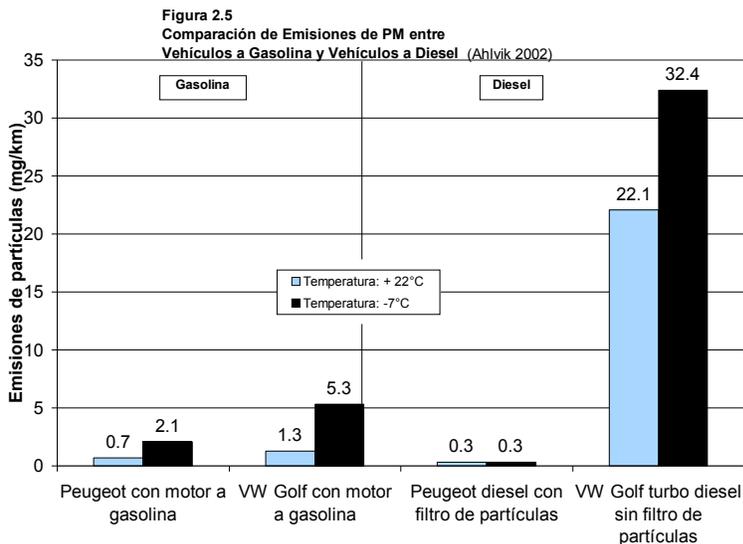
Cuando el azufre se encuentra presente en el combustible, los DOC también incrementan la tasa de oxidación del SO<sub>2</sub>, dando lugar a un aumento drástico en las emisiones de nanopartículas de sulfatos. La conversión de sulfatos depende de la eficiencia general del catalizador, los catalizadores más eficientes son capaces de convertir cerca del 100% de SO<sub>2</sub> en el gas de escape a sulfatos (WWFC 2000). Con combustibles de bajo azufre, un DOC puede llevar a una reducción del 15-31% en emisiones de PM (con niveles de azufre reducidos del 368 a 54 ppm) —el doble del beneficio de las emisiones con combustible de bajo azufre por sí solo (CARB 2000).

Con temperaturas elevadas de operación, generadas a velocidades elevadas o en condiciones de carga, el DOC acelera la oxidación de  $\text{SO}_2$ , incrementando la formación de partículas de sulfato. Bajo estas condiciones, el uso de combustibles con 350 ppm de azufre casi triplica las emisiones de PM sobre los niveles de salida del motor. A niveles de 150 ppm de azufre este efecto es mucho más bajo, con sólo un incremento del 15% en las emisiones de PM (DECSE 2001). La mayor parte del incremento se debe a las partículas de sulfato, lo cual significa que un DOC, cuando es usado con combustible de alto contenido de azufre, puede incrementar drásticamente las emisiones de las partículas más pequeñas y potencialmente más dañinas (Maricq et al, Diesel, 2002). El azufre también retrasa el *light-off* del DOC, incrementando las emisiones de encendido en frío (ACEA 2000; DECSE 2001).

Los catalizadores de oxidación de diesel continuarán jugando un papel importante en el postratamiento integrado y en los sistemas con retrofit. Sin embargo, una vez que los combustibles de bajo y ultra bajo azufre se encuentren disponibles, las tecnologías avanzadas para el control de  $\text{NO}_x$  y PM podrán permitir reducciones mucho más efectivas de emisiones. Estas tecnologías avanzadas serán necesarias para que los motores diesel puedan cumplir con las normas venideras en los Estados Unidos, Europa y Japón.

### Filtros de Partículas de Diesel

Los Filtros de Partículas de Diesel (Diesel Particulate Filters, DPF) ya han demostrado eficiencias por encima del 95% con combustible de ultra bajo azufre, y son de esperarse mayores avances en su funcionamiento y durabilidad. Como demuestra la figura 2.5, los filtros diesel son capaces de reducir el número total y la masa de las emisiones de partículas

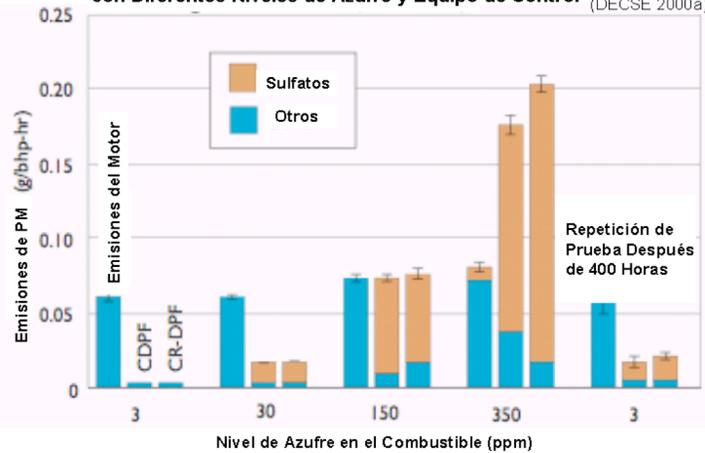


por debajo de la de los motores de gasolina (Ahlvik 2002). Los filtros de cerámica que se usan en los motores a diesel han estado comercialmente disponibles por cerca de 20 años, pero el desarrollo de nuevos materiales fibrosos y diseños de filtros aún continúa activamente. Un área importante de la investigación —el área con mayor impacto por los niveles de azufre en los combustibles— es la regeneración pasiva o limpieza de las partículas colectadas en la superficie del filtro. Los filtros necesitan ser limpiados, sin la intervención humana, antes de alcanzar su capacidad límite para mantener el funcionamiento del vehículo y la eficiencia del combustible y del filtro. El azufre reduce la eficiencia de los DPF y puede dar lugar a la formación de PM de sulfatos.

El Filtro de Partículas Diesel de Regeneración Continua (*The Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter, CR-DPF*) y el Filtro Catalizador de Partículas Diesel (*Catalyzed Diesel Particulate Filter -CDPF-*) son dos ejemplos de control de PM con regeneración pasiva. Los dispositivos CR-DPF y CDPF pueden alcanzar eficiencias de control de las emisiones de PM del 95% con combustible de 3 ppm de azufre. Sin embargo, como se

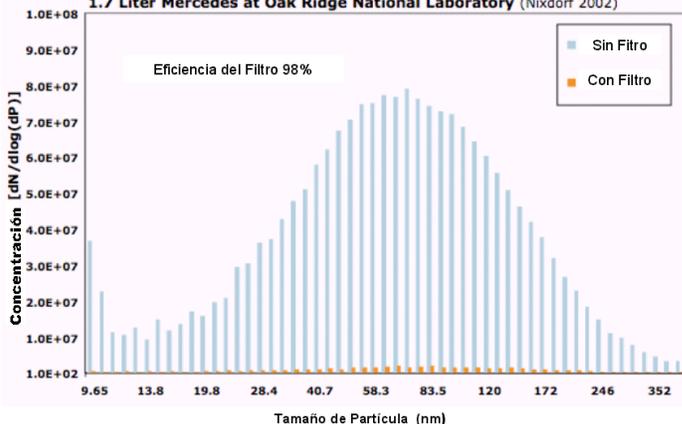
muestra en la figura 2.6 la eficiencia cae hasta 0 con combustible de 150 ppm de azufre y las emisiones de PM se duplican a partir de la línea base con combustibles de 350 ppm de azufre. El incremento en la masa de PM proviene principalmente de la unión con agua para formar ácido sulfúrico. Las emisiones de polvo también se incrementan con combustibles de alto azufre, aunque incluso con 350 ppm de azufre los DPF mantienen una eficiencia de alrededor del 50% para las PM de no-sulfato. Los sistemas eventualmente recobran las eficiencias de control de PM originales cuando se regresa al uso de combustibles de ultra bajo azufre, pero la recuperación toma tiempo debido a la acumulación de sulfatos en el catalizador.

**Figura 2.6**  
Masa de Sulfatos y Otros Constituyentes de Emisiones de PM con Diferentes Niveles de Azufre y Equipo de Control (DECSE 2000a)



El azufre también incrementa la temperatura necesaria para la regeneración del filtro. Un cambio de 3 a 30 ppm en el azufre del combustible, hace que la temperatura de los gases de escape adecuada para la regeneración se incremente aproximadamente 25°C. Los CDPF requieren temperaturas más elevadas pero se mantienen estables por encima de 30 ppm, en tanto que los CR-DPF requieren que las temperaturas se incrementen continuamente. (DECSE 2000a). Para cumplir con las regulaciones emergentes en los Estados Unidos, para camiones de uso pesado, será necesario al menos controlar el 70% de las emisiones de PM, lo cual supone niveles de azufre en el combustible de 30 ppm

**Figura 2.7**  
Datos de Remoción de Partículas en el Filtro  
1.7 Liter Mercedes at Oak Ridge National Laboratory (Nixdorf 2002)



como máximo (DECSE 2000a). Sin embargo, como lo ha señalado la Asociación Manufacturera de Equipo de Control de Emisiones (*Manufacturers of Emissions Control Association -MECA-*) dado el incremento de 20-30°C en la temperatura de regeneración del filtro para combustibles que variaron de 3 a 30 ppm de azufre, un límite de 15 ppm de azufre sería adecuado como parámetro de diseño para toda la ingeniería

y para optimizar el sistema motor/filtro en condiciones de temperatura ambiental y en todas las aplicaciones necesarias (MECA 2000).

Con el uso de azufre ultra bajo, los DPF proporcionan un control efectivo para todos los tamaños de partículas, incluyendo las menores, que son consideradas las más dañinas para la salud humana (ver figura 2.7). Los vehículos a diesel con filtros de partículas generan emisiones de PM comparables a las de los vehículos a Gas Natural Comprimido (*Compressed Natural Gas, CNG*) que son frecuentemente promovidos como la alternativa de baja emisión para los vehículos diesel (Gautam et al 2002; Smith 2002). La figura 2.8 muestra que un vehículo que utiliza combustible de ultra bajo azufre y un DPF puede, en efecto, reducir las emisiones totales de PM por debajo de las de un vehículo a gas natural comprimido.

La figura también muestra que el carbono elemental, también conocido como negro de carbón, es virtualmente eliminado por un DPF, contrariamente a lo que sucede cuando se emplea solamente el combustible de bajo azufre (CARB and ECD-1) (Smith 2002; Gautam et al 2002).

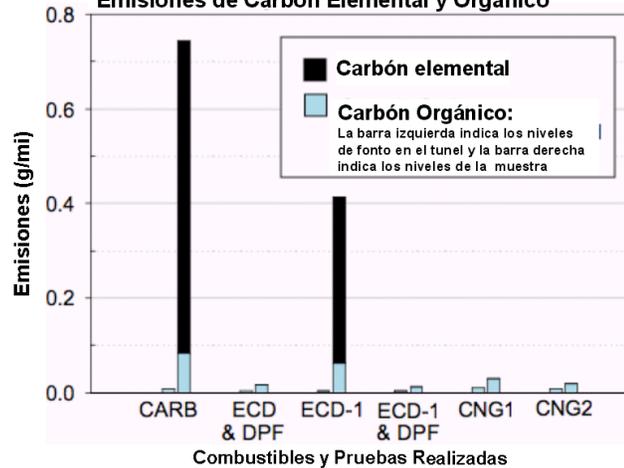
El carbono elemental ha sido identificado como responsable de más del 90% de la absorción de luz por aerosoles atmosféricos y como un factor significativo en el calentamiento global. Estos datos resaltan el potencial de los DPF, en conjunción con los combustibles de bajo azufre, para reducir en mucho la contribución de los vehículos diesel al calentamiento global (Horvath 1993; Jacobson 2002).

Adicionalmente, los filtros de partículas proporcionan un control efectivo de emisiones de CO y HC. Los DPF reducen en forma importante las emisiones de benceno, hidrocarburos policíclicos aromáticos, alquenos como el 1,3-butadieno, y otros contaminantes no regulados, pero dañinos (Ahlvik 2002; Gautam et al, 2002; Smith 2002). La eficiencia de control para CO se encuentra entre 90-99% y la de HC entre 58-82%. Estos niveles de emisión de contaminantes son uno o dos órdenes de magnitud menores que los correspondientes a vehículos a gasolina o a gas natural comprimido (Ahlvik 2002; DECSE 2000a).

### Sistemas de Control del NO<sub>x</sub>

La mayor parte de los motores a diesel dependen de retardantes de inyección para alcanzar las normas más estrictas de NO<sub>x</sub> actualmente vigentes. Los retardantes de inyección reducen el pico de temperatura y la presión de combustión, abatiendo consiguientemente la formación de NO<sub>x</sub>. Desafortunadamente, esta reducción incrementa las emisiones de PM y reduce significativamente el rendimiento del

Figura 2.8  
Emisiones de Carbón Elemental y Orgánico



combustible. Por ejemplo, las emisiones de  $\text{NO}_x$  pueden disminuirse en 45% mediante el retardo de inyección en 8 grados (aproximadamente 2%), pero esto resulta en una pérdida del 7% del rendimiento del combustible (EPA 2000b).

Se han desarrollado una variedad de tecnologías de control de  $\text{NO}_x$  para permitir a los motores diesel cumplir con normas venideras más estrictas. Las reducciones de  $\text{NO}_x$  de hasta 12% que han sido medidas con DPF no resultan confiables ni suficientes para cumplir regulaciones más exigentes (NYCTA 2001; Smith 2002). Se espera que la recirculación de los gases de escape (*Exhaust Gas Recirculation, EGR*) juegue un rol prominente en las estrategias a corto plazo para el control de  $\text{NO}_x$ , ya que solamente es influida en forma indirecta por el azufre del combustible. Dos tecnologías muy diferentes —los adsorbedores de  $\text{NO}_x$  y los sistemas de reducción catalítica selectiva (*selective catalytic reduction, SCR*) parecen ser las alternativas preferentes para un control adicional de  $\text{NO}_x$ .

Recirculación de Gases de Escape: los principales avances en el control de  $\text{NO}_x$  de vehículos a diesel se han logrado con la recirculación de gases de escape o *EGR*, la cual disminuye la temperatura de combustión y por tanto reduce la formación térmica de  $\text{NO}_x$ . El azufre del combustible no impacta las emisiones de los sistemas de recirculación de gases de escape en los motores diesel, pero si daña la durabilidad del sistema y su confiabilidad, dada la formación de ácido sulfúrico. A fin de que la recirculación del gas de escape pueda ser efectiva, la corriente de gases debe ser previamente enfriada, lo que causa la condensación del ácido sulfúrico en el sistema de recirculación. La formación de ácido eleva los costos del sistema, por la necesidad de componentes adicionales y el incremento de los costos de mantenimiento.

Se espera que la recirculación de gases de escape sea la tecnología líder utilizada para cumplir con las normas del *Tier 2* con objetivos intermedios para el 2007 en los Estados Unidos, y también con las normas emergentes para vehículos de pasajeros en Europa y Japón (Johnson 2003). El impacto en el rendimiento del combustible de la recirculación de gas de escape es mucho menor que el de los retardantes de inyección, lo cual permite disminuir a la mitad las emisiones de  $\text{NO}_x$  con un impacto menor o nulo en el rendimiento energético. El reciclaje del gas de escape también se ha utilizado efectivamente como un sistema de retrofit en conjunción con un DPF. En este caso, modificaciones relativamente simples del motor han permitido alcanzar reducciones de 40-60% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  en vehículos existentes (Chatterjee 2002).

Adsorbedores de  $\text{NO}_x$ : los adsorbedores de  $\text{NO}_x$  también se conocen como catalizadores de acumulación de  $\text{NO}_x$  o trampas para mezclas pobres de  $\text{NO}_x$ . Trabajan por el mismo principio que el sistema de control de mezclas pobres de  $\text{NO}_x$  descrito en la sección 2.2. para motores de gasolina de rendimiento eficiente y mezclas pobres. Las emisiones de  $\text{NO}$  del motor son oxidadas a  $\text{NO}_2$  y luego se acumulan como nitratos sólidos. Antes de que el adsorbente se sature completamente, un cambio en la relación aire combustible produce una mezcla de escape rica en combustible. Esto genera la liberación de  $\text{NO}_2$ , resultando en la reducción a  $\text{N}_2$  en la superficie del metal precioso del catalizador. Estos sistemas de adsorción de  $\text{NO}_x$  han demostrado una eficiencia de 95% en la conversión de  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$ , con una falla nominal de rendimiento del 1.5% (Faulkner 2002).

Desafortunadamente, las trampas de NO<sub>x</sub> también almacenan eficientemente el azufre. A través de una ruta de reacción básicamente idéntica a la del nitrógeno, las emisiones de SO<sub>2</sub> son acumuladas como sulfatos sólidos y se adhieren más fuertemente al sustrato, por lo que requieren temperaturas mayores para removerse. Después de un período de tiempo, los combustibles con azufre, aún a bajos niveles, saturan la capacidad de la trampa, causando que el almacenamiento de NO<sub>x</sub> y la eficiencia de conversión decaigan significativamente.

La regeneración de la trampa y la liberación del azufre acumulado presentan un impedimento técnico adicional, dado que las temperaturas de escape son menores y menos controlables que en motores de gasolina. Las altas temperaturas necesarias para la regeneración también son contrarias a los sistemas de recirculación de gases de escape, que de otra forma complementarían esta tecnología de postratamiento. Los motores turbocargados a diesel, en particular, no alcanzan las temperaturas requeridas para la desulfuración bajo condiciones de manejo urbanas. Aún más, los motores a diesel tienen una limitación para operar con mezclas ricas de combustibles, dados los niveles inaceptables de humo y emisiones de HC que resultan del incremento de la relación combustible-aire.

A fin de sobrepasar el impedimento de la desulfuración y para balancear la eficiencia de conversión con limitaciones de combustible, se han desarrollado y probado varias configuraciones del sistema de adsorción de NO<sub>x</sub>. Un sistema de dos rutas, con adsorbedores y filtros de partículas por duplicado, alterna el flujo de escape entre las dos rutas, permitiendo a la ruta receptora continuar capturando NO<sub>x</sub> en tanto que el combustible es inyectado en la otra ruta para regenerarla. Un sistema de una sola ruta ofrece ahorros significativos, disminuyendo a la mitad los altos costos de capital asociados con los

metales preciosos de los catalizadores, pero presenta retos más grandes en términos del manejo del motor y la eficiencia de

**Tabla 2.4 Resultados de Rendimiento Energético para Vehículos Pesados con Equipo de Control de Emisiones**  
(Hakim, Hoelzer, and Liu 2002)

	Una Sola Vía		Dos Vías con bypass		Doble Vía	
Eficiencia de Conversión (%)	78	88	80.4	80.4	94	90
Pérdida de Rendimiento(%)	1.2	2.05	1.5	1.3	1.9	2.3

conversión. En un sistema de una sola ruta con un *bypass*, el combustible se inyecta mientras el flujo de escape es reducido significativamente, permitiendo que una pequeña parte del gas no tratado escape durante la regeneración. La tecnología con el *bypass* tiene algunos de los beneficios y retos asociados con las otras configuraciones. Como se muestra en la tabla 2.4, en experimentos realizados en estado estable se determinaron altas eficiencias de conversión y pérdidas nominales de rendimiento para las tres configuraciones (Hakim, Hoelzer, and Liu 2002).

Con la disponibilidad de combustibles de bajo azufre, el sistema de una sola vía se acopla bien para vehículos de pasajeros y otras aplicaciones de carga ligera. Para aplicaciones de carga pesada, las pérdidas de rendimiento energético pueden incrementarse sustancialmente, de un máximo de alrededor de 4% con carga parcial hasta el 12%, con una disminución correspondiente en la eficiencia de conversión de NO<sub>x</sub> (Faulkner 2002). El sistema de una sola vía con *bypass* puede ser una solución de bajo costo para reducir

las pérdidas de rendimiento energético. El sistema de doble vía ha demostrado estabilidad, durabilidad y eficiencia consistente sobre 90% con una pérdida de rendimiento energético de apenas 2% (Parks 2002; EPA 2000b).

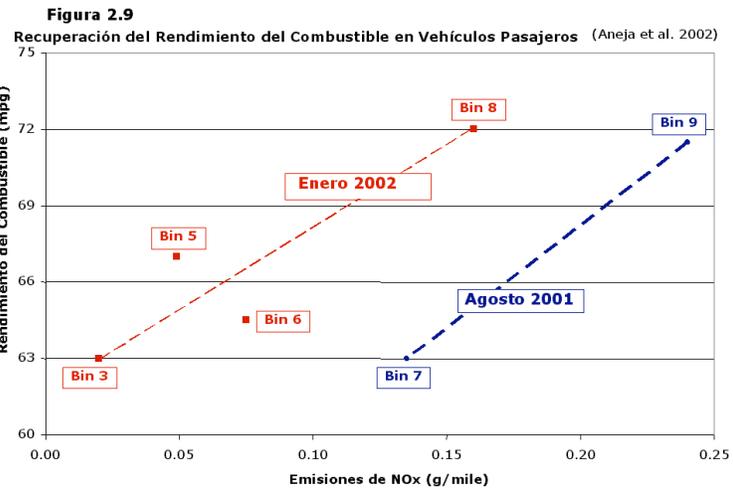
El mayor reto técnico para los adsorbedores de NO<sub>x</sub> es la regeneración y el control de la desulfuración bajo condiciones de tránsito normales. La optimización del sistema para lograr la eficiencia máxima y el mínimo efecto sobre el rendimiento energético, lo cual ya es un reto, se complica aún más por la variabilidad en las condiciones de operación y las consideraciones de durabilidad (Parks 2002).

Reducción Catalítica Selectiva (*Selective Catalytic Reduction, SCR*): La reducción catalítica selectiva ha surgido en Europa como la tecnología líder de reducción de NO<sub>x</sub> para cumplir las normas Euro IV y Euro V para vehículos diesel de carga pesada. Normalmente el motor está afinado para mantener bajas emisiones de PM y alto rendimiento energético. Debido a normas menos estrictas en Europa, no se necesita un DPF, pero en cambio se requieren controles adicionales para NO<sub>x</sub>. Esta regulación puede cumplirse con un sistema SCR con una eficiencia de conversión de NO<sub>x</sub> del 65-80%. Los beneficios de rendimiento energético, incluso contando la reducción descrita, pueden ser hasta del 7% (Johnson 2002).

La reducción catalítica usa un agente reductor, que se inyecta en el gas de escape antes del catalizador, para poder alcanzar altas tasas de conversión de NO<sub>x</sub> en los gases de escape ricos en oxígeno. El amoníaco ha sido típicamente usado como un agente reductor en los sistemas SCR para fuentes estacionarias y la urea ha sido usada para sistemas SCR de fuentes móviles. Los sistemas estacionarios tienen una eficiencia de conversión mayor a 90% y han sido ampliamente usados en los generadores de diesel y en la producción eléctrica. En tanto que estos altos niveles de eficiencia también pueden lograrse en fuentes móviles, los SCR usados en vehículos presentan diversos obstáculos. Con la variabilidad de potencia requerida por los sistemas vehiculares, puede dificultarse una dosificación precisa de urea. Esto, en su caso, requiere del uso de un catalizador de oxidación corriente abajo para prevenir que la urea no reactiva sea emitida como amoníaco (un contaminante con impactos crónicos y agudos sobre la salud humana). Adicionalmente, dos asuntos: la confiabilidad de la recarga de urea y el rediseño de infraestructura para la co-carga de combustible y urea, presentan obstáculos mayores para su uso general en vehículos de pasajeros. La recarga apropiada de urea podría ser más práctica para las flotas de vehículos de carga pesada.

El azufre no reduce la eficiencia de conversión en sistemas SCR tan drásticamente como en otras tecnologías avanzadas de control, sin embargo las emisiones son impactadas de dos maneras. El azufre del combustible incrementará las emisiones de PM corriente abajo del catalizador de oxidación. Las reacciones del azufre en sistemas SCR basados en el uso de urea pueden dar lugar al bisulfato de amonio, un irritante respiratorio severo (EPA 2000b; Khair 2002).

Eficiencias de remoción de  $\text{NO}_x$  del 80 al 90% han sido demostradas para sistemas SCR basados en urea tanto en vehículos de carga ligera como de carga pesada en un amplio rango de condiciones de prueba (Hammerle 2002). Se ha logrado un buen progreso en alcanzar con eficiencia las normas del Tier 2 de los Estados Unidos para camiones y vehículos deportivos usando sistemas SCR. Como se puede observar en la figura 2.9, las ventajas de rendimiento energético son inmensas comparadas con vehículos de gasolina comunes. Y se espera que el progreso continúe para alcanzar normas más estrictas con incrementos en el rendimiento energético (Aneja et al 2002).



Los sistemas SCR con ayuda de plasma que no son sensibles al azufre, han sido probados con una variedad de agentes reductores, incluyendo el diesel y el metanol. Con estos sistemas, en principio, es posible despreocuparse de las cuestiones sobre la recarga de combustible y la sensibilidad al azufre. De cualquier manera, a pesar de más de diez años de investigación, estos sistemas están todavía en sus primeras fases de desarrollo (Slone, Bhatt, and Puchkarev 2002; Aardahl 2002).

### Sistemas Integrados

Las regulaciones futuras requerirán sistemas integrados para el control de  $\text{NO}_x$  y PM, y por lo tanto bajos niveles de azufre, necesarios para alcanzar las condiciones de aplicación de las tecnologías más sensibles. En las zonas donde el diesel de azufre ultra bajo ya está disponible, la Toyota planea introducir un nuevo sistema para diesel limpio hacia el 2003. El sistema Toyota de Reducción de Partículas y  $\text{NO}_x$  para Diesel (*Toyota's Diesel Particulate  $\text{NO}_x$  Reduction –DPNR-*) incorpora el material adsorbente de  $\text{NO}_x$  al filtro de partículas para reducir por más de 80% las emisiones de  $\text{NO}_x$ , PM, HC, y CO (Johnson 2003). El sistema incluye una boquilla de inyección en el puerto de escape para crear un ambiente propicio para la liberación y reducción de  $\text{NO}_x$  a  $\text{N}_2$ . El azufre del combustible, que es capturado y almacenado como  $\text{SO}_2$  en el material de adsorción, incrementa la pérdida de eficiencia energética asociada con el sistema. Esto se debe al hecho de que se requiere inyectar más combustible para alcanzar la alta temperatura del lecho del catalizador de  $600^\circ\text{C}$  necesaria para la liberación del  $\text{SO}_2$  acumulado.

Otros sistemas integrados están siendo desarrollados para usarse con combustibles de bajo y ultra bajo azufre. Un sistema integrado DOC/SCR/DPF en un vehículo diesel de pasajeros de inyección directa alcanzó un 90% de eficiencia de control de  $\text{NO}_x$  y de 98% de control de PM (Hammerle 2002). Un sistema integrado EGR/DPF/SCR demostró capacidad para cumplir con las normas emergentes para vehículos de carga pesada en

los Estados Unidos, con una reducción del 96% de NO<sub>x</sub> y de 90% de PM (Khair 2002). La integración de adsorbedores de NO<sub>x</sub> con DPF también parece ser promisorio, con cerca del 87% de eficiencia de control para NO<sub>x</sub> y más de 90% de control para PM (Johnson 2002).

### **Tecnologías de Retrofit**

Los vehículos de carga pesada duran mucho tiempo. La vida media esperada de camiones pesados desde el modelo del año 1990 es de 29 años, y la vida media de los autobuses es de 16 años (BTS 2001; Davis and Diegel 2002). En los Estados Unidos, las primeras normas de NO<sub>x</sub> y PM para vehículos pesados (circa 1984) eran 50 veces más elevadas que las normas emergentes (BTS 2001). Además, las emisiones tienden a incrementarse con la edad de los vehículos. Esto significa que los beneficios completos de las nuevas normas no se notarán en varios años. De esta manera, son cruciales los programas de reducción de emisiones de vehículos viejos en los esfuerzos de corto plazo para mejorar la calidad del aire.

En los lugares donde los combustibles de bajo azufre ya están disponibles, las tecnologías de *retrofit* pueden reducir drásticamente las emisiones de los vehículos existentes. Los catalizadores de oxidación y los filtros de partículas para vehículos pesados a diesel son las tecnologías de *retrofit* más comunes. Otros proyectos recientes también han incluido equipos EGR en combinación con DPF, para controlar simultáneamente los NO<sub>x</sub> y PM.

Los catalizadores de oxidación para vehículos diesel son la opción de *retrofit* más sencilla, más flexible, y menos costosa. Con el uso de combustibles de azufre reducido o bajo azufre, un DOC puede alcanzar de 20 a 50% de reducción en emisiones totales de PM, una reducción superior a 90% de CO y HC, y una reducción de más de 70% de HC tóxicos (Johnson 2000). En tanto que los DOC son menos sensibles al azufre que la tecnología de filtración de partículas, el incremento en los niveles de azufre resulta en una reducción de la eficiencia de conversión del catalizador y puede incrementar la formación de sulfatos, resultando incluso en mayores emisiones de partículas que sin el catalizador.

Los DPF son también una opción efectiva y sencilla de *retrofit* pero exigen el uso de combustible de bajo azufre. (Para maximizar beneficios, se debe utilizar combustible de ultra bajo azufre, especialmente para programas de *retrofit* con vehículos de uso urbano, que tienden a mantener temperaturas bajas de escape.) Los programas de *retrofit* que usan sistemas CR-DPF y CDPF en los Estados Unidos y Europa han demostrado una reducción de contaminantes tóxicos emitidos por vehículos diesel de 80-100%, una reducción de masa de partículas de 85 a más de 95%, y de 70 a más de 90% de reducción en emisiones de HC, con un impacto insignificante en el rendimiento energético (Friedrich 2000). Los autobuses a diesel con *retrofit* son tanto o más limpios que los autobuses a gas natural comprimido, manteniendo emisiones más bajas de PM, CO, HC, y de carbonilos, y emisiones comparables de NO<sub>x</sub> (Johnson 2000).

A través del Programa Sueco de Ciudades Limpias, la disponibilidad de combustible de 10 ppm de azufre en Suecia ha permitido equipar con DPF a más de 6,500 autobuses y camiones (MECA n.d.). El programa fue modificado a comienzos del 2002 para añadir

una opción de control de NO<sub>x</sub> al *retrofit* estándar (DieselNet 2002). Ahí y en Hong Kong, más de 1,200 camiones y autobuses locales han sido modificados con un *retrofit* que combina el EGR y un tipo patentado de CR-DPF, como trampa continua de regeneración. Estos sistemas han probado ser durables y efectivos, y sin ningún impacto en el rendimiento energético. Con ello se han alcanzado reducciones superiores al 40% en emisiones de NO<sub>x</sub> y superiores al 90% para PM, HC y CO (Chatterjee 2002). Los combustibles de ultra bajo azufre han hecho posible que 10,000 vehículos de carga pesada hayan sido equipados con filtros de partículas en Europa, con unas 5,000,000 de millas acumuladas recorridas (Friedrich 2000). Las ciudades de Tokio y Nueva York, así como en California, también tienen programas de *retrofit* con DPF para vehículos urbanos de carga pesada

## 2.4 Resumen

La tabla 2.6 resume las tecnologías de control de emisiones disponibles para vehículos a diesel y a gasolina que son impactadas por el azufre del combustible. Cualquier nivel de reducción de azufre en el combustible llevará a reducciones correspondientes en las emisiones de SO<sub>2</sub>. Los beneficios adicionales en la reducción de otras emisiones de contaminantes pueden empezar a notarse en la medida en que los niveles de azufre se reducen por debajo de 150 ppm, estos beneficios son sustancialmente mayores cuando se aplican tecnologías de control de emisiones que sólo son viables para combustibles con azufre por debajo de los 50 o 15 ppm.

**Tabla 2.6 Impactos del Azufre en las Tecnologías de Control de Emisiones**

Tecnología	Contaminantes Objetivo	Niveles de Azufre	Beneficios	Aplicaciones
<b>Tecnologías de Vehículos a Gasolina</b>				
TWC	NO <sub>x</sub> , HC, y CO	Bajo 50 ppm recomendable	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducciones del 18% para HC y CO Y 9% de NO<sub>x</sub> con 50 ppm</li> <li>Hasta 55% para HC y CO y 77% para NO<sub>x</sub> con 15 ppm.</li> </ul>	Vehículos Existentes.
TWC avanzado	NO <sub>x</sub> , HC, y CO	Bajo 30 ppm recomendable	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayores beneficios en emisiones, durabilidad y rendimiento energético</li> </ul>	Vehículos nuevos y futuros.
Trampas de NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	Bajo 15 ppm requerido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de 90-95% en emisiones de NO<sub>x</sub></li> <li>Permite mejorar significativamente el rendimiento energético</li> </ul>	Vehículos futuros, requerido para lograr objetivos de reducción de GEI.

<b>Tecnologías de Vehículos a Diesel</b>				
Sin Controles	PM	Bajo 50 ppm recomendable	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de emisiones de PM de 14% con 50 ppm y de 50% con 15 ppm</li> </ul>	Vehículos Existentes.
DOC	PM, HC, y CO	Al menos bajo 150 ppm. (Recomendable menor de 50 ppm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducciones de 90-100% para emisiones de HC y 88-99% para CO.</li> <li>Reducciones de 15-31% para emisiones de PM con combustibles de menos de 50 ppm de azufre.</li> </ul>	Útil como una opción de retrofit de bajo costo y en sistemas integrados de control en nuevos vehículos.
DPF	PM, HC, y CO	Bajo 50 ppm requerido. Bajo 15 ppm recomendable.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducciones de 90-99% para emisiones de PM con combustibles con menos de 15 ppm de azufre.</li> <li>La eficiencia cae al ~50% con 50 ppm de azufre.</li> <li>Reducción de emisiones de HC en 58-82% y 90-99% de CO.</li> </ul>	Retrofit y tecnologías de nuevos vehículos.
NO <sub>x</sub> Adsorber	NO <sub>x</sub>	Bajo 15 ppm requerido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de emisiones de 78-94% para NO<sub>x</sub></li> </ul>	Vehículos nuevos ligeros y pesados.
SCR	NO <sub>x</sub>	Bajo 50 ppm requerido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de emisiones de 80-90% para NO<sub>x</sub></li> </ul>	Preferentemente para vehículos pesados pero se explora su uso en vehículos ligeros.

### **3. EL IMPACTO DEL AZUFRE EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

Los combustibles de bajo azufre permitirán enormes saltos en el rendimiento energético, lo cual tendrá efectos directos en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. La tecnología actualmente disponible podría reducir drásticamente tanto las emisiones de contaminantes convencionales como las de gases de efecto invernadero. Además, la investigación sigue avanzando para desarrollar tecnologías de transportación de cero emisiones, tales como la celda de combustible de hidrógeno, que es económicamente viable. El azufre es uno de los mayores obstáculos para las tecnologías que reducen o eliminan las emisiones de gases de efecto invernadero.

El azufre en los combustibles tiene un rango de efectos directos e indirectos sobre las emisiones de gases de invernadero. El azufre impide el funcionamiento eficiente de ciertos catalizadores, lo que se traduce en emisiones más elevadas de metano derivadas del catalizador y emisiones más elevadas de CO<sub>2</sub> derivadas de tecnologías más avanzadas. El azufre también impide la aplicación de tecnologías de control de emisiones en diferentes escenarios, tales como: diseños de alta eficiencia para motores de gasolina, alternativas de rendimiento eficiente de los vehículos a diesel, y vehículos a diesel avanzados o híbridos. De igual forma, las celdas de combustible, que son la solución de largo plazo más promisoría para eliminar gases de efecto invernadero requerirán de combustibles libres de azufre para funcionar.

#### **3.1 Vehículos a Gasolina**

El metano y el N<sub>2</sub>O son dos potentes gases de efecto invernadero emitidos por los vehículos a gasolina. El metano es difícil de quemar, lo que hace que los niveles de emisión sean principalmente determinados por la eficiencia del catalizador. Como se ha discutido anteriormente, el azufre impide el buen funcionamiento de los TWC al ocupar superficie de reacción en el catalizador e incrementar las temperaturas de regeneración y de *light-off*. La reducción de los niveles de azufre en el combustible de 330 ppm a menos de 1 ppm podría reducir las emisiones de metano de los motores de gasolina en 20% o quizás hasta más de 50%. Esta misma reducción de los niveles de azufre reduciría las emisiones de N<sub>2</sub>O en un 70% o hasta casi 90% (AECC 2000).

Existen muchas características de diseño que podrían incrementar el rendimiento energético de los vehículos a gasolina, y por tanto reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. El avance más drástico en el diseño del motor, que podría incrementar el rendimiento energético hasta 25%, serían los motores de inyección directa de gasolina usando combustión de mezcla pobre. En tanto que este diseño de motores tiene beneficios naturales en las emisiones directas del motor de NO<sub>x</sub>, HC, y CO, se requiere un catalizador más avanzado para lograr mayores reducciones de NO<sub>x</sub> en la corriente rica en oxígeno del escape. Incluso podría requerirse un control adicional de emisiones de PM, lo que hasta ahora no ha sido un tema de atención para los vehículos a gasolina. Ambos tipos de tecnología de postratamiento requieren combustibles de bajo azufre.

Los catalizadores y las trampas de captura de NO<sub>x</sub> descritas en la sección 2.2. requieren combustible de ultra bajo azufre para lograr su máxima eficiencia. Conforme los niveles

de azufre se elevan, se requieren más etapas de mezcla rica para regenerar las trampas y recuperar su eficiencia. Incluso con combustibles de 50 ppm, las ganancias potenciales en el rendimiento energético podrían ser recortadas a la mitad.

### **3.2 Vehículos a Diesel**

Debido al aumento en su rendimiento energético, los motores a diesel actuales pueden reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 30% sobre los vehículos convencionales a gasolina (Stang 2001). Con diseños avanzados de motor, tales como la turbo-inyección directa, los motores a diesel pueden alcanzar una reducción de hasta 45% en las emisiones de CO<sub>2</sub> (König et al 2001). A fin de cumplir las nuevas normas de emisión para contaminantes convencionales en los Estados Unidos y en Europa, ambos tipos de motores diesel, los actuales y los más avanzados, requerirán postratamiento avanzado de la corriente de escape. Todas estas tecnologías serán impactadas por el azufre hasta cierto grado, y en algunos casos los niveles de azufre del combustible representan el obstáculo principal para una comercialización de amplia escala. Adicionalmente, como se describe en la sección 2.3, debido a las necesidades adicionales de energía con la desulfuración y la regeneración, niveles superiores de azufre podrían incrementar el consumo de combustible en los vehículos que utilizan DPF y tecnologías para la adsorción de NO<sub>x</sub>. Con el uso de combustible de bajo azufre, los filtros de partículas pueden también mitigar enormemente el efecto de calentamiento global de los vehículos a diesel. Esto se logra con la virtual eliminación de las emisiones de carbono elemental, que han sido identificadas como un factor significativo del cambio climático.

### **3.3 Vehículos con Celdas de Combustible**

En el futuro las celdas de combustible podrían reducir drásticamente las emisiones de todos los contaminantes relacionados al transporte. Las tecnologías actuales de celdas de combustibles requieren de un combustible limpio compuesto por hidrógeno puro. En el corto plazo se espera que este combustible sea generado por la reformación de gas natural o combustibles de petróleo. Algunos escenarios que han sido considerados son los siguientes: reformación central, con distribución del hidrógeno; reformación en sitio en estaciones de carga distribuidas; y reformación en el vehículo (*on-board*), utilizando diesel, gasolina o metanol como el combustible de alimentación. Debido a que el azufre degrada significativamente el funcionamiento de las celdas de combustible y de los catalizadores de reformación, cualquiera de estos escenarios exigirá un combustible de alimentación virtualmente libre de azufre.

#### **4. REDUCCIÓN DE NIVELES DE AZUFRE EN LA GASOLINA Y EL DIESEL**

Recientemente, la industria de la refinación ha logrado un enorme progreso en el desarrollo de catalizadores más activos y procesos más económicos para remover el azufre de la gasolina y el diesel. Al mismo tiempo, las refinerías a lo largo del mundo han demostrado que los combustibles de bajo azufre pueden ser producidos con costos razonables mediante la tecnología actual. Por ejemplo las refinerías de California están produciendo gasolina que contiene 20 ppm de azufre en promedio (EPA 1999), a pesar del alto contenido de azufre del petróleo crudo proveniente de California y Alaska que se usa como materia prima (hasta con 11,000 ppm). De igual forma, debido a las regulaciones y los incentivos, en Suecia el diesel con 10 ppm de azufre ha estado disponible comercialmente por varios años.

La capacidad de las refinerías para reducir los niveles de azufre aún más depende de varios factores a considerar: los niveles de azufre en los combustibles actualmente producidos; la configuración de la refinería y la disponibilidad de equipos de desulfuración; la calidad del petróleo crudo usado; y el tipo y la calidad de los combustibles que se producen. Con una inversión nacional razonable las refinerías pueden modernizarse de combustibles de alto azufre a combustible de azufre reducido. Una inversión adicional se requeriría para alcanzar productos de bajo y ultra bajo azufre.

En este capítulo se revisan brevemente las opciones tecnológicas para la refinación de combustible de bajo azufre (descrita con más detalle en el Apéndice B). También se describen los costos de capital y variables asociados con los cambios de refinación para reducir los niveles de azufre, y se comparan estos costos con los diversos beneficios que pueden derivarse de los combustibles de bajo azufre.

##### **4.1 Opciones Tecnológicas**

El petróleo crudo tiene un contenido de azufre de entre 10 a 33,000 ppm, tanto el contenido de azufre como el tipo de compuestos varían mucho en el crudo de abastecimiento. Conforme la densidad del petróleo crudo se incrementa, los niveles de azufre y la dificultad para removerlo también tienden a incrementarse. Generalmente, las refinerías están construidas para procesar ya sea un petróleo dulce, de precio mayor, con bajo contenido de azufre, o bien petróleo amargo, con mayor contenido de azufre. En tanto que las refinerías obtienen algunas ventajas al utilizar crudo de alta calidad, el sobreprecio cancela por mucho la ventaja de refinar combustibles con bajo contenido de azufre.

La gasolina de producción directa —la fracción del crudo que cae naturalmente dentro del rango de densidad apropiado— es una de las porciones más ligeras del crudo y tiende a tener menores niveles de azufre. Más del 90% del contenido de azufre, que corresponde generalmente a menos del 50% del abastecimiento total de la gasolina, proviene de mezclas más pesadas, que son craqueadas en la unidad de cracking catalítico (*fluid catalytic cracking, FCC*) (EPA 1999). Mientras que el diesel de producción directa tiende a tener un contenido relativamente elevado de azufre, mucho del azufre remanente proviene de la unidad de cracking catalítico FCC. Una proporción menor del

diesel y de la gasolina proviene de otras unidades termales o de refinación catalítica. Estas unidades convierten las porciones pesadas del petróleo crudo en combustibles líquidos más ligeros.

El hidrotratamiento es la tecnología más común usada en las refinerías para remover el azufre de los fluidos de abastecimiento para la producción de la gasolina y del diesel. El hidrotratamiento incluye la adición de hidrógeno para apoyar la remoción del azufre. Este proceso tiende a mejorar la calidad del diesel aumentando el número de cetano, y disminuye la calidad de la gasolina al bajar el número de octano (ver apéndice B para mayor detalle). Las refinerías pueden tratar todo el abastecimiento de la unidad de cracking catalítico FCC, reduciendo el contenido de azufre tanto de los fluidos de alimentación para el diesel como para la gasolina al mismo tiempo. Sin embargo, esto no es suficiente para alcanzar productos de bajo azufre y es intensivo en costo de capital, requiriendo volúmenes de reactor más grandes e insumos caros de hidrógeno y energía adicionales.

El hidrotratamiento específico de los fluidos de alimentación para la producción de la gasolina y del diesel es generalmente una solución de menor costo. Muchos de los procesos y de los catalizadores recientemente desarrollados para el hidrotratamiento de los fluidos de producción de gasolina han logrado reducir la pérdida de octanaje. Este proceso tiende a operar en condiciones menos severas que los hidrotratamientos convencionales. Esto ayuda a preservar el rendimiento en la producción de gasolina y a bajar la inversión de capital, los costos operativos, y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En la medida en que el hidrotratamiento mejora la calidad del diesel, la desulfuración del diesel se dificulta debido a un contenido inicial superior de azufre y mayor dificultad para mover los compuestos de azufre en los fluidos de abastecimiento. El hidrotratamiento de los fluidos de alimentación del diesel para obtener un producto de bajo azufre requiere un reactor de mayor volumen, tiempos de procesamiento más largos, e insumos adicionales de hidrógeno y energía. En la medida en que el diesel de bajo azufre puede ser producido con la tecnología convencional de hidrotratamiento, se dificulta lograr que el proceso sea efectivo. De cualquier forma, los desarrollos recientes en tecnologías de hidrotratamiento de lecho fijo han reducido el tiempo de residencia, bajando por tanto el volumen requerido del reactor y los costos de operación.

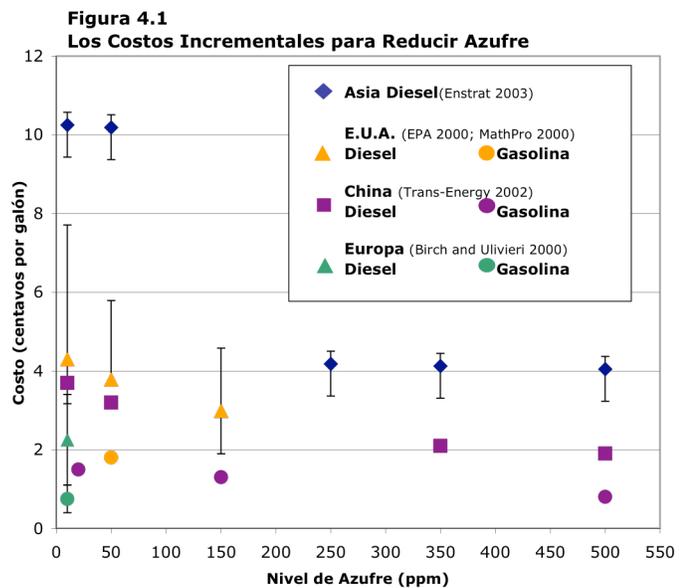
La adsorción de azufre es una tecnología de reciente comercialización que reduce los costos de remoción del azufre en la gasolina. Pruebas de laboratorio han demostrado también que esta tecnología puede ser apropiada para la desulfuración del diesel. En lugar de la adición de hidrógeno, el azufre se remueve a través de un proceso químico de adsorción. La adsorción no requiere insumos substanciales de hidrógeno y tiene lugar a temperaturas y presiones mucho más bajas que las tecnologías de hidrotratamiento, y por tanto requieren de menor consumo energético. La adsorción de azufre reduce significativamente los costos de operación, y potencialmente también los costos de capital.

Todas estas tecnologías de desulfuración se describen con más detalle en el apéndice B. En la medida en que la demanda de combustibles de bajo azufre se expanda, continuarán los nuevos desarrollos y la reducción de costos en los procesos de desulfuración.

## 4.2 Costos Asociados con la Desulfuración

Conforme la demanda global de combustibles de bajo azufre se incrementa aparecen nuevas tecnologías que prometen bajar substancialmente el costo de la desulfuración. La mayor parte de los estudios de costos que se citan en este artículo no incluyen las tecnologías emergentes, que potencialmente tienen costos más bajos. Como resultado, los costos que se describen aquí podrían sobrestimar los costos de capital y de gasto corriente en la modernización a gran escala de refinerías para reducir los niveles de azufre en los combustibles.

Los costos para alcanzar niveles de bajo y ultra bajo azufre dependen de los niveles que desean alcanzarse. Los siguientes estudios están enlistados del costo más elevado al más bajo, conforme a las normas de contenido de azufre de las regiones estudiadas. Los costos incrementales para lograr normas nacionales de bajo azufre en el diesel a lo largo de Asia parecen demasiado elevados (donde las normas actuales pueden ser tan elevadas como 10,000 ppm). Sin embargo, como se muestra en el estudio subsecuente, que examinó las inversiones de capitales requeridos para China, los costos podrían ser substancialmente más bajos y las normas más estrictas para zonas urbanas podrían ser una forma costo-efectiva de transitar hacia los combustibles de bajo azufre. Como lo demostraron los estudios y los incentivos fiscales en Europa y los Estados Unidos, una vez que se reducen los niveles de azufre, puede hacerse una transición relativamente sencilla hacia combustibles de ultra bajo azufre. La figura 4.1 indica el rango de costos asociados con la reducción del azufre en los combustibles. Los costos han sido derivados de los estudios que se describen más adelante en este artículo. Las estimaciones oficiales, los promedios o aproximaciones cercanas han sido usadas como el punto de costo, indicándose con barras de error los puntos extremos del rango indicado.



Un reporte preparado para el Banco de Desarrollo de Asia (*Asia Development Bank*) estimó los costos asociados con la reducción de niveles de azufre en el diesel en Asia. Las normas de azufre en los países asiáticos tenían un rango de 500 a 10,000 ppm para el diesel, con un promedio de 2,000–3,000 ppm. El estudio encontró que los costos son aproximadamente constantes, alrededor de 4¢ por galón, para un producto con un rango de 1,000 a 250 ppm de azufre. Existe un brinco en la consideración de los niveles de azufre, sobre el cual los costos se duplican. Los costos permanecen

aproximadamente constantes, en un poco más de 10¢ por galón, para 10 ppm y 50 ppm de azufre en el diesel (Enstrat 2002).

El estudio del grupo Trans-Energy modeló los costos capitales para mejorar la calidad del combustible del sector transporte en China. Empezando en la línea base de 800 a 1,000 ppm de azufre en la gasolina y de 2,000 ppm de azufre en el diesel, los costos variaron dependiendo de la calidad final del combustible y del tiempo sobre el cual se planeó la inversión.

- El incremento en costo del diesel (relacionado con las inversiones de capitales solamente) para el escenario del 2005 tuvo un rango de 1.9¢ por galón para alcanzar un abastecimiento nacional de diesel de 500 ppm, a 2.1¢ por galón para diesel con 350 ppm de azufre. A partir de una línea base de 500 ppm de azufre, el costo se elevó sólo a 2.0¢ por galón para proporcionar combustible de calidad superior con 50 ppm de azufre hasta para el 35% del abastecimiento total, el cual está destinado para áreas urbanas contaminadas. Todos los escenarios de 2010 tuvieron un precio de 3.2¢ por galón para alcanzar una línea base de diesel con 350 ppm de azufre, considerando que hasta el 40% del país estaría recibiendo diesel con 50 ppm de azufre.
- Los costos asociados con las inversiones de capitales para la desulfuración de la gasolina fueron aproximadamente la mitad de los costos del diesel en todos los escenarios. Para el año 2005, los incrementos en el costo de la gasolina tuvieron un rango desde 0.8¢ por galón, para alcanzar una cobertura de abastecimiento nacional de gasolina con 500 ppm de azufre, hasta 1.1¢ por galón para reducir los niveles de azufre a 150 ppm. Todos los escenarios del 2010 para gasolina tuvieron un costo de 1.5¢ por galón para una línea base de gasolina con 150 ppm de azufre con el 40% del país recibiendo gasolina con 50 ppm de azufre (Trans-Energy 2002).

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos encontró que los costos de desulfuración para cumplir la nueva norma de azufre en el diesel serán aproximadamente del doble que los costos de alcanzar esta norma en la gasolina. En los Estados Unidos, los niveles actuales de azufre varían de 300 a 350 ppm en gasolina (con excepción de California). La EPA encontró que los costos completos promedio para alcanzar la nueva norma de 30 ppm de azufre en gasolina serán superiores a 1.9¢ por galón en el 2004 pero bajarán a menos de 1.7¢ por galón en el 2010, conforme tecnologías de menor costo se hagan viables (EPA 1999). Por otra parte, los costos de alcanzar la nueva norma de 15 ppm para vehículos a diesel, a partir de la línea de base de 500 ppm, darán comienzo con un promedio nacional de 4.3¢ por galón y se incrementarán a razón de 5¢ por galón para el 2010 (EPA 2000b). Actualmente los combustibles para vehículos y maquinaria estacionarios (*non-road*) en los Estados Unidos pueden tener niveles de azufre hasta de 3,000 ppm. La EPA anunció recientemente planes para extender el límite de 15 ppm de azufre en combustibles a este tipo de vehículos, lo que podría provocar un aumento en los costos variables para todo el combustible diesel. Un estudio de la compañía MathPro estimó que una extensión del límite de 15 ppm de azufre a los vehículos y maquinarias estacionarios a diesel podría

elevar el rango estimado de costos variables para todo el diesel de 4.7–7.8¢ por galón (MathPro 2000).

Un estudio para evaluar los costos para reducir los niveles máximos de azufre de 50 ppm a 10 ppm en Europa, encontró que los costos promedio para alcanzar niveles de ultra bajo azufre fueron mucho más bajos una vez que las reducciones iniciales fueron realizadas. Se esperaba que los costos tuvieran un rango de 0.4 a 1.1¢ por galón en la gasolina y de 1.1 a 2.3¢ para el diesel, con un posible sobreprecio para el diesel que podría ser de 3.4¢ (Birch and Olivieri 2000). Una vez que se indicaron los posibles costos asociados con la reducción de niveles de azufre, el mercado alemán ha cambiado casi completamente a diesel de 10 ppm de azufre debido a un incentivo fiscal de 3 pfennigs por litro (6¢ por galón).

### 4.3 Comparación de Costos y Beneficios

Los análisis de costo-beneficio en Estados Unidos y Europa han encontrado consistentemente que los beneficios de la reducción de azufre en los combustibles de transporte rebasan por mucho los costos, independientemente de las diferentes consideraciones asumidas. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos encontró que los beneficios de normas más estrictas de emisiones son aproximadamente 10 veces más grandes que los costos requeridos de refinación. En Europa, el análisis investigó únicamente el cambio en niveles de azufre, asumiendo que las nuevas normas de emisión no eran contingentes a normas de azufre. La calidad del aire jugó un papel menos importante en este análisis, que se enfocó más hacia el incremento resultante de las modificaciones de diseño que fueron posibles con los combustibles de ultra bajo azufre.

La Agencia de Protección Ambiental realizó un análisis de costo beneficio para las normas del *Tier 2* y para los motores de uso pesado así como para las normas vehiculares. La reducción de niveles de azufre en la gasolina y diesel son una parte integral para poder cumplir las nuevas normas de emisión y lograr los beneficios esperados. La reducción de mortalidad prematura asociada a niveles menores de PM fue el beneficio dominante en cada caso. Este fue un gran beneficio para la norma de vehículos pesados, con el registro de reducciones significativas de emisiones de PM. Pero el beneficio fue también significativo para el *Tier 2*, debido a la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, que conducen a la formación secundaria de PM. Otros beneficios adicionales de las normas incluyen la reducción en impactos a la salud (como la bronquitis crónica), la pérdida de la visibilidad y el daño a los cultivos.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos proyectó cada análisis hasta el año 2030 y los beneficios netos que resultaron de estos dos estudios fueron de \$86 mil millones de dólares (ver tabla 4.1). Diversos aspectos del análisis, incluyendo el marco temporal, introdujeron incertidumbre en los números finales. De cualquier manera,

**Tabla 4.1 Beneficios y Costos en el 2030**

<b>Regulación</b>	<b>Beneficios</b> (Billones \$)	<b>Costos</b> (Billones \$)	<b>Neto</b> (Billones \$)
Tier 2 (EPA 1999)	25.2	5.3	19.9
Vehículos pesados (EPA 2000b)	70.4	4.3	66.1
<b>Total</b>	<b>95.6</b>	<b>9.6</b>	<b>86.0</b>

debido a que varios beneficios no fueron monetarizados, es posible asumir que los números finales están subestimados. Una alternativa plausible a este análisis de EPA para las normas de vehículos pesados determinó un incremento de 150% en los beneficios totales, lo que daría un resultado de beneficios netos de la regulación por \$189 mil millones de dólares (EPA 2000b).

En contraste, el análisis realizado por el *Directorate General for Environment* de la Unión Europea consideró solamente el cambio de combustibles de 50 a 10 ppm de azufre, asumiendo que las normas de emisión permanecían constantes. En este contexto el principal beneficio fue el incremento del rendimiento del combustible de los nuevos modelos que aprovechaban la ventaja del combustible de ultra bajo azufre para lograr modestos incrementos de 2-3% en el rendimiento (son posibles incrementos mucho más substanciales de rendimiento, pero el análisis tomó un enfoque conservador al predecir estos beneficios.) Los beneficios en la calidad del aire debidos a la reducción de contaminantes por el uso de combustibles de ultra bajo azufre en vehículos viejos fueron relativamente menores. Este análisis consideró la reducción neta de las emisiones de CO<sub>2</sub> (ver apéndice C) y los beneficios monetarios de siete diferentes escenarios debido a la introducción de combustible de ultra bajo azufre. La calendarización varió del 2005 al 2011 para la introducción, y el uso obligatorio de combustible de 10 ppm de azufre y los beneficios fueron proyectados hasta el 2020. El valor presente neto de los varios escenarios varió de 1.1 a 3.0 mil millones de Euros (\$1.7 a \$3.2 mil millones de dólares) (Directorate-General Environment 2001).

Estos valores son mucho más bajos que los del análisis para Estados Unidos debido a que no se incluyeron los beneficios en la salud y en la calidad del aire asociados con normas más estrictas de emisiones vehiculares. De hecho, los beneficios de la calidad del aire no cancelan el aumento de los costos de refinación en ninguno de los escenarios Europeos. El beneficio dominante en el análisis derivó del ahorro en combustible.

Mientras que el análisis realizado por el *Directorate General* predijo sólo beneficios moderados en la calidad del aire derivados de la reducción de emisiones de los vehículos existentes por la disminución de los niveles de azufre, la calidad del aire actual se ha beneficiado drásticamente con la reducción de los niveles de azufre de los combustibles. Un estudio en Dinamarca, un año después de que el nivel de azufre en el diesel fue reducido de 500 ppm a 50 ppm, reveló una disminución significativa de concentración de partículas ultrafinas en el aire ambiente. El estudio relacionó la disminución de concentraciones en el ambiente a una reducción de 56% en las emisiones promedio de partículas provenientes de vehículos a diesel (Våhlin et al 2000).

Estos ejemplos demuestran que los beneficios rebasan los costos de reducir los niveles de azufre bajo una variedad de escenarios y los beneficios pueden ser incluso superiores cuando los niveles de azufre son reducidos a partir de una línea base elevada. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, haciendo comparaciones entre la regulación vigente y medidas pasadas, encontró que la relación costo efectividad fue substancialmente mayor para los primeros esfuerzos regulatorios que hicieron más estrictos los niveles de emisión y redujeron los niveles de azufre. Al mismo tiempo, los análisis europeos demuestran que los beneficios, exclusivamente en términos de ahorro de combustible, continúan siendo positivos incluso hasta el nivel de los combustibles de ultra bajo azufre.

## **5. Combustibles Alternativos de Cero Azufre**

Al tiempo que las técnicas de refinación se han vuelto más eficientes y costo-efectivas, los combustibles alternativos con cero contenido de azufre se han vuelto económicamente viables. El biodiesel y el diesel de Fischer-Tropsch son dos alternativas de cero azufre al diesel basado en petróleo. Los costos de estos combustibles de cero azufre son más inciertos y marginalmente más elevados que los de los combustibles refinados, pero existe un gran interés en su futuro desarrollo, especialmente conforme se hacen más estrictas las normas ambientales en muchas partes del mundo, lo cual permite a los diseñadores de vehículos considerar las ventajas de los combustibles más limpios y de alta calidad.

### **5.1 Biodiesel**

El uso del biodiesel resulta en bajas emisiones de PM, con propiedades tóxicas y carcinogénicas reducidas (Bünger et al 2000). Esto se debe probablemente a la alta calidad del combustible. Los combustibles renovables que se conocen colectivamente como biodiesel tienen contenido cero de azufre y relativamente alto número de cetano, y son producidos de la soya, el girasol, la palma, y otros aceites vegetales.

El biodiesel tiene emisiones de CO<sub>2</sub> de ciclo de vida mucho más bajas que las de los combustibles basados en el petróleo. Por otra parte, los métodos de producción y las fuentes de biodiesel pueden variar enormemente, lo que resulta en un amplio rango de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de producto fabricado. La producción de biodiesel también resulta en emisiones sustancialmente menores de contaminantes y de desechos peligrosos y subproductos (tales como el aceite pesado residual y el coque producidos en las refinerías).

El biodiesel es generalmente recomendado como un agente de mezcla debido a consideraciones sobre su potencial de degradación de componentes y otras propiedades de combustión (tal como su comportamiento a baja temperatura). Las mezclas pueden mejorar la calidad de los combustibles refinados de bajo azufre, especialmente sus propiedades lubricantes (ver apéndice B). Diversas mezclas conteniendo hasta un 5% de biodiesel son utilizadas actualmente en Francia (Arcoumanis 2000).

### **5.2 Diesel de Fischer-Tropsch**

El Diesel de Fischer-Tropsch (Fischer-Tropsch Diesel, FTD) es un diesel tipo premium con alto número de cetano (75) y contenido cero de azufre. El FTD es generalmente producido a partir del gas natural en tres etapas: (1) producción de *syngas*, (2) conversión de *syngas* (3) hidropocesamiento para alcanzar un producto tipo diesel. En los primeros pasos, el gas natural es desulfurado y luego convertido en *syngas*, una mezcla de H<sub>2</sub> y CO. El segundo paso es la síntesis de Fischer-Tropsch, en la cual un catalizador basado en cobalto o en hierro es usado a baja presión. En la última fase se toma este producto ceroso y lo convierte en una variedad de productos líquidos, incluyendo diesel de alta calidad y materia prima para gasolina (Wang and Huang 1999; Eilers, Posthuma, and Sie 1991).

Las emisiones de ciclo de vida del CO<sub>2</sub> asociadas con la producción de FTD son aproximadamente equivalentes al proceso de refinación. Sin embargo, la producción de FTD resulta en reducciones significativas de otros gases de efecto invernadero, emisiones de contaminantes convencionales, residuos peligrosos y subproductos (PwC 2001).

## **6. TENDENCIAS GLOBALES HACIA LOS COMBUSTIBLES DE BAJO AZUFRE**

Se han realizado progresos en muchas partes del mundo para reducir los niveles de azufre en los combustibles. Las zonas que han cambiado a combustible de bajo azufre han visto mejoramientos inmediatos en la calidad del aire, y otras zonas también han aprovechado las ventajas de los combustibles de bajo azufre para promover programas de *retrofit*, alcanzando resultados aun mayores en el mejoramiento de la calidad del aire. Las regulaciones ambientales cada vez más estrictas en los países desarrollados han forzado a los productores de autos y a las refinerías a aplicar su impresionante capacidad técnica y organizacional para producir vehículos y combustibles que cumplan los objetivos indicados. Al mismo tiempo, retos ambientales de largo plazo están impulsando un mayor desarrollo tecnológico en anticipación a requerimientos más estrictos en el futuro.

En muchos de los países en desarrollo, la norma para vehículos diesel sigue siendo superior a 2,000 ppm de azufre al igual que una concentración de azufre de 1,000 ppm es común para la gasolina. Estos combustibles de baja calidad inhiben la introducción de nuevas tecnologías en los vehículos. Mediante la instrumentación de políticas para reducir el azufre y las emisiones vehiculares, estos países pueden lograr mayores avances para detener los crecientes impactos en la salud humana debido al incremento exponencial de su parque vehicular. De este modo, estos países relativamente nuevos en la regulación del azufre podrían retomar la experiencia de los países que han alcanzado bajos niveles de azufre en los combustibles, y que han obtenido beneficios de ello.

Mas allá de esto, los países podrían cooperar entre sí para rebasar la barrera de calidad en los combustibles y optar por vehículos de baja emisión. Los beneficios locales y ambientales son por sí mismos una razón suficiente para procurar combustibles más limpios, con todo no son el único asunto de interés: las emisiones vehiculares adquieren cada vez un mayor significado a nivel global. La calidad local del aire puede ser significativamente impactada por fuentes distantes de  $\text{NO}_x$ , transportado a través de largas distancias. Adicionalmente, los contaminantes que tradicionalmente se pensaba que sólo tenían un impacto local (como las PM y el  $\text{O}_3$  a nivel del suelo), se han revelado ahora como agentes importantes en el cambio climático global. Y los diseños de vehículos más eficientes y de baja emisión de gases de efecto invernadero requieren combustibles de ultra bajo azufre o de cero azufre. La remoción del azufre de los combustibles, junto con las tecnologías avanzadas de control de emisiones y los diseños de rendimiento eficiente, son los métodos más accesibles a corto plazo para reducir las emisiones vehiculares.

En el resto de este capítulo, se destacan las regulaciones de azufre en el combustible de los países que se encuentran a la cabeza de la reducción de emisiones vehiculares.

### **6.1 Estados Unidos**

Los niveles actuales de azufre en Estados Unidos mantienen un promedio entre 300 y 350 ppm en la gasolina y están limitados a 500 ppm para el diesel. Las regulaciones

recientes han requerido reducciones significativas en los niveles de azufre para ambos, gasolina y diesel, de tal forma que se puedan cumplir normas de emisión más estrictas para vehículos de pasajeros y de carga pesada.

La regla *Tier 2*, terminada en 1999, estableció normas de emisión neutrales al combustible para vehículos de pasajeros y requirió una reducción en el azufre de la gasolina a un promedio de 30 ppm. Los estándares de emisión se mantienen para toda la vida útil del vehículo y están basadas en un sistema de compartimentos, más que en las diferencias por clases de peso. Los vehículos deben cumplir todas las normas de emisión en cualquiera de los grupos de reglas disponibles, con un promedio para todos los modelos de una corporación para emisiones de NO<sub>x</sub> de 0.07 g/mi. En tanto que algunos modelos pueden tener emisiones más elevadas, hasta un tope de 0.20 g/mi de NO<sub>x</sub>, esto tendría que ser balanceado por otros vehículos ubicados en los conjuntos de reglas de bajas emisiones. Las normas de emisión están programadas para entrar en vigor paulatinamente, con aplicación completa para el año 2009. Las guías que limitan el contenido de azufre en la gasolina también entrarán en vigor en este período. Para el año 2004, toda la gasolina deberá mantener un promedio corporativo de 120 ppm, con una cota superior de 300 ppm de azufre. Para el año 2006, los niveles de azufre deben promediar 30 ppm, con una cota máxima de 80 ppm.

Las regulaciones para vehículos pesados a diesel, finalizadas en el 2000, establecieron un programa para regular a los vehículos y al combustible como un solo sistema. Estas reglas reducen las normas de NO<sub>x</sub> y PM en un orden de magnitud para todos los vehículos pesados a diesel. Todos los nuevos vehículos deben cumplir con esta norma de PM para el año 2007, y de NO<sub>x</sub> para el año 2010. Para apoyar el cumplimiento de estas nuevas normas, se espera que el diesel mantenga un límite de contenido de azufre de 15 ppm a partir de junio del 2006.

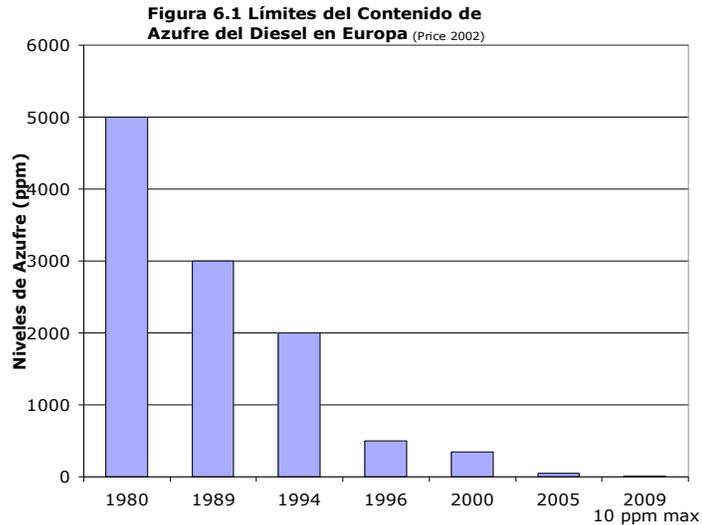
La siguiente prioridad declarada de la Oficina de Transporte y Calidad del Aire de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos es una norma para los motores de vehículos y maquinaria estacionarios, que regularán el combustible y las emisiones en una misma directiva, similar a la norma descrita para vehículos pesados a diesel. Esta oficina ha anunciado planes para extender el límite de 15 ppm de azufre en el diesel para vehículos y maquinaria estacionarios para el año 2007 o 2010, pero las nuevas normas para este tipo de motores diesel aún tienen que ser propuestas. Una nueva regulación que establece normas de emisión para embarcaciones marinas a diesel y motores industriales y recreativos a gasolina, incluyendo las motos de nieve y los montacargas, fue finalizada en septiembre del 2002.

En el 2001 el Buró de Recursos Atmosféricos de California (*California Air Resources Board, CARB*) aprobó el plan para requerir que todo el diesel vendido en el estado cumpla un límite de 15 ppm de azufre para el año 2006. California también ha iniciado la instrumentación de un plan de *retrofit* para vehículos a diesel en uso, para reducir las emisiones de PM en 75% para el 2010 y en 85% para el 2020 (CARB 2000). Las agencias de transportación han sido emplazadas a instrumentar el *retrofit* en sus autobuses a diesel, y se ha dispuesto un financiamiento especial para apoyar la limpieza de los autobuses escolares. Otros programas de *retrofit* estarán basados en requerimientos de

regulación, incentivos o en acciones voluntarias. Los programas de *retrofit* para flotillas de transportación y de vehículos gubernamentales también han sido instrumentados en otros estados y áreas urbanas. Más allá de ello, los nuevos límites para el azufre han sido extendidos para incluir los combustibles usados por vehículos y maquinaria estacionarios.

## 6.2 Europa

Los niveles de azufre han disminuido en la Unión Europea (EU) desde 1980, como lo muestra la figura 6.1. Actualmente están establecidos en 350 ppm para diesel y 150 ppm para gasolina y están programados para ser reducidos a un estándar uniforme de 50 ppm en el 2005. En el 2001 la Comisión Europea propuso una directiva para la introducción paulatina de los combustibles de “cero azufre”, que han sido definidos como aquellos con un máximo de 10



ppm. La directiva final requiere la introducción de estos combustibles de ultra bajo azufre en el 2005 y el límite de 10 ppm como nivel máximo tolerable en todos los combustibles del sector transporte para el año 2009.

Algunos incentivos se encuentran ya funcionando a lo largo de Europa para promover la adopción temprana de combustibles de bajo y ultra bajo azufre. Suecia introdujo un incentivo fiscal de 10 ppm de azufre en el diesel grado ciudad en 1991, y para 1999 este constituía el 95% del mercado nacional de diesel. La amplia disponibilidad de diesel de ultra bajo azufre ha permitido a Suecia tomar el liderazgo de la instrumentación del *retrofit* en los vehículos a diesel. Alemania, el Reino Unido, Finlandia, Suiza, Bélgica y los Países Bajos también han estructurado incentivos fiscales para promover la introducción temprana de gasolina y diesel de bajo y ultra bajo azufre. Los actuales incentivos en Alemania han llevado a los combustibles de ultra bajo azufre a una penetración casi completa del mercado. Otros países en Europa también han planeado incentivos para combustibles con 10 ppm de azufre (ECMT 2000).

El contenido de azufre del diesel para otros vehículos y maquinaria estacionarios se encuentra bajo revisión. Se espera que la norma de 10 ppm sea también aplicada a los combustibles de vehículos y maquinaria estacionarios pero el asunto está sujeto a revisión para cuando la comisión proponga nuevas reglas para este tipo de vehículos. Suecia actualmente abastece todas las clases de vehículos y maquinaria estacionarios con diesel de calidad equivalente a los vehículos de circulación regular con 10 ppm de azufre.

Dinamarca abastece todas las aplicaciones diferentes a uso vehicular con combustible para calefacción limitado a 500 ppm de azufre (DeSanti 2002).

Adicionalmente la Unión Europea planea una sustitución del 20% del diesel y gasolina con combustibles alternativos para el año 2020. Los biocombustibles y el hidrógeno están libres de azufre y el gas natural tiene un contenido muy bajo de azufre, o cero azufre cuando es transformado en diesel líquido. Este objetivo es consistente con el objetivo de la Unión Europea de reducir en 8% las emisiones de gases de invernadero para el 2010, conforme al protocolo de Kyoto.

Las regulaciones europeas para las emisiones de vehículos no están unificadas para los motores diesel y gasolina y permiten emisiones más elevadas de NO<sub>x</sub> y PM de los vehículos a diesel como una forma de compensar su mayor rendimiento energético. Se espera que varios países europeos, incluyendo Alemania, soliciten a la comisión que elimine esta diferencia en las normas Euro V para vehículos de pasajeros, las cuales están programadas para el año 2010 pero que pudieran instrumentarse desde el 2008.

### **6.3 Japón**

Por muchos años, la gasolina japonesa ha tenido un contenido muy bajo de azufre como resultado de las modificaciones diseñadas para reducir las emisiones de las refinerías. En años recientes la reducción de azufre en el diesel retomó el paso, dada la preocupación por la calidad del aire en Tokio y otras áreas urbanas. El estándar para el diesel de uso vehicular era de 12,000 ppm de azufre en 1976, pero en 1990 se redujo a 2,000 ppm. En 1997 se instrumentó una norma para reducir el azufre del diesel a 500 ppm, con una reducción adicional de un orden de magnitud programada para el 2007. El gobierno de Tokio, junto con la corte, ha promovido una acción más rápida, y la reducción de 50 ppm se ha establecido para el año 2004. El diesel de bajo azufre ya se distribuye actualmente en el área metropolitana de Tokio, y la Asociación Petrolera de Japón (*Petroleum Association of Japan*) ha anunciado que extenderá este abastecimiento a la mayor parte del país para abril del 2003 (Nemoto 2002).

A pesar de que las normas para vehículos pesados a diesel son más relajadas para PM, las nuevas normas programadas para el 2005 pondrán las emisiones de PM a la par con las de Estados Unidos y Europa. Las normas del 2005 también requieren una disminución en emisiones de NO<sub>x</sub> de camiones a diesel, similares a Europa pero no tan estrictas como la reducción de emisiones requeridas por los Estados Unidos. La reducción de emisiones ordenada para vehículos de pasajeros en el 2005 también es significativa, pero menos severa que para los vehículos a diesel.

El quinto reporte del Consejo Central de Japón para el Medio Ambiente sobre futuras políticas para la reducción de emisiones de automotores "*Future Policy for Motor Vehicle Exhaust Emission Reduction*" (2002) reconoce la necesidad de normas más estrictas de emisión y mayores reducciones en los niveles de azufre de los combustibles. La reducción de emisiones deberá balancearse con otro importante objetivo japonés que es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La tecnología que permita producir combustibles de bajo azufre deberá apoyar el logro de ambos objetivos.

La reducción a nivel nacional a 50 ppm de azufre en el diesel permitirá impulsar el mandato del gobierno metropolitano de Tokio para que todos los camiones y autobuses a diesel de esta área metropolitana se modernicen instalando filtros de partículas o sean retirados para abril del 2003. Los vehículos diesel que no puedan cumplir las normas de emisiones de PM quedarán impedidos para usarse en el área metropolitana de Tokio siete años después de su registro inicial, a menos que se incorporen al programa de *retrofit*, instalando un filtro de partículas (Odaka 2001).

## **6.4 Otras Áreas**

### **Hong Kong**

Inicialmente el diesel de bajo azufre fue ofrecido con un incentivo fiscal como parte del programa gubernamental que redujo visiblemente la contaminación del aire en la ciudad. El incentivo fue tan efectivo que desde el año 2000, sólo se encuentra disponible diesel de 50 ppm de azufre en Hong Kong. Las normas para gasolina equivalen a las europeas con 150 ppm de azufre.

Las normas Euro III de emisiones vehiculares se han implementado desde al año 2001. Hong Kong ha iniciado un progresivo programa de *retrofit*, estableciendo equipos de convertidores catalíticos/trampas de partículas para el 80% de la flota de vehículos pesados a diesel y haciendo pruebas para expandir el programa con equipo CR-DPF. Aproximadamente 2,000 viejos autobuses han sido modernizados mediante equipos DOC (Environmental Protection Department 2002).

### **Australia**

Las normas Australianas para diesel son actualmente de 500 ppm para todo el país y se ha programado reducirlas a 50 ppm en el 2006. Los niveles de azufre en gasolina se mantienen en 150 o 500 ppm, dependiendo de la localidad, y serán reducidos a 150 ppm para todo el país en el 2005. Nuevas normas de azufre acompañarán otras especificaciones de los combustibles, incluyendo la eliminación del plomo de la gasolina. Estos cambios en la calidad del combustible facilitarán la adopción de motores más limpios y tecnologías de control de emisiones en Australia.

## **6.5 Resumen**

La tabla 6.1 describe un resumen de las regulaciones existentes y de los incentivos para combustibles de bajo azufre en varios países. Si bien las regulaciones han sido la principal herramienta para reducir los niveles de azufre a largo plazo, los incentivos han sido efectivos en muchas áreas para promover la introducción temprana, y ocasionalmente la penetración completa del mercado con combustibles de bajo azufre.

**Tabla 6.1 Normas de azufre para gasolina y diesel**

<b>País</b>	<b>Regulación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Límite de Azufre (ppm)</b>
E.U.A.	Tier 2 – gasolina	2006	80 (30 ppm prom.)
	Vehículos pesados – diesel	2006	15
	Vehículos y maquinaria estacionarios– diesel	Propuesto para – 2007 o 2010	15
Unión Europea	98/70/EC EURO4	2005	50
	Enmienda al 98/70/EC	2009	10
	Incentivos en Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Alemania, Países Bajos, Suecia, Suiza y el Reino Unido para la introducción temprana de combustibles de bajo y ultra bajo azufre		10 & 50
Japón	Regulaciones nacionales	2004	50
	Debido a incentivos, combustibles de bajo azufre ya están disponibles en Tokio		50
Hong Kong	Incentivos nacionales para diesel de bajo azufre	2000	50
	Regulación – gasolina	2001	150
Australia	Regulación – gasolina	2005	150
	Regulación – diesel	2006	50

## 7. CONCLUSIONES

Los beneficios de remover el azufre en los combustibles del sector transporte son evidentes. Mientras que cualquier reducción del azufre hace disminuir directamente las emisiones de  $\text{SO}_2$  y de sulfatos, los beneficios adicionales se acrecientan con mayores reducciones.

Combustibles con Azufre Reducido (~150 ppm) hacen a los vehículos más limpios. El combustible con azufre reducido provoca una disminución de emisiones de CO, HC, y  $\text{NO}_x$  de los vehículos a gasolina equipados con catalizadores y de emisiones de PM de los vehículos a diesel, con o sin catalizadores. Estos beneficios se incrementan en los vehículos que están diseñados para alcanzar normas de emisión más estrictas y cuando los niveles de azufre se reducen aún más.

Combustibles de Bajo Azufre de (~50 ppm) permiten el uso de tecnologías avanzadas de control de emisiones en vehículos a diesel. Los filtros de partículas pueden ser usados con combustible de bajo azufre pero solamente alcanzan una eficiencia de control de aproximadamente 50%. La reducción catalítica selectiva puede usarse para controlar más del 80% de las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

Combustibles de Ultra bajo Azufre (~10 ppm) permiten el uso de adsorbedores de  $\text{NO}_x$ , incrementando el control de  $\text{NO}_x$  a más del 90% en vehículos a gasolina o a diesel. Esto permite introducir diseños de motores de mayor rendimiento, pero que son incompatibles con los sistemas de control de emisiones actuales. Los filtros de partículas alcanzan la máxima eficiencia con combustibles de ultra bajo azufre, que se aproximan al 100% de control de PM.

Los combustibles de bajo azufre pueden llevar a reducciones de todas las emisiones vehiculares de contaminantes, con beneficios que van del mejoramiento de la salud humana a una disminución del calentamiento global. Las emisiones de PM pueden ser disminuidas en casi 100% en vehículos existentes y por más del 90% en automóviles y camiones a diesel con *retrofit*. Las emisiones de  $\text{NO}_x$  pueden reducirse en 90% en los nuevos vehículos a diesel y hasta en 80% en los vehículos a gasolina existentes. El control de CO y HC se aproxima al 100% en los vehículos nuevos a diesel y en 55% para vehículos existentes a gasolina. El potencial de reducción de gases de efecto invernadero es también muy elevado —el transporte vehicular representa el 14% de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$  y el diseño avanzado de motores, permitido por los combustibles de bajo azufre, hace posible una reducción de 20–45% de estas emisiones. Incluso, la reducción del azufre genera beneficios directos, con una predicción de que las nuevas normas de Estados Unidos lograrán reducir las emisiones anuales de  $\text{SO}_2$  en aproximadamente 6%. (Darlington and Kahlbaum 1999).

A pesar de que las nuevas tecnologías de control de la contaminación son cada vez más eficientes, confiables, y duraderas, el alto contenido de azufre continúa representando una barrera para su uso generalizado. Al mismo tiempo, los costos del combustible de bajo azufre han caído, con nuevas tecnologías de desulfuración y con el mejoramiento de las técnicas tradicionales de refinación. Todos estos avances permiten reducciones

drásticas en las emisiones vehiculares, a bajo costo y en el corto plazo. Los combustibles de bajo azufre son la llave para reducir los impactos locales y globales de las emisiones vehiculares, y constituyen un primer paso necesario hacia las tecnologías vehiculares de emisión cero.

A lo largo del mundo, la experiencia y los estudios han demostrado que la producción de combustibles de bajo azufre es costeable con la tecnología actual. Los incentivos y los impuestos han llevado a una penetración completa de los combustibles de bajo y ultra bajo azufre mucho más rápido de lo esperado en Europa, Japón y Hong Kong. Los estudios realizados en Asia han demostrado que las inversiones requeridas para la modernización de las refinerías son relativamente constantes dentro de un cierto rango de niveles de azufre. Estos estudios sugieren que hacer el cambio en un solo paso para reducir directamente a niveles de ultra bajo azufre proporciona el mejor balance de costos y beneficios. Es necesario invertir para realizar mejoras y cambios importantes en las refinerías, si bien un enfoque que consista en aplicar estándares diferenciados, destinando los combustibles de ultra bajo azufre a las áreas urbanas, puede hacer decrecer los costos.

Diversos estudios en los Estados Unidos y Europa han demostrado que los beneficios de la reducción de azufre rebasan por mucho los costos de modernización de las refinerías, independientemente de los criterios utilizados. Asumiendo que las normas de emisión más estrictas fueran contingentes a combustibles de bajo azufre, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos determinó que los beneficios en la salud humana y en el ambiente por la reducción del azufre eran 10 veces más elevados que los costos, con beneficios netos de \$86 mil millones de dólares. En Europa, los combustibles de ultra bajo azufre fueron considerados por sí solos, sin el beneficio adicional de normas de emisiones más estrictas. Ahí, el incremento en el rendimiento energético fue el principal beneficio. El estudio Europeo fue conservador al estimar el potencial de las ganancias en la economía de los combustibles, y de todas maneras determinó un beneficio neto de entre \$1.7 a 3.2 mil millones de dólares. El potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero también es un beneficio sustancial de los combustibles de bajo azufre.

El desarrollo de políticas para reducir el azufre en los combustibles para el transporte y bajar las emisiones vehiculares puede aliviar los crecientes impactos en la salud humana y el ambiente asociados con el aumento constante del número de vehículos. En la evaluación de opciones para reducir el azufre, varias observaciones pueden ser útiles para el desarrollo de políticas y la toma de decisiones.

1. Mientras que los costos y beneficios varían de región a región, dependiendo del estado de las refinerías existentes, la calidad del combustible actual y las normas de emisión, la calidad del aire y otros factores, los estudios han demostrado que los costos de la reducción de azufre son razonables y minimizados por los beneficios.
2. Las regulaciones y los incentivos fiscales han probado ser herramientas efectivas para movilizar a la industria de la refinación de combustibles hacia productos de bajo azufre.

3. La programación adecuada de los cambios en las refinerías para producir combustibles de mejor calidad tiene implicaciones significativas en los costos. (Por ejemplo, si estos cambios coinciden con necesidades de expansión o mantenimiento de una refinería pueden reducirse costos). La producción y la distribución de combustibles de bajo azufre deben ser coordinadas cuidadosamente con la introducción de vehículos nuevos y de vehículos con *retrofit* que requieren combustibles de bajo azufre.
4. Resulta costo efectivo y muy ventajoso realizar el salto al diesel de ultra bajo azufre en un solo paso. Los beneficios totales de la reducción de emisiones derivada de reducciones correspondientes en el azufre se acrecientan más rápidamente conforme los niveles disminuyen de bajo a ultra bajo azufre —tanto en términos del potencial para *retrofit* de vehículos existentes como del control de emisiones para nuevos vehículos—. Debido al gran incremento de beneficios, y costos variables que permanecen constantes, tiene sentido regular directamente la introducción de diesel de ultra bajo azufre.
5. Deberán tomarse medidas para prevenir que el azufre extraído de una corriente de combustibles sea dirigido hacia otra aplicación no regulada. Por ejemplo: los aceites pesados (fuel oil) usados en embarcaciones marinas pueden convertirse en sitios de disposición no controlada para combustibles con contenido muy alto de azufre.

## REFERENCIAS

- Aardahl, C., et al, 2002. Plasma-activated lean NO<sub>x</sub> catalysis for heavy-duty diesel emissions control. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- ACEA. 2000. ACEA data of the sulphur effect in advanced emission control technologies. Brussels: European Automobile Manufacturers Association.
- AECC. 2000. Response by AECC to European Commission consultation on the need to reduce the sulphur content of petrol & diesel fuels below 50 parts per million. Brussels: Association for Emissions Control by Catalyst.
- Albritton, D. L., et al, 2001. Technical summary of *Climate change 2001: The scientific basis*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ahlvik, P. 2002. A comparison of two gasoline and two diesel cars with varying emission control technologies. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Aneja, R., et al, 2002. Attaining Tier 2 emissions through diesel engine and aftertreatment integration – strategy and experimental results. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Arcoumanis, C. 2000. Volume II: Alternative fuels. *A technical study on fuels technology related to the Auto-Oil II Programme*. Final report prepared for the European Commission Directorate-General for Energy.
- Belato, D. A. S., J. R. D. Lima, and M. R. R. Oddone. 2002. Hydrocracking – A way to produce high quality low sulphur middle distillates. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- Birch, C. H. and R. Ulivieri. 2000. *ULS gasoline and diesel refining study*. Houston: Purvin & Gertz Inc.
- Bruhl, C., and P. J. Crutzen. 1999. Reductions in the anthropogenic emissions of CO and their effect on CH<sub>4</sub>. *Chemosphere* 1:249–254.
- Brunekreef, B., et al, 1997. Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways. *Epidemiology* 8:298–303.
- Bünger, J., et al, 2000. Mutagenicity of diesel exhaust particles from two fossil and two plant oil fuels. *Mutagenesis* 15:391–397.
- BTS. 2001. *National transportation statistics 2001*. Washington, D.C.: Bureau of Transportation Statistics.
- Calvert J. G., et al, 1993. Achieving acceptable air quality—some reflections on controlling vehicle emissions. *Science* 261:37–45.
- CARB. 2000. *Risk reduction plan to reduce particulate matter emissions from diesel-fueled engines and vehicles*. Sacramento: California Air Resources Board.
- Central Environment Council. 2002. *Future policy for motor vehicle exhaust emission reduction (Fifth report)*. Tokyo: Ministry of the Environment Government of Japan.
- Chatterjee, S. 2002. Performance of Johnson Matthey EGRT™ emission control system

- for NO<sub>x</sub> and PM emission reduction in retrofit application. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Colvile, R. N., et al, 2001. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment* 35:1537–1565.
- Cooper, B. H., and K. G. Knudson. 2002. Production of ULSD: Catalysts, kinetics and reactor volume. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- Darlington T., and D. Kahlbaum. 1999. *Nationwide benefits of a low sulfur diesel fuel*. Novi: Air Improvement resource, Inc.
- Davis, S. C. and S. W. Diegel. 2002. *Transportation energy data book: Edition 22*. Oak Ridge, Tenn.: Oak Ridge National Laboratory.
- DECSE. 2000a. *Phase I interim data report no. 4: Diesel particulate filters—final report*. Washington, D.C.: Diesel Emission Control – Sulfur Effects Program.
- . 2000b. *Phase II summary report: NO<sub>x</sub> adsorber catalysts*. Washington, D.C.: Diesel Emission Control – Sulfur Effects Program.
- . 2001. *Final report: Diesel oxidation catalysts and lean-NO<sub>x</sub> catalysts*. Washington, D.C.: Diesel Emission Control – Sulfur Effects Program.
- DeSanti, G. 2002. Diesel engine fuels & lubricants for Europe: Present status & perspectives. Presentation at Motor Fuels: Energy Efficiency & Emissions in Transportation, Washington, D.C., October 9–10.
- DieselNet. 2002. Emissions standards: Sweden. [cited 15 November 2002] DieselNet: Diesel Emissions Online.
- Directorate-General Environment. 2001. *The costs and benefits of lowering the sulphur content of petrol & diesel to less than 10 ppm*. Brussels: European Commission.
- ECMT. 2000. *Fuel sulphur limits*. Paris: European Conference of Ministers of Transport.
- EDGAR. 2001. Emission database for global atmospheric research, version 3.2. Primarily referencing: Olivier, J. G. J., and J. J. M. Berdowski. 2001. Global emissions sources and sinks. In *The Climate System*, ed. J. Berdowski, R. Guicherit, and B. J. Heij, 33–78. Lisse: A.A. Balkema Publishers/Swets & Zeitlinger Publishers.
- EIA. 2001. *The transition to ultralow-sulfur diesel fuel: Effects on prices and supply*. Washington, D.C.: Energy Information Administration.
- Eilers, J., S. A. Posthuma, and S. T. Sie. 1991. The Shell Middle Distillate Synthesis Process (SMDS). *Catalysis Letters* 7:253–269.
- Enstrat International Ltd. 2002. Cost of diesel fuel desulphurization for different refinery structures typical of the Asian refining industry. Prepared for the Asian Development Bank.
- Environmental Protection Department. 2002. Cleaning the air at street level. Hong Kong: The Government of Hong Kong SAR.
- EPA. 1999. *Regulatory Impact Analysis – Control of air pollution from new motor vehicles: Tier 2 motor vehicle emissions standards and gasoline sulfur control requirements*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- . 2000a. *Technical support document: Control of emissions of hazardous air pollutants*

- from motor vehicles and motor vehicle fuels. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- . 2000b. *Regulatory Impact Analysis: Heavy-duty engine and vehicle standards and highway diesel fuel sulfur control requirements*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- . 2001. *2000 air quality trends report*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- . 2002a. *Latest findings on national air quality: 2001 status and trends*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- . 2002b. *Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2000*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- Faulkner, S. 2002. NO<sub>x</sub> adsorber developments. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- FEV. 1999. *Influence of the sulphur content in fuel on the fuel consumption and pollutant emissions of vehicles with gasoline and diesel engines*. Report commissioned by the Association of the Automotive Industry (VDA) IG Metall.
- Fredriksson, M., et al, 2000. Impact of a 10 ppm sulphur specification for transport fuels on the EU refining industry. Brussels: Concawe.
- Freidrich, A. 2000. Diesel retrofit German perspective. Presentation at the International Diesel Retrofit Advisory Committee Meeting, Sacramento, Calif., November 3.
- Gautam, M., et al, 2002. Concentrations and size distributions of particulate matter emissions from catalyzed trap-equipped heavy-duty diesel vehicles operating on ultralow sulfur EC-D fuel. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- General Motors Corporation, et al, 2001. Well-to-wheel energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/vehicle systems—North American analysis. Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory's Information and Publishing Division.
- Greenwood, G., et al, 2002. Sulfur removal from gasoline and diesel: Reaching low levels without sacrificing fuel quality or quantity. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- Gugele, B., and M. Ritter. 2002. *Annual European community CLRTAP emission inventory 1990–99*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Hakim, N., J. Hoelzer, and Y. Liu. 2002. NO<sub>x</sub> adsorbers for heavy truck engines—testing and simulation. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Hammerle, R. 2002. Urea SCR and DPF system for diesel sport utility vehicle meeting tier II bin 5. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Horvath, H. 1993. Atmospheric light absorption—A review. *Atmospheric Environment Part A—General Topics* 27:293–313.
- IPCC. 2000. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacob, D. J. 1999. *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton: Princeton University

Press.

- Jacobson, M. Z. 2002. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *Journal of Geophysical Research* 107:ACH 16-1–22.
- Johnson, T. V. 2000. Overview of diesel PM emission control retrofit technologies. Presentation at the International Diesel Retrofit Advisory Committee Meeting, Sacramento, Calif. November 3.
- . 2002. Diesel emission control: Last 12 months in review. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- . 2003. Diesel emission control—the last 12 months. *SAE Technical Paper Series* 2003-01-0039.
- Khair, M. 2002. Low emissions potential of EGR-SCR-DPF and advanced fuel formulations—A progress report. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Kittelson, D. B. 1998. Engines and nanoparticles: A review. *Journal of Aerosol Science* 29: 575–588.
- König, A., et al, 2001. Current tasks and challenges for exhaust aftertreatment research. A viewpoint from the automotive industry. *Topics in Catalysis* 16/17:23–31.
- Koupal, J. W. 1999. *Development of light-duty emission inventory estimates in the notice of proposed rulemaking for tier 2 and sulfur standards*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- Lloyd, A. C., and T. A. Cackette. 2001. Diesel engines: Environmental impact and control. *Journal of the Air & Waste Management Association* 51:809–847.
- Maricq, M. M., R. E. Chase, N. Xu, and D. H. Podsiadlik. 2002. The effects of the catalytic converter and fuel sulfur level on motor vehicle particulate matter emissions: Gasoline vehicles. *Environmental Science & Technology* 36:276–282.
- Maricq, M. M., R. E. Chase, N. Xu, and P. M. Laing. 2002. The effects of the catalytic converter and fuel sulfur level on motor vehicle particulate matter emissions: Light duty diesel vehicles. *Environmental Science & Technology* 36:283–289.
- Martino, G., and H. Van Wechem. 2002. Current status and future developments in catalytic technologies related to refining and petrochemistry. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- MathPro Inc. 2000. *Refining economics of diesel fuel sulfur standards: Supplemental analysis of the 15 ppm sulfur cap*. West Bethesda, Maryland: MathPro Inc.
- MECA. 1998. *The Impact of Gasoline Fuel Sulfur on Catalytic Emission Control Systems*. Washington, D.C.: Manufacturers of Emission Controls Association.
- . 1999. *Demonstration of Advanced Emission Control Technologies Enabling Diesel-Powered Heavy-Duty Engines to Achieve Low Emission Levels*. Washington, D.C.: Manufacturers of Emission Controls Association.
- . 2000. Statement of the Manufacturers of Emissions Controls Association on the U.S. Environmental Protection Agency's Proposed Heavy-duty Engine and Vehicle Standards and Highway Diesel Sulfur Control. Washington, D.C.: Manufacturers of Emission Controls Association.

- . n.d. Clean air facts: Emission control retrofit of existing diesel engines. Washington, D.C.: Manufacturers of Emission Controls Association.
- Nemoto, S. 2002. Status of fuels and lubricants for diesel engines in Japan. Presentation at Motor Fuels: Energy Efficiency & Emissions in Transportation, Washington, D.C., October 9–10.
- NYCTA. 2001. Interim report: Emissions results from clean diesel demonstration program with CRT™ particulate filter at New York City transit. Presentation by the New York City Transit Authority.
- Odaka, M. 2001. Outline of diesel retrofit program in Japan. Presentation at the International Diesel Retrofit Advisory Committee Meeting, Pasadena, Calif., June 5.
- Parks, J. et al, 2002. Durability of NOx adsorbers. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Price, M. J. 2002. The development of specifications for automotive fuels. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- PwC. 2001. *Shell Middle Distillate Synthesis (SMDS) Application of a Life Cycle Approach to Assess the Environmental Inputs and Outputs, and Associated Environmental Impacts, of Production and Use of Distillates from a Complex Refinery and SMDS Route*. PricewaterhouseCoopers.
- Rickeard, D. J., et al, 1996. Exhaust particulate size distribution: vehicle and fuel influences in light duty vehicles. *SAE Technical Paper Series 961980*.
- Shelef, M., and R. W. McCabe. 2000. Twenty-five years after the introduction of automotive catalysts: what next? *Catalysis Today* 62:35–50.
- Shi, J. P., and R. M. Harrison. 1999. Investigation of Ultrafine Particle Formation during Diesel Exhaust Dilution. *Environmental Science & Technology* 33:3730–3736.
- Slone, R., B. Bhatt, and V. Puchkarev. 2002. Plasma assisted catalysis system for NOx reduction. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Smith, D. 2002. Investigation of the effects of fuels and aftertreatment devices on the emission profiles of trucks and buses. Paper presented at the 8<sup>th</sup> Diesel Engine Emissions Reduction Conference, San Diego, Calif., August 25–29.
- Stang, J. H., D. E. Koeberlein, and M. J. Ruth. 2001. Cummins Light Truck Diesel Engine Progress Report. *SAE Technical Paper Series 2001-01-2065*.
- Storey, J. M. E., et al, 2000. Particulate Emissions from a Pre-Emissions Control Spark-Ignition Vehicle: A Historical Benchmark. *SAE Technical Paper Series 2000-01-2213*.
- Stuntz, G. F., and F. L. Plantenga. 2002. New technologies to meet the low sulfur fuel challenge. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.
- Tobias, H. J., et al, 2001. Chemical Analysis of Diesel Engine Nanoparticles Using a Nano-DMA/Thermal Desorption Particle Beam Mass Spectrometer. *Environmental Science & Technology* 35:2233–2243.
- Trans-Energy Research Associates, China Petrochemical Consulting Corporation, and Lawrence Berkeley National Laboratory. 2002. Improving transport fuel quality in China: Implications for the refining sector. Draft report.

- UN. 1999. Annual Populations 1950–2050: The 1998 Revision. New York: United Nations.
- Wåhlin, P., et al, 2001. Pronounced decrease of ambient particle number emissions from diesel traffic in Denmark after reduction of the sulphur content in diesel fuel. *Atmospheric Environment* 35:3549–3552.
- Wang, M. Q., and H. S. Huang. 1999. *A Full Fuel-Cycle Analysis of Energy and Emissions Impacts of Transportation Fuels Produced from Natural Gas*. Argonne, Illinois: Center for Transportation Research Argonne National Laboratory.
- World Bank. 1999. *World Development Indicators 1999*. Washington, D.C.: World Bank.
- WWFC. 2000. *World-wide fuel charter*. Published by ACEA, Alliance, EMA, and JAMA.
- Xiao-dong, G., et al, 2002. SSHT process: A low cost solution for low sulfur and low aromatic diesel. Paper presented at the 17<sup>th</sup> World Petroleum Congress, Rio de Janeiro, September 1–5.

## **APÉNDICE A – EMISIONES DE AUTOMOTORES VEHICULARES**

La contaminación vehicular se distingue de otras fuentes de contaminación en que las emisiones de contaminantes se liberan en la inmediata cercanía de las personas expuestas. Por ejemplo, los vehículos son 300 veces más efectivos en contribuir a la exposición humana que las emisiones de las chimeneas de 200 metros (Colvile et al, 2001). Las áreas urbanas y sus alrededores son más seriamente afectadas por la contaminación vehicular, con impactos en la salud humana, en la visibilidad, y daños ambientales y sobre diferentes materiales. Además de los impactos locales, el transporte es una de las fuentes más importantes y crecientes de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global.

Este apéndice hace una breve descripción de los contaminantes principales asociados con los vehículos automotores, incluyendo los aspectos que requieren mayor atención y sus mecanismos químicos de formación.

### **A.1 Monóxido de Carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta que ocurre cuando no existe suficiente oxígeno para completar la oxidación del carbono de los combustibles y formar bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Incluso si existe suficiente oxígeno, el CO se formará en las regiones ricas en combustible de la flama (regiones donde no existe suficiente oxígeno para permitir una combustión completa). A las temperaturas de combustión, el CO normalmente se oxidará hasta  $\text{CO}_2$  en presencia de oxígeno, sin embargo el CO puede mantenerse en concentraciones muy elevadas si los gases de escape se enfrían rápidamente, como ocurre en los vehículos, a pesar de la disponibilidad de oxígeno. A temperatura ambiente, el mecanismo de pérdida principal es la oxidación por radicales hidroxilo (OH), a  $\text{CO}_2$ . El ciclo de vida del CO es de varias semanas, lo suficientemente largo para permitir que el gas escape de las cuencas urbanas y se mezcle en la atmósfera.

El transporte es la mayor fuente de CO en el mundo industrializado, representando más del 70% de las emisiones en Estados Unidos (EPA 2001). En las zonas urbanas, los vehículos son incluso una fuente de mayor importancia, representando hasta el 95% de las emisiones (EPA 2002a). En los países en desarrollo, las fuentes del sector transporte son menos importantes, si bien sus emisiones en algunas regiones crecen hasta en un 9% anual (EDGAR 2001).

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro que se enlaza fuertemente a la hemoglobina en los glóbulos rojos, bloqueando la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. La exposición a elevadas concentraciones de CO es por ello más peligrosa para aquellos que tienen enfermedades cardiovasculares. A niveles elevados, la exposición al CO puede bloquear la percepción visual, la capacidad de trabajo y la destreza manual en individuos sanos. En áreas no ventiladas, el envenenamiento por CO puede ser fatal.

En forma adicional a los impactos directos, el CO influye indirectamente en el calentamiento global por competir con el metano en la oxidación por radicales de OH

presentes en la atmósfera. Con mayores concentraciones de CO, hay una disponibilidad menor de OH para oxidar el metano, un potente gas de efecto invernadero, lo que conlleva a mantener elevadas las concentraciones de este contaminante en la atmósfera (Bruhl and Crutzen 1999).

## **A.2 Hidrocarburos (HC)**

Esta es una clase de contaminantes que incluye miles de especies. Los HC son también conocidos como compuestos orgánicos volátiles (*volatile organic compounds, VOC*) o como gases orgánicos no metano (*non-methane organic gases, NMOG*)<sup>§</sup>. Los vehículos son una fuente de emisiones evaporativas de HC y de emisiones del escape que resultan de la combustión incompleta. Las emisiones evaporativas de HC ocurren cuando los vapores escapan durante la recarga de combustible o de componentes de los vehículos no sellados herméticamente. Algunas especies de hidrocarburos también provienen de la combustión incompleta, que ocurre en las regiones de mezcla rica en la flama, o bien cuando la flama está limitada por bajas temperaturas en las paredes de los pistones. Tal como ocurre con el CO, las emisiones de HC pueden ser reducidas en forma importante en condiciones de operación de mezcla pobre, (cuando un exceso de oxígeno esta disponible). Las fuentes de transporte son responsables de aproximadamente el 25% de las emisiones de HC causadas por actividades humanas y de más del 35% en el caso de los países industrializados (EDGAR 2001; EPA 2001).

Los hidrocarburos son problemáticos, tanto porque son precursores del ozono a nivel del suelo como porque algunas especies de hidrocarburos por sí mismas son tóxicas o carcinogénicas. Los principales mecanismos de extinción de hidrocarburos —fotólisis con la luz del sol y la reacción con OH— conducen a la generación de ozono mediante reacciones con los óxidos de nitrógeno. Los efectos dañinos del ozono se describen más adelante en este apéndice.

Las fuentes de transporte son responsables por la emisión del 50 al 75% de las especies de hidrocarburos que han sido reconocidas como probables carcinógenos: benceno, acetaldehído, 1,3-butadieno, y formaldehído (EPA 2000). Los efectos de exposiciones elevadas a emisiones de HC pueden incluir efectos en el desarrollo neurológico y reproductivo, impactos respiratorios y cáncer.

## **A.3 Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

El monóxido de nitrógeno (NO), es la principal forma de emisiones de NO<sub>x</sub> del vehículo, y se oxida rápidamente a bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), que es el principal precursor de la formación de ozono en la atmósfera. En los vehículos, los NO<sub>x</sub> se forman principalmente en un proceso térmico que se incrementa de acuerdo a la temperatura de combustión. A temperaturas más elevadas y en la presencia de oxígeno, el nitrógeno(N<sub>2</sub>) del aire reacciona con radicales de oxígeno, formando NO. Al contrario del CO y de los HC, la formación de NO<sub>x</sub> es favorecida durante condiciones de mezcla pobre. La temperatura de combustión, de cualquier forma, se reduce con el incremento de la relación aire combustible, resultando en una reducción en los niveles

---

§ En Español son también conocidos como Hidrocarburos No Metano -HCNM-.(nota del traductor)

de  $\text{NO}_x$  que se forma en los motores que funcionan con mezclas pobres, como es el caso de los motores diesel.

El sector transporte es la principal fuente de  $\text{NO}_x$  en el mundo industrializado, representando más del 50% de las emisiones (EPA 2001; Guegele and Ritter 2002; EDGAR 2001). En los Estados Unidos y en otros países industrializados, el incremento del número de vehículos se ha compensado con normas de emisión más estrictas, lo que ha resultado en un volumen constante de emisiones de  $\text{NO}_x$  en los últimos 20 años.

El bióxido de nitrógeno es un irritante respiratorio y una exposición crónica a elevados niveles de este contaminante puede incrementar la incidencia de enfermedades respiratorias agudas en los niños y disminuir la resistencia de los adultos a las enfermedades respiratorias. El  $\text{NO}_2$  absorbe la luz azul, lo que da como resultado el tinte terroso-rojizo, característico de las atmósferas contaminadas.

El  $\text{NO}_x$  es un precursor esencial que determina la generación del ozono a nivel del suelo. El  $\text{NO}$  se oxida para formar  $\text{NO}_2$  en la atmósfera mediante reacciones con diferentes especies de HC. Entonces el  $\text{NO}_2$  se fotoliza en presencia de luz solar, y los radicales del oxígeno liberado reaccionan rápidamente con el oxígeno molecular del aire ( $\text{O}_2$ ) para formar ozono ( $\text{O}_3$ ). El tiempo de vida del  $\text{NO}_x$  es de aproximadamente un día. Sin embargo, el  $\text{NO}_x$  puede distribuirse en forma amplia a través de la formación de otras especies más estables, que pueden ser transportadas a través de largas distancia y luego volverse a descomponer para liberar  $\text{NO}_x$  (Jacob 1999).

El mecanismo principal de pérdida de  $\text{NO}_x$  en la atmósfera es su oxidación para formar ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$ . Debido a que este último es altamente soluble en agua, el  $\text{HNO}_3$  es lavado por precipitación a los pocos días. El  $\text{HNO}_3$  es una de las dos especies críticas de la lluvia ácida, y de esta forma se dispersa ampliamente en la naturaleza causando extensos daños en ecosistemas como lagos, bosques y ríos. Los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) son una fuente de nitrógeno fácilmente asimilable y constituyen una contribución importante para la eutroficación, o sea la excesiva fertilización de lagos, estuarios y bahías. La eutroficación produce un crecimiento excesivo de algas que dañan otras plantas acuáticas y a los peces. El nitrato puede también reaccionar en la atmósfera para formar partículas de aerosol, que causan impactos en la visibilidad y en la salud humana

#### **A.4 Ozono ( $\text{O}_3$ )**

El ozono a nivel del suelo no tiene fuentes de emisión directas; es enteramente un contaminante secundario que se forma a través de reacciones fotoquímicas en la atmósfera. Como se ha descrito en las secciones previas, el  $\text{NO}_x$  y las diferentes especies de HC, en presencia de la luz solar, son los precursores esenciales de la formación del ozono a nivel del suelo. La producción de ozono puede estar limitada entonces por las concentraciones de HC o bien de  $\text{NO}_x$ . La relación entre la producción de  $\text{O}_3$  y la concentración de sus precursores es no lineal y químicamente compleja. De hecho, concentraciones muy elevadas de  $\text{NO}$  cerca de las vialidades en zonas urbanas pueden inhibir la formación de  $\text{O}_3$ . La dilución y la oxidación de los  $\text{NO}_x$ , en combinación con las emisiones normales de HC, pueden provocar niveles pico de  $\text{O}_3$  viento abajo de las fuentes de emisión y de las zonas urbanas.

Los principales mecanismos de extinción del ozono son reacciones con NO o con las superficies de distintos materiales. El tiempo de vida del ozono a nivel del suelo es de menos de un día; este contaminante puede alcanzar fuertes picos de concentración durante las horas del día y luego extinguirse a niveles de cero durante la noche.

En la estratósfera, el ozono es un componente natural y proporciona una capa de protección contra la dañina radiación ultravioleta. A nivel del piso, sin embargo el ozono es un peligroso contaminante que constituye el principal componente del smog fotoquímico. Los incrementos en admisiones hospitalarias y visitas de emergencia debidas a afecciones respiratorias han sido vinculadas con altas concentraciones ambientales de ozono. La exposición de corto plazo puede agravar enfermedades respiratorias preexistentes (como el asma) y provocar dolor de pecho, tos, náuseas e inflamación pulmonar. La exposición crónica puede causar daños permanentes en los pulmones. El O<sub>3</sub> puede también dañar en forma importante los cultivos agrícolas y los bosques.

### **A.5 Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>)**

Los óxidos de azufre, emitidos principalmente como bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), se forman por la oxidación de azufre del combustible durante la combustión. Normalmente cerca del 100% del contenido de azufre en el combustible se emitirá como SO<sub>2</sub>. En el mundo industrializado, en tanto que las emisiones de SO<sub>2</sub> debidas a la quema de carbón se han reducido, las fuentes de transporte tienden a ganar una mayor proporción del total de las emisiones. En los Estados Unidos, las fuentes de transporte —principalmente equipo y maquinaria estacionaria de diesel y embarcaciones marinas— ahora representan el 10% de las emisiones de SO<sub>2</sub> (EPA 2001). A nivel mundial, sin embargo, las fuentes del sector transporte son responsables de menos del 3% de las emisiones (EDGAR 2001). En tanto que el petróleo crudo puede tener relativamente un elevado contenido de azufre, la fracción empleada en los combustibles vehiculares contiene un menor porcentaje de azufre, ya que el proceso de refinación elimina una porción significativa. Sin embargo, los combustibles de vehículos y maquinaria estacionaria y los combustibles de uso marino frecuentemente tienen un contenido de azufre mucho mayor. A lo largo de los últimos 10 años, las regulaciones en los países industrializados han comenzado a reducir los niveles permitidos de azufre en los combustibles del sector transporte.

Una fracción del SO<sub>2</sub> en la corriente de escape del diesel puede ser oxidada para formar trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>). El SO<sub>3</sub> reacciona fácilmente con el agua para formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y sulfatos en forma de partículas. En la corriente de escape del diesel, los aerosoles de sulfato son iniciadores de la formación de partículas, proporcionando un núcleo para que otros gases se condensen (Shi and Harrison 1999; Tobias et al, 2001).

El SO<sub>2</sub> también puede ser oxidado en la atmósfera para formar SO<sub>3</sub> principalmente por reacción con otros componentes de una atmósfera urbana contaminada. Algunos modelos han estimado que en los Estados Unidos más del 12% del SO<sub>2</sub> emitido en zonas urbanas se convierte en partículas de sulfatos en la atmósfera (Darlington and Kahlbaum 1999). La formación secundaria de partículas, significa que los vehículos a gasolina y a diesel en los Estados Unidos pueden ser responsables hasta por ocho veces más de las

partículas de sulfato de emisiones primarias que emiten directamente, que son las que normalmente se toman en cuenta en los inventarios de emisiones.

El bióxido de azufre es un irritante respiratorio que puede agravar las condiciones cardiopulmonares y contribuir a enfermedades respiratorias y a la dificultad para respirar. El ácido sulfúrico es la otra especie crítica en la formación de la lluvia ácida, que contribuye a un amplio daño en los ecosistemas. Los sulfatos en forma de partículas son una preocupación significativa en la salud pública así como uno de los grupos de contaminantes responsables de la disminución de la visibilidad.

## **A.6 Partículas (PM)**

El término partículas<sup>\*\*</sup> es generalmente aplicado a partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire. Las partículas incluyen cualquier cosa, desde una mezcla compleja de ácidos y hidrocarburos pesados hasta granos de polvo. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha desarrollado dos categorías para medir la concentración de las partículas en el aire  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ .

Las  $PM_{2.5}$  incluyen todas las partículas de menos de 2.5  $\mu m$  de diámetro (partículas finas, ultrafinas y nanopartículas). Estas partículas pueden formarse en la atmósfera a través de la condensación y pueden crecer en tamaño con una mayor condensación o por colisiones con otras partículas existentes. Partículas de este rango de tamaño pueden también ser emitidas como contaminantes primarios —ya sea como polvos formados por la combustión incompleta o por las partículas de ácidos que se forman en la corriente de escape. La persistencia atmosférica de las  $PM_{2.5}$  puede variar de sólo unos pocos días a varias semanas. Las nanopartículas, con un diámetro menor a los 0.05  $\mu m$ , tienen un tiempo de vida más corto, de minutos a horas, por la coagulación con otras partículas.

Las  $PM_{10}$  incluyen todas las partículas con un diámetro menor a 10 micrómetros. Las partículas gruesas son formadas principalmente por procesos mecánicos de generación, incluyendo fuentes como partículas derivadas de las llantas de los automóviles y el polvo que arrastra el viento. Debido a su sedimentación, el tiempo de vida atmosférica de una partícula relativamente grande es de menos de un día.

El transporte es una fuente importante de  $PM_{2.5}$ . En los Estados Unidos el transporte es responsable del 27% de las emisiones de  $PM_{2.5}$  causadas por actividades humanas (sin incluir el polvo fugitivo, las fuentes agrícolas y el humo de incendios forestales). Cerca de una cuarta parte de estas emisiones se deben a las emisiones de vehículos a diesel, en tanto que los motores de máquinas y vehículos estacionarios a diesel representa la otra mitad. Los inventarios de emisiones sugieren que los motores y los vehículos son las principales fuentes de partículas finas y, junto con vehículos de la industria de la construcción, también de las partículas gruesas de las zonas urbanas. En el centro de Los Ángeles se estimó que un 51–69% de las  $PM_{2.5}$  tuvieron un origen vehicular, mientras

---

<sup>\*\*</sup> En Español suele usarse el término partículas suspendidas para referirse a las partículas suspendidas totales (PST) o a las partículas suspendidas de fracciones menores a 10 o a 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) (Nota del traductor)

que en Londres se encontró que el 90% de las  $PM_{10}$  estaban relacionadas con el transporte (Kittelson 1998).

Las partículas derivadas del diesel (*Diesel particulate matter, DPM*) caen dentro del rango de las  $PM_{2.5}$  y su fuente primaria es el hollín del escape, partículas sólidas de carbón formadas durante una combustión de mezcla rica que se combinan con compuestos orgánicos volátiles y de azufre. Los vehículos a diesel funcionan con mezclas pobres pero también existen regiones de mezcla rica en el interior de las zonas de combustión, lo cual da como resultado la formación de hollín. Una pequeña proporción del combustible y de los lubricantes escapa a la oxidación y terminan como compuestos orgánicos en la corriente de escape; esto es lo que se conoce como fracción orgánica soluble, *soluble organic fraction (SOF)*. El azufre en el combustible es en su mayor parte oxidado a  $SO_2$ , aunque una pequeña proporción es oxidada a  $SO_3$ , que después se convierte en ácido sulfúrico y se condensa para formar nanopartículas de sulfato. Conforme la corriente de escape se enfría, el hollín y los sulfatos se convierten en núcleos para la condensación y la absorción de otros gases de HC. La composición de la partícula es un factor importante en los impactos potenciales a la salud de las PM, donde la SOF imparte mayor toxicidad y mutagenicidad.

A pesar de que las regulaciones de PM están actualmente basadas en la masa total de emisiones, el número total de estas partículas puede ser más importante. Las nanopartículas suelen representar del 1-20% de la masa de las emisiones vehiculares de PM, pero generalmente contribuyen con más del 90% del número de partículas. Las partículas más pequeñas son respirables y pueden depositarse profundamente en los pulmones, lo que resulta en impactos mayores a la salud que los asociados a partículas más grandes, que tienden a ser exhaladas o capturadas por los filtros y las defensas naturales del cuerpo en la cabeza o la garganta. Mientras que la masa de emisiones no controladas de PM en un vehículo diesel es de 10 a 100 veces superior a la de los vehículos a gasolina, cuando se considera el número o el tamaño de las partículas, los vehículos a gasolina también pueden ser preocupantes. En condiciones normales de manejo, los vehículos a gasolina producen menos partículas que los vehículos a diesel, pero en condiciones de crucero de alta velocidad, como en las carreteras, el número de partículas emitidas puede ser similar (Rickeard et al, 1996). En forma adicional, los nuevos motores diesel, diseñados para reducir la masa de emisiones de PM, pueden de hecho emitir un número equivalente o incluso superior de partículas pequeñas (Kittelson 1998).

Los niveles ambientales de  $PM_{2.5}$  han sido asociados con muerte prematura, bronquitis crónica, enfermedades cardiovasculares y pulmonares, y asma (Lloyd and Cackette 2001). Las partículas impactan la visibilidad, especialmente las partículas pequeñas que dispersan efectivamente la luz. Las partículas del diesel tienen fuertes propiedades de absorción, debido a su alto contenido de carbono. La capacidad de dispersión de las partículas y los aerosoles puede contribuir a un efecto de enfriamiento, moderando el cambio climático. Sin embargo investigaciones recientes sugieren que este efecto es más que cancelado por la absorción del carbono, para el cual se ha demostrado un impacto de calentamiento mucho mayor que el que se estimó previamente (Jacobson 2002). Las

partículas finas, especialmente los aerosoles de nitratos y sulfatos, también pueden causar daño a diversos materiales y deposición ácida.

### **A.7 Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Parte de la radiación solar se absorbe en la capa de ozono en la atmósfera superior, pero buena parte de ella alcanza la superficie de la tierra. La radiación solar es balanceada por la radiación de calor que la tierra emite al espacio. Las concentraciones de gases de efecto invernadero que absorben la radiación que emite la tierra se han incrementado, debido principalmente a las actividades humanas, reduciendo la eficiencia con la que la tierra emite radiación al espacio. Una mayor proporción de la radiación terrestre de calor está siendo absorbida por estos gases en la atmósfera, lo que resulta en el calentamiento de la baja atmósfera y de la superficie de la tierra. El bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y el metano ( $\text{CH}_4$ ), son componentes naturales de la atmósfera que se han incrementado significativamente a lo largo del último siglo debido a las actividades humanas. La investigación científica reciente ha determinado que también los contaminantes de vida corta como el  $\text{O}_3$  y las PM, que han sido generalmente consideradas como un problema de contaminación local, podrían también impactar poderosamente el cambio climático. La temperatura media de la superficie de la tierra se ha incrementado entre  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  ( $\sim 1^\circ\text{F}$ ) a lo largo del siglo pasado (Albritton et al, 2001).

El bióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero responsable del cambio climático. El  $\text{CO}_2$  se forma por la combustión completa en presencia de oxígeno suficiente para oxidar completamente el carbono de los combustibles. El transporte es una fuente significativa y creciente de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, representando poco más del 20% de las emisiones antropogénicas a nivel global (EDGAR 2001). En los Estados Unidos, el transporte es responsable del 30% de las emisiones, que corresponden aproximadamente al 7% de las emisiones globales de  $\text{CO}_2$ . Las emisiones de  $\text{CO}_2$  de las fuentes de transporte en los Estados Unidos y en la Unión Europea, se han incrementado un 16–18% de 1990 a 1999, considerando que los incrementos en la eficiencia energética, han sido más que cancelados por el aumento del número y peso de los vehículos, (EPA 2002b; Guegle and Ritter 2002).

El metano, con sólo la mitad del porcentaje de la concentración del  $\text{CO}_2$  pero con 62 veces más del potencial del calentamiento en el corto plazo, es considerado generalmente como el segundo en importancia entre los gases de invernadero (Albritton et al, 2001). El metano tiene una vida media en la atmósfera de 12 años y es emitido principalmente por fuentes naturales o relacionadas a la actividad agropecuaria. El transporte es una fuente relativamente menor de emisiones de metano, representando menos del 1% de las emisiones globales (EDGAR 2001). El metano es uno de los HC menos reactivos entre los emitidos por los vehículos, y no tiene un papel importante en la formación de ozono. El metano es el componente principal del gas natural, lo que naturalmente resulta en que las emisiones de metano provenientes de estos vehículos sean relativamente más elevadas que las de otras tecnologías. A pesar de ello, debido a las bajas emisiones de  $\text{CO}_2$ , el potencial de calentamiento global asociado a los vehículos de gas natural comprimido parece ser comparable al de los vehículos a diesel y un poco menor que el de los vehículos a gasolina (General Motors 2001).

Debido al mejor control de emisiones de HC, las emisiones de metano del transporte están bajando en los países industrializados, cayendo 30% en la Unión Europea y 11% en los Estados Unidos, entre 1990 y 1999 (EPA 2002b; Gugele and Ritter 2002).

Las emisiones de óxido nitroso y sus concentraciones en la atmósfera son mucho más bajas que las del CO<sub>2</sub>, pero el N<sub>2</sub>O es considerado 275 veces más potente para atrapar calor en la atmósfera dentro de un marco de tiempo de 20 años (Albritton et al, 2001). El N<sub>2</sub>O tiene un ciclo de vida atmosférico de 114 años y, como el metano, es formado principalmente por fuentes naturales y agropecuarias (Albritton et al, 2001). El transporte es responsable por cerca del 1% de las emisiones globales de N<sub>2</sub>O pero es más importante como fuente en los países industrializados, donde llega a representar el 5% de las emisiones, tal como en el caso de los Estados Unidos (EDGAR 2001). Los convertidores catalíticos que pretenden reducir el NO a N<sub>2</sub> y oxidar el CO y los HC, pueden también generar N<sub>2</sub>O, aunque el mecanismo de formación no se ha comprendido completamente. Las fuentes del sector transporte de N<sub>2</sub>O se han incrementado en los países industrializados en 105% en Europa y 17% en los Estados Unidos de 1990 a 1999 (EPA 2002b; Gugele and Ritter 2002).

El ozono a nivel del suelo (troposférico) puede también tener importantes efectos en el calentamiento global. (La pérdida de ozono estratosférico, por otra parte, tiene un efecto de enfriamiento que puede haber compensado parte del calentamiento que de otra forma hubiera ocurrido en las décadas pasadas). Las concentraciones de ozono a nivel del suelo tienen un ciclo de vida de menos de un día y responden rápidamente a los cambios en la emisión de los precursores. Las concentraciones de ozono han aumentado, incluso en ambientes no contaminados, con un incremento promedio de 35% por encima de las concentraciones de ozono en la era pre-industrial. Debido al corto tiempo de vida atmosférica del ozono a nivel del suelo, existe poca certidumbre acerca de su impacto general sobre el clima. Sin embargo basado en la magnitud estimada de su influencia en el calentamiento global, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) estableció que el ozono troposférico es el tercer gas más importante por su efecto invernadero después del CO<sub>2</sub> y del metano (Albritton et al, 2001).

Como se ha mencionado, las partículas también pueden tener un impacto en el clima, ya que se han demostrado efectos de enfriamiento y de calentamiento, dependiendo de su composición. Las partículas de negro de carbón calientan la atmósfera mediante la absorción de radiación solar, en tanto que los aerosoles de sulfato tienen un impacto de enfriamiento debido a su capacidad para provocar la dispersión de la radiación solar de regreso al espacio. Los modelos recientes han determinado un efecto mucho mayor del carbono del que se había anticipado previamente. Los nuevos estudios sugieren que el efecto de calentamiento del negro de carbón balancea el efecto de enfriamiento de otros aerosoles atmosféricos y que en el corto plazo, la magnitud del calentamiento directo por negro de carbón puede exceder el efecto de calentamiento del metano. Esto provocaría que el material constituyente del negro de carbón en las partículas sea el segundo componente de mayor importancia en el cambio climático (Jacobson 2002). Debido a su tiempo de vida atmosférico de semanas, el impacto de calentamiento del negro de carbón podría ser revertido conforme sus emisiones disminuyan.

## A.8 Resumen

El sector transporte es la mayor fuente de contaminantes convencionales como el CO, NO<sub>x</sub>, y HC. De igual forma, el transporte es la principal fuente de los precursores del ozono a nivel del suelo, especialmente en zonas urbanas; en el caso del CO<sub>2</sub>, el más importante de los gases de efecto invernadero, el transporte es una fuente significativa y de rápido crecimiento. El transporte es menos relevante como una fuente directa de emisiones de SO<sub>x</sub>, si bien la remoción del azufre de los combustibles del sector transporte será crítica en el control de las emisiones de todos los contaminantes enunciados.

La tabla A.I proporciona un resumen de los impactos locales y globales de todos estos contaminantes, incluyendo sus impactos en la salud humana, en el medio ambiente y el cambio climático global.

**Tabla A.I Resumen de los Principales Contaminantes Emitidos por Fuentes del Sector Transporte**

Contaminantes	Impactos Locales	Impactos Globales	Comentarios
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>Agrava enfermedades cardiovasculares existentes, disminuye la percepción visual y la destreza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Influencia indirecta en el calentamiento global por la competencia con el metano por la oxidación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El sector transporte puede ser responsable hasta del 95% de las emisiones de CO en áreas urbanas.</li> <li>Gas globalmente distribuido</li> </ul>
HC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de impactos a la salud incluyendo respiratorios, neurológicos y carcinogénicos</li> <li>Precursores del smog fotoquímico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entre estos compuestos se incluye el metano, un gas de potente efecto invernadero</li> <li>Influencias sobre el calentamiento indirecto a través de la formación de ozono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un rango de fuentes naturales y antropogénicas provocan que las especies de HC estén generalmente disponibles como precursores del ozono</li> </ul>
NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Irritantes Respiratorios</li> <li>Disminuye la Visibilidad</li> <li>Precursor de ácido nítrico</li> <li>Precursor del smog fotoquímico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Influencia indirecta sobre el calentamiento indirecto a través de la formación de ozono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los impactos de acidificación y de producción de ozono del NO<sub>x</sub> pueden distribuirse en amplios territorios a través del transporte a larga distancia de especies persistentes</li> </ul>
O <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Constituyente primario del smog fotoquímico</li> <li>Impactos respiratorios severos</li> <li>Daños en los materiales y en los cultivos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impactos sobre el calentamiento global debido al incremento de las concentraciones de fondo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El O<sub>3</sub> no tiene fuentes directas de emisión —para su formación se requieren NO<sub>x</sub>, HC, y luz solar</li> </ul>
SO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Irritante respiratorio</li> <li>Disminución de la visibilidad</li> <li>Precursor de ácidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los sulfatos tienen un efecto de enfriamiento debido a la dispersión de la luz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El SO<sub>2</sub> tiene un prolongado ciclo de vida atmosférico que favorece una amplia distribución de impactos por acidificación</li> </ul>

PM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impactos cardiovasculares y respiratorios</li> <li>• Disminución de la visibilidad</li> <li>• Incluye especies ácidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las partículas pueden favorecer el calentamiento o enfriamiento atmosférico, dependiendo del contenido de carbón y de las capacidades de difracción de la luz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El tiempo de vida atmosférica varía en función del tamaño de la partícula</li> </ul>
GEI		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provocan el calentamiento global por su acumulación atmosférica de largo plazo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sector transporte es una fuente principal de CO<sub>2</sub> pero menos importante para el metano y el N<sub>2</sub>O</li> </ul>

## APÉNDICE B – TECNOLOGÍAS PARA REDUCIR EL AZUFRE EN LOS COMBUSTIBLES

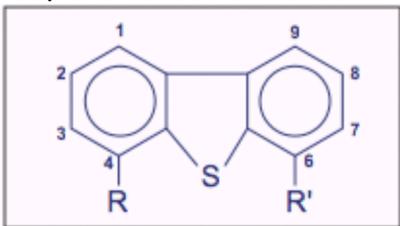
El petróleo crudo tiene un contenido promedio de azufre que va de 100 a 33,000 ppm, y los niveles de azufre dentro de una fuente de abastecimiento de petróleo crudo pueden variar mucho en función de la densidad. Las refinерías están generalmente construidas para procesar tanto el

petróleo “dulce” de sobreprecio, con bajo contenido de azufre, como el petróleo “amargo” con alto contenido de azufre. Los tipos de compuestos de azufre dentro del petróleo crudo también varían mucho, según se les clasifique por la facilidad de removerlos. Debido a que la remoción de azufre se facilita cuando los átomos de azufre son accesibles, el azufre unido a cadenas lineales o de anillo simple de hidrocarburos es más viable de remover. Cuando el azufre está unido con hidrocarburos aromáticos, especialmente con grupos adicionales unidos en cualquiera de los lados, el contorno físico del compuesto representa un obstáculo para el contacto entre el átomo de azufre y el catalizador. El azufre en este tipo de compuestos (figura B.1) es mucho más difícil de remover.

Cuando el petróleo crudo entra a la refinерía, es fraccionado de acuerdo con los diferentes rangos de ebullición. Una parte mayor de la gasolina y del diesel son producidos a través de la separación directa (“straight run”) de la fracción del petróleo crudo que cae naturalmente dentro de los rangos apropiados de ebullición para estos combustibles. La fracción líquida más ligera, las naftas, se usa para la producción de gasolina. La siguiente fracción, los destilados, están dentro del rango apropiado para el

diesel y la turbosina, y puede utilizarse también para la producción de combustibles de sistemas de calefacción como el keroseno. Las porciones más pesadas del crudo son craqueadas (divididas) en compuestos más pequeños y ligeros para así producir más gasolina y diesel. Conforme aumenta la densidad de la fracción del crudo, los compuestos de azufre tienden a ser más comunes y aumenta la dificultad para removerlos.

Figura B.1  
Compuesto Esterico con Azufre Obstaculizado



La unidad de cracking de fluido catalítico (fluid catalytic cracking, FCC) es la fase de procesamiento responsable de introducir la mayor parte del azufre a la gasolina y una amplia proporción de los compuestos de azufre obstaculizado al diesel (EPA 2000b). Estas porciones craqueadas de los combustibles contribuyen con el 30-50% de la producción de la gasolina en la mayoría de las refinерías pero son responsables de más del 90% del contenido de azufre (EPA 1999). Cerca del 60% del diesel en los Estados

Tabla B.1

Rangos de Contenido de Azufre en Petróleo Crudo (IPCC 2000)

Región	Valores Promedio de Contenido de Azufre (% peso)	Alto (ppm)	Bajo (ppm)
Medio Oriente	0.8–2.3	33,000	1,000
África	0.1–0.3	21,000	1,000
Asia	0.1–0.2	10,000	200
Ex-Unión Soviética	0.2–1.2	12,000	100
Europa	0.28–0.5	13,000	1,400
Norteamérica	0.2–1.1	11,000	2,000
Latinoamérica	0.8–2.5	33,000	5,000

Unidos proviene de los destilados directos, que tienen un contenido de azufre más elevado que la gasolina producida de las naftas. Pero buena parte del diesel proviene de la unidad de cracking catalítico (FCC). Dependiendo del rendimiento deseado del producto, algunas de las fracciones de los destilados pueden ser también craqueadas para producir más gasolina. Una porción variable del diesel y de la gasolina – dependiendo de la calidad del crudo, la capacidad de refinación y el rendimiento deseado del producto– provienen de otras unidades de refinación catalítica. Estas unidades —incluyendo las unidades de conversión del coque y la unidad de hidrocracking— convierten las porciones pesadas del crudo en combustibles líquidos más ligeros.

Este apéndice revisa el rango de tecnologías de refinación que pueden usarse para reducir los niveles de azufre en los combustibles. La capacidad de las refinerías para reducir los niveles de azufre de los productos depende de varios factores: el nivel de azufre deseado en los combustibles producidos, la configuración de la refinería y la disponibilidad de equipo adicional de desulfuración, la calidad del petróleo crudo y la calidad y los tipos de productos que se están produciendo. Nuevos catalizadores para la remoción del azufre y nuevos procesos de refinación están siendo desarrollados de tal forma que incrementan valor al producto, mientras que también reducen los costos de capital y de operación. Al mismo tiempo, varios ejemplos alrededor del mundo demuestran que los combustibles de bajo azufre pueden obtenerse, y han sido producidos desde hace varios años con la tecnología actual.

## **B.1 Propiedades de los Combustibles Afectados por la Desulfuración**

Existen varias propiedades de los combustibles, aparte del contenido de azufre, que deben considerarse cuando se buscan soluciones para la desulfuración de los combustibles. Sorprendentemente, el mismo proceso para remover azufre tiene un efecto contrario en la calidad de la gasolina y el diesel. La hidrogenación, que es la adición de hidrógeno para impulsar la remoción del azufre, reduce los enlaces dobles del carbón a enlaces sencillos. En la gasolina la hidrogenación resulta en menores niveles de octanaje y rebaja la calidad del combustible. En el diesel, lleva a un número de cetano más alto y por tanto incrementa la calidad del combustible.

### **Octanaje**

El número de octano u octanaje es una medida de la capacidad de la gasolina para resistir la auto-ignición. El número o índice de octano es una propiedad innata del combustible, que puede ser mejorada a través de aditivos o de procesos de refinación. Los motores están afinados para ciertos valores de octano y menores niveles causarían que el motor se estanque, lo que puede provocar severos daños al motor. El octanaje está relacionado con el contenido de olefinas, que tienen compuestos con dobles enlaces de carbono dentro de la mezcla. La pérdida de octanaje puede ser recuperada a través de procesos intensivos en energía y las refinerías están desarrollando nuevos procesos de catálisis para reducir la pérdida de octanaje asociada con la desulfuración.

### **Cetano**

El número de cetano es una medida del comportamiento de la presión de ignición del diesel. Un número elevado de número de cetano incrementará la capacidad del vehículo

para arrancar en climas fríos y favorece menores emisiones de HC y CO, así como ahorros en el consumo del combustible. La hidrogenación es la forma más efectiva para reducir el contenido de azufre en el diesel y al mismo tiempo mejorar la calidad del combustible. Sin embargo, también resulta costoso y altamente intensivo en energía. Las refinerías han comenzado a desarrollar procesos menos intensivos en energía para la desulfuración del diesel.

### **Lubricidad**

Una consideración final sobre el impacto de la desulfuración en la calidad del combustible es la reducción de la lubricidad del diesel. Las bombas de diesel, los sistemas de inyección y otros componentes del motor dependen de las propiedades de lubricidad del combustible para protegerse contra fallas y desgaste. Los procesos de refinación que reducen el contenido de azufre pueden también reducir las propiedades de lubricidad del combustible, a pesar de que ninguna propiedad en particular del combustible parece ser un predictor de la lubricidad. Los aditivos de lubricidad han sido efectivos para aumentar la lubricidad a niveles aceptables pero deben ser escogidos cuidadosamente para evitar problemas serios de mantenimiento. El biodiesel, que tiene un contenido natural de cero azufre, puede también incrementar la lubricidad. En pruebas hechas por un productor de biodiesel, una mezcla de 2% de biodiesel fue suficiente para alcanzar un nivel de lubricidad aceptable en el diesel refinado (EPA 2000b). Se espera que las refinerías mezclen aditivos de lubricidad lote a lote cuando existan problemas de lubricidad; lo cual parece no tener ningún impacto sobre las emisiones a nivel del escape.

### **B.2 Hidrodesulfuración de Naftas**

La mayor parte del azufre en la gasolina deriva de las naftas producidas en la unidad de cracking catalítico (FCC). La porción más ligera de las naftas tiende a contener especies de azufre que son más fácilmente removidas y una mayor proporción de olefinas. La porción más pesada de esta corriente de fluidos contiene compuestos de azufre que son más difíciles de remover y que típicamente se tratan bajo hidrotratamiento convencional. En la unidad de lecho fijo de hidrotratamiento, la mezcla de gasolinas es calentada, presurizada y combinada con hidrógeno. El azufre se combina con el hidrógeno sobre el lecho del catalizador, formando sulfuro de hidrógeno, que después puede ser condensado y convertido en azufre elemental en una unidad separada. Adicionalmente, parte del hidrógeno reacciona con olefinas, resultando en una pérdida de octanaje y en un mayor consumo de hidrógeno.

Para reducir la pérdida de octanaje, las refinerías pueden elegir separar las corrientes de fluidos a través de la destilación de una fracción ligera, de alto octanaje que después será tratada catalíticamente, y otra fracción pesada con la mayor proporción de azufre, para hidrotratamiento. De cualquier manera muchos de los procesos y de los catalizadores recientemente desarrollados han reducido la pérdida de octanaje asociada con el hidrotratamiento para la reducción del azufre. Los nuevos catalizadores están diseñados para prevenir la saturación de olefinas o para provocar otras reacciones que mejoren el octanaje si ocurre esta saturación. Muchos de estos procesos también operan en condiciones menos severas que las de las unidades de hidrotratamiento convencionales. Con estas condiciones menos severas se preserva el rendimiento de gasolina y también

bajan los costos de capital y de operación así como las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los costos típicos para una nueva unidad de hidrotratamiento nueva para producción de gasolina de bajo azufre están en el rango de 20 a 40 millones de dólares, para una refinería de mediana a grande (EPA 1999)

Varias compañías han desarrollado mejoras para el proceso convencional de hidrotratamiento permitiendo que las refinerías preserven los niveles de octanaje, operen a presiones y temperaturas bajas y alcancen niveles de bajo azufre con el retrofit de un reactor existente en lugar de la construcción de una nueva unidad.

- El proceso *Mobil Oil's Octgain 125* permite la saturación de hidrógeno pero luego recupera el octanaje perdido a través de un proceso conocido como isomerización y alquilación. Condiciones severas se requieren para la recuperación del número de octano, lo que resulta en una pérdida de rendimiento que puede ser significativa. El proceso de la compañía Mobil más reciente, *Octgain 220*, impide la saturación de hidrógeno y recupera el octanaje perdido a través de isomerización. Este proceso generalmente resulta en menores pérdidas de rendimiento, pero para una desulfuración profunda tanto el rendimiento como la pérdida de octanaje pueden ser peores que con el proceso 125 (EPA 1999).
- El proceso *Scanfining I* de la compañía Exxon impide la saturación de hidrógeno. Mientras que este proceso resulta en una pérdida de rendimiento muy pequeña, la pérdida de octanaje a altos niveles de desulfuración puede ser significativa. Para insumos con alto contenido de azufre, la pérdida de octanaje puede resultar severa cuando se alcanzan niveles de ultra bajo azufre. El proceso de *Scanfining II* es un desarrollo más reciente de la Exxon que mantiene los niveles de octanaje, incluso con una profunda desulfuración y altos contenidos de azufre en insumos. El *Exomer*, un nuevo desarrollo adicional para mantener los niveles de octanaje, previene las reacciones de recombinación entre el sulfuro de hidrógeno y las olefinas. Para producir un producto de 10 ppm de azufre proveniente de un insumo con 1,000 ppm de azufre, el proceso *Scanfining I* con el uso combinado de *Exomer* resulta en una pérdida de octanaje de menos de uno, al contrario de la pérdida de octanaje mayor de cuatro sin el uso de *Exomer* (Stuntz and Plantenga 2002).
- Un reciente desarrollo de CDTECH utiliza la destilación catalítica, con ambos procesos de remoción catalítica del azufre y destilación ocurriendo en el mismo reactor. Este proceso permite tratar toda o una porción de la gasolina, sin necesidad de una columna de destilación adicional. El proceso incluye dos columnas de destilación cargadas con catalizador de desulfuración, una que trata los compuestos ligeros y la otra que trata la fracción pesada.

Toda la nafta de la unidad de cracking catalítico (FCC) es alimentada en la primer columna y los compuestos ligeros se elevan con hidrógeno, que es inyectado en la base de la columna, a través del catalizador. Los compuestos de azufre experimentan reacciones para formar compuestos más pesados, que se acumulan en el fondo y son alimentados a la siguiente columna con el resto de la fracción pesada. Dado que la presión y la temperatura en la primer columna son mucho más bajas que en los hidrotratamientos convencionales, hay muy poca saturación

de olefinas y bajo consumo de hidrógeno. El octanaje puede también obtenerse a través del uso de un catalizador de isomerización, que puede compensar la pérdida de octanaje en la otra columna. En la segunda columna, los compuestos pesados se hunden otra vez y los ligeros fluyen hacia arriba con hidrógeno inyectado en la base de la columna para reaccionar con los compuestos de azufre más difíciles de remover. A través del proceso, la presión y la temperatura son menores que en el hidrotreamiento convencional. Las presiones y las temperaturas son especialmente bajas en la primera columna y en la parte superior de la segunda, donde se encuentran la mayor parte de las olefinas, lo que da como resultado una mínima pérdida de octanaje (EPA 1999).

Estos nuevos catalizadores y procesos disminuyen los costos de capital y de operación, reducen la pérdida de octanaje para poder obtener un producto de mayor valor y producen menores emisiones de gases de efecto invernadero. En la siguiente sección se describe un nuevo desarrollo en la tecnología de desulfuración de la gasolina, que representa un enfoque completamente diferente a los procesos de hidrotreamiento convencionales.

### **B.3 Adsorción de Azufre**

Esta es una tecnología de reciente comercialización que ofrece una solución de menor costo para una remoción más efectiva del azufre en la gasolina. Las pruebas de laboratorio han mostrado también que esta tecnología podría ser apropiada para la desulfuración del diesel.

En lugar de añadir hidrógeno, este proceso usa procesos químicos de adsorción para remover el azufre del combustible. Estos procesos de adsorción operan a una temperatura y presión mucho más baja que la hidrogenación y por tanto requieren menores consumos de energía. Esto reduce los costos de operación y tiene el potencial de bajar también los costos de capital.

El reporte Phillips muestra que su tecnología *S Zorb* puede reducir el contenido de azufre en la gasolina a menos de 10 ppm con mínimas pérdidas de octanaje, mínimo consumo de hidrógeno y pérdidas de volumen cercanas a cero. El adsorbente remueve selectivamente el azufre de las moléculas de hidrocarburo, trabajando alternativamente en el reactor y el regenerador para un uso continuo. El adsorbente opera en el lecho fluidizado del reactor y, bajo ciertas condiciones, las unidades de hidrotreamiento pueden convertirse en unidades de adsorción. El tiempo de las corridas de la unidad *S Zorb* está acoplado a la unidad de cracking catalítico (FCC) a fin de mantener los ciclos de producción continua de la refinería.

El adsorbente remueve el azufre y lo acumula, manteniendo la porción de hidrocarburos sin sulfuro de hidrógeno detectable en la corriente de producción. El adsorbente es reciclado entre el reactor y el regenerador para proveer un abastecimiento continuo regenerado y activar la remoción del azufre. El adsorbente es regenerado en una atmósfera oxidante, produciendo  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$ . El azufre puede ser separado de la corriente de gas en una variedad de maneras, dependiendo de la configuración del reactor.

La pérdida de octanaje con la tecnología *S Zorb* depende de la reducción de azufre que desea alcanzarse así como del nivel de azufre en los fluidos de abastecimiento. Se requieren condiciones de operación más severas para bajar mayormente los límites del azufre, y causarán en consecuencia una mayor pérdida de octanaje. La producción de combustible con menos de 10 ppm de azufre con abastecimiento de 220 ppm resulta en una pérdida de aproximadamente 0.2 octanos; y con un abastecimiento de 1,435 ppm de azufre, la pérdida de octanaje se incrementa a aproximadamente 1.2. (Greenwood et al, 2002)

La compañía Phillips estima que los menores requerimientos de hidrógeno de este proceso pueden disminuir los gastos de operación por hasta 2 millones de dólares por año en una unidad de 35,000 barriles por día. Los costos de capital se estiman en 800 a 900 dólares por barril de capacidad (\$28 a \$32 millones de dólares para una planta de 35,000 barriles por día), con gastos de operación de 0.9¢ a 1.2¢ por galón (Greenwood et al, 2002).

Una planta piloto está actualmente demostrando el uso de este proceso de desulfuración para mezclas de diesel. Y la compañía Phillips ha reportado que el catalizador por adsorción realiza una mejor desulfuración de los compuestos de azufre obstaculizado que de los compuestos de azufre en la gasolina. La principal diferencia operativa es un incremento moderado en la presión del reactor comparada con la aplicación en gasolina, que es aún relativamente baja comparada con la destilación por hidrotratamiento. El resultado de consumo de cero hidrógeno resulta en un cambio despreciable en las propiedades del diesel (aparte de la remoción del azufre) y puede resultar en ahorros significativos de costos de operación.

#### **B.4 Hidrotratamiento de Destilados Medios**

En tanto que las refinerías no enfrentan la preocupación de mantener los niveles de octanaje para el diesel, la producción de diesel de bajo azufre tiene sus propios retos. A diferencia de la gasolina, todas las fracciones del petróleo crudo son usadas para producir diesel, incluyendo los destilados directos que tienden a tener elevados niveles de azufre. Esto significa que debe ser procesada una cantidad mayor de los fluidos de abastecimiento de lo que se requiere para la producción de gasolina. La desulfuración catalítica convencional del diesel puede remover la mayoría de los compuestos de azufre pero la remoción de los compuestos de azufre estéricamente obstaculizados requeridos en la producción de diesel de bajo azufre, disminuyen significativamente la velocidad del proceso. Usando técnicas convencionales de desulfuración, la remoción de los compuestos con azufre obstaculizado puede ser 30 veces más lenta que la remoción de las moléculas similares con azufre no obstaculizado (EPA 2000b).

Mientras que la producción de diesel de bajo azufre puede realizarse con tecnología convencional de refinación, el reto es hacer el proceso costo-efectivo. Para hacer esto el tiempo de corrida debe ser acelerado sin que se requieran incrementos significativos en los volúmenes de los reactores o en el consumo de hidrógeno. En algunas partes, las refinerías han hecho una inversión de capital para alcanzar niveles de azufre de 350 a 500 ppm. Sin desarrollos adicionales de procesos o tecnologías de catálisis, se requería incrementar cuatro veces el volumen del reactor para poder aumentar la desulfuración

de 500 a 10 ppm (Stuntz and Plantenga 2002). Desarrollos recientes en tecnologías de hidrotratamiento con lecho fijo han demostrado reducir el tiempo de reacción, y por tanto disminuir el volumen del reactor necesario para la producción de diesel de bajo azufre

El desarrollo de catalizadores nuevos podría disminuir la necesidad de volúmenes mayores de reactores en algunas refinerías. Mucho del mejoramiento de la tecnología de catálisis en años recientes es el resultado de una mejor dispersión de los metales activos en el sustrato y del incremento en la actividad de los sitios de reacción. Nuevos catalizadores de las empresas Akzo Nobel, Haldor-Topsoe y Criterion Catalyst incrementan la actividad respecto de previas generaciones de catalizadores desde 25% hasta más de 80% (EPA 2000b). Las compañías creadoras de los nuevos catalizadores NEBULA, ExxonMobile y Akzo Nobel, muestran un incremento de un factor de dos en la actividad del catalizador a presiones moderadas. Este catalizador no ha sido aún utilizado en forma amplia, y es actualmente significativamente más caro que los catalizadores convencionales (Stuntz and Plantenga 2002).

Muchos cambios adicionales pueden mejorar la remoción de azufre de los actuales destiladores de hidrotratamiento.

- Una reducción de 3–6% en las concentraciones de sulfuro de hidrógeno por el lavado químico del hidrógeno reciclado puede reducir los niveles finales de azufre en 60%.
- Un distribuidor mejorado vapor-líquido puede incrementar el contacto entre hidrógeno y los fluidos de abastecimiento lo cual reduce el nivel final de azufre en 50%.
- El incremento de la pureza del hidrógeno, que es preferible al incremento de la presión parcial de hidrógeno la cual es intensiva en energía, puede generar un aumento en la remoción de azufre de aproximadamente 40%.
- El incremento de la temperatura de reacción puede también conducir a la reducción de azufre deseada, pero reduciría significativamente el tiempo de vida de los catalizadores. (EPA 2000b).
- Cambios más extensivos incluyen aumentar el volumen del reactor e instalar reactores adicionales. Un reactor adicional podría ser usado como una segunda fase de alta presión con la inclusión de un lavador de sulfuro de hidrógeno entre el primero y el segundo reactor. Una única fase de tecnología de hidrotratamiento en desarrollo en China ha mostrado que se pueden lograr los niveles de ultra bajo azufre con altos rendimientos y moderadas presiones a través del uso de un segundo reactor en serie (Xiao-dong et al, 2002).

Los beneficios de estos cambios no se adicionan necesariamente y podrían no ser suficientes para alcanzar niveles de azufre de 50 o 10 ppm en refinerías existentes, dependiendo de los aspectos únicos de los fluidos de abastecimiento, el diseño del reactor y las condiciones de operación.

Las refinerías pueden escoger entre mejorar una unidad de hidrotratamiento existente o construir una nueva unidad de tecnología “casera”. Una adaptación es menos intensiva en capital, con un costo del orden de 40 millones de dólares por unidad en comparación a los 80 millones para una nueva unidad de hidrotratamiento. Las mejoras podrían, sin embargo, ser menos flexibles respecto de las propiedades de la corriente de abastecimiento y del producto final. La decisión esta basada en la edad del reactor existente, la calidad de los fluidos de abastecimiento y de las propiedades deseadas del producto final. Varias refinerías que han decidido instalar un nuevo sistema lo han hecho así porque prefieren usar la vieja unidad de tratamiento en alguna otra parte de la refinería o porque prefieren expandir la capacidad de producción de diesel. Varias estimaciones de costos realizadas en relación con las nuevas regulaciones en Europa y los Estados Unidos han pronosticado que cerca de la mitad de las refinerías instalarán sistemas “caseros” de hidrotratamiento para la producción de diesel. De cualquier manera, las predicciones más recientes de la Agencia de Protección Ambiental, basadas en las normas para vehículos pesados a diesel, predicen que sólo 10–30% de las refinerías preferirán instalar sistemas “caseros” en lugar de mejorar las unidades existentes(EPA 2000b).

### B.5 Hidrocracking

Se trata de un proceso flexible para convertir las fracciones pesadas del crudo en destilados medios para la producción de diesel. Es particularmente importante con el uso de petróleo crudo, en el que dominan las fracciones de azufre pesado. En el pasado se ha utilizado un hidrocracking suave para preparar las corrientes de alimentación de la unidad de cracking catalítico (FCC), pero también puede ser utilizado para reducir el contenido de azufre de los productos o para producir un mayor rendimiento en la producción de diesel, ofreciendo además una mayor flexibilidad en la relación de producción gasolina/diesel

**Tabla B.2 Comparación de los Requerimientos de Proceso de las Tecnologías de Desulfuración del Diesel**

Tecnología de Desulfuración	Hidrocracking (Cooper 2000)		Adsorción (Greenwood 2000)	Hidrocracking (Belato 2002)
	<i>Revamp</i>	<i>Grassroots</i>		
Presión	32 bar	54 bar	34 bar	~ 180 bar
Consumo de Hidrógeno	.91	1.8	.99	~ 3.5
Temperatura	300–400°C	300–400°C	370–420°C	~ 410°C
Volumen Relativo del Reactor	3.4	1.6	2	1

Nuevos desarrollos en catalizadores de hidrocracking y en el diseño de procesos han mejorado el rendimiento de productos, y la selectividad y la amplitud de los ciclos. Como puede observarse en la tabla B.2, en las tecnologías de hidrocracking se requieren una mayor presión y un mayor consumo de hidrógeno, comparadas con la adsorción o el hidrotratamiento, pero el volumen de reactor requerido es menor (Belato, Lima, and Oddone 2002). En condiciones de operación menos severas, todos los productos tienen menor contenido de azufre —menos de 50 ppm- y el diesel de alta calidad es producido con un número de cetano elevado.

## **B.6 Hidrotratamiento previo al Cracking**

Dado que una larga proporción del azufre en el diesel y la gasolina es aportada por las mezclas provenientes de la unidad de cracking catalítico (FCC), una forma de remover el azufre es tratar la corriente de alimentación de estas unidades, con lo que se logra reducir los niveles de azufre en la gasolina y el diesel al mismo tiempo. Este proceso, diseñado para operar a presiones y temperaturas elevadas, también remueve el nitrógeno y ciertos metales en las corrientes de abastecimiento que afectan adversamente al catalizador en la unidad de cracking catalítico (FCC). A pesar de que esta unidad no permitirá por sí sola la producción de gasolina y diesel de ultra bajo azufre, puede permitir el uso de crudos de menor calidad, que de otra forma se alimentarían a la unidad de cracking catalítico (FCC) disminuyendo su rendimiento, a la vez que se logran alcanzar productos de mayor calidad al mismo tiempo. Sin embargo, los gastos de capital y operación son frecuentemente prohibitivos. Para una refinería de mediana a larga escala los costos de capital de instalación pueden exceder los 100 millones de dólares (EPA 1999). Y dadas las altas temperaturas y presiones requeridas, combinadas con grandes volúmenes de abastecimiento para ser tratados, los costos de este equipamiento son relativamente caros, comparados con otras formas de remoción del azufre.

## **B.7 Nuevas Tecnologías de Desulfuración**

Un par de nuevas tecnologías, que no están comercialmente probadas hasta este punto, usan procesos de remoción de azufre que son muy diferentes de la tecnología convencional de refinación.

### **Biodesulfuración**

El proceso involucra el uso de bacterias para remover los hidrocarburos que contienen azufre de las naftas y las corrientes de destilados. El flujo de abastecimiento de naftas y destilados se combina con una mezcla de bacterias de base agua, sosa cáustica y nutrientes bacterianos. Las enzimas de las bacterias oxidan los átomos de azufre y rompen algunos de los enlaces azufre-carbono para producir un producto sulfuroso que después puede ser utilizado como materia prima comercial para la industria del jabón. Los investigadores pretenden lograr que la biodesulfuración pueda ser usada en combinación con las unidades convencionales de desulfuración de las refinerías (EPA 2000b). Si bien el proceso ha sido probado en el laboratorio, faltan aún por desarrollarse los diseños de ingeniería y la estimación de costos correspondientes (EIA 2001).

### **Oxidación Química y Extracción**

Este proceso de refinación involucra la formación de una emulsión de agua con diesel. El azufre se oxida utilizando ácido catalizado. El azufre oxidado puede ser separado de los hidrocarburos base y separado o puede ser movilizado en la fase acuosa, para formar una materia prima comercial similar a la de la biodesulfuración (EPA 2000b). Este proceso trata preferentemente los compuestos de azufre más difíciles de remover pero no trabaja apropiadamente en los destilados directos. La construcción de una planta piloto está planeada con costos de capital estimados en 1,000 dólares por barril de

capacidad instalada diaria, lo cual es menos de la mitad del costo de una unidad de hidrotratamiento de alta presión (EIA 2001).

## B.8 Resumen

La siguiente tabla proporciona un resumen de las tecnologías de desulfuración disponibles para producir diesel y gasolina de ultra bajo azufre. Los costos de capital varían de acuerdo con el volumen de reactor y por tanto tienden a ser más altos para la refinación de diesel. Los costos de operación varían de acuerdo a las condiciones de operación, incluyendo la presión, la temperatura y el consumo de hidrógeno.

**Tabla B.3 Resumen de Procesos de Desulfuración para Gasolina y Diesel**

Proceso	Comentarios	Condiciones de Operación	Propiedades del Producto (10 ppm)	Costo
Hidrotratamiento previo al cracking	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrogenación de fluidos de abastecimiento a la unidad de cracking (FCC)</li> <li>• Reduce niveles de gasolina y azufre al mismo tiempo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas temperaturas y presiones requeridas</li> <li>• Volúmenes elevados de reactor requeridos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los productos requieren mayor desulfuración para alcanzar niveles de bajo azufre</li> <li>• Reduce nitrógeno y metales que interfieren con la unidad de cracking (FCC)</li> </ul>	\$100 millones de costo de capital y altos costos de operación
<b>Gasolina</b>				
Hidrotratamiento de Naftas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrogenación de naftas de la unidad de cracking catalítico (FCC)</li> <li>• Nuevos catalizadores y procesos están reduciendo condiciones de severidad y pérdida de octanaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión: 50–56 bar</li> <li>• Temp: 320–350°C</li> <li>• Consumo de hidrógeno</li> </ul>	Pérdida de octanaje: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rangos dependientes de procesos y calidad de naftas</li> <li>• 1 a 1,000 ppm (<i>Exxon's Scafining I with Exomer</i>)</li> </ul>	\$20–40 millones de costos de capital y moderados costos de operación
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de un sorbente en lecho fluidizado de reactor</li> <li>• Tecnologías comercialmente disponibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión: 6–21 bar</li> <li>• Temp: 370–420°C</li> <li>• Bajo consumo de hidrógeno</li> </ul>	Pérdida de Octanaje: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.2 a 1,435 ppm</li> <li>• 1.0 a 675 ppm</li> <li>• 0.1 a 220 ppm</li> </ul>	\$15–30 millones de costo de capital y bajos costos de operación
<b>Diesel</b>				
Hidrotratamiento de destilados medios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrogenación de destilados medios de la unidad de cracking catalítico (FCC)</li> <li>• Nuevos catalizadores y procesos están reduciendo el volumen requerido y el consumo de hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión: 32–54 bar</li> <li>• Temp: 300–400°C</li> <li>• Alto consumo de hidrógeno</li> <li>• Volúmenes de reactor de moderados a altos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento del número de cetano de 4 a 7</li> </ul>	\$40–80 millones de costo de capital y costos de operación de elevados a moderados
Adsorción	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de adsorbente en reactor de lecho fluidizado, similar al de la desulfuración de la gasolina pero a temperaturas y presiones mayores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión: 34 bar</li> <li>• Temp: 370–420°C</li> <li>• No hay consumo de hidrógeno neto</li> <li>• Requerimientos Moderados de Volumen de Reactor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin cambios en el número de cetano del producto</li> </ul>	Costos de capital desconocidos y costos de operación bajos a moderados

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todavía en fase piloto</li> </ul>			
Hydrocracking	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una alternativa de unidad de cracking catalítico, el proceso desdobra fracciones pesadas del crudo y remueve azufre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión: 90–180 bar</li> <li>• Temp: 320–410°C</li> <li>• Alto consumo de hidrógeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eleva el número de cetano</li> </ul>	Costos de capital desconocidos y costos de operación elevados
Nuevas Tecnologías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La Biodesulfuración usa enzimas bacterianas para la extracción del azufre</li> <li>• La Oxidación Química de azufre con un ácido catalizado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los procesos están aún en fase de prueba en laboratorio o a nivel piloto por lo que las condiciones de operación son desconocidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesos adicionales de refinería serían requeridos en cada tecnología para alcanzar los niveles deseados de azufre</li> </ul>	Costos Estimados de Capital de 35 millones

## APÉNDICE C – EL IMPACTO DE LA DESULFURACIÓN SOBRE LAS EMISIONES DE GASES DE INVERNADERO

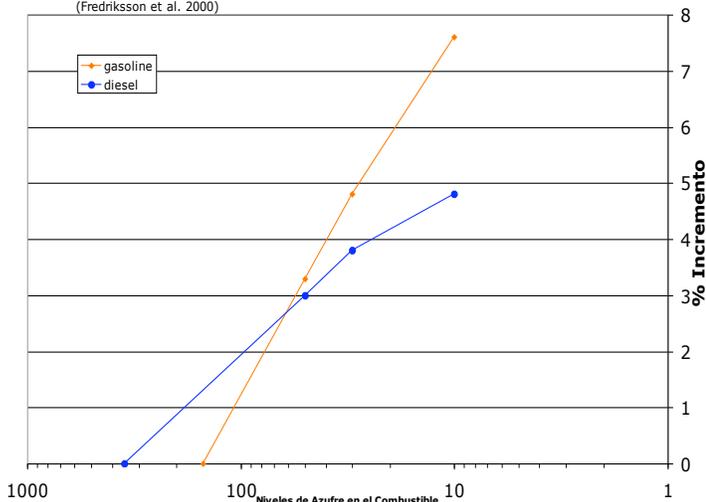
En tanto que la desulfuración causará algún incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero en las refinerías, este incremento es despreciable frente al potencial de reducción de emisiones de las tecnologías para nuevos vehículos permitidas por los combustibles de bajo azufre.

### C.1 Efectos Directos en la Refinación

La producción de combustibles de bajo azufre es generalmente más intensiva en energía requiriendo temperaturas y presiones más elevadas, así como también un mayor consumo de hidrógeno. Y dado que los hidrocarburos son usados para producir hidrógeno, el proceso es muy intensivo en emisiones de CO<sub>2</sub> creando de 8 a 15 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de hidrógeno utilizada (Martino and Van Wechem 2002). Aún así, estos incrementos son claramente superados, por el potencial de reducción de gases de efecto invernadero de las tecnologías para vehículos nuevos.

Un reporte preparado por Concawe, la Asociación Europea de la industria del petróleo, en respuesta a una directiva de la Comisión Europea para reducir los niveles de azufre en combustibles a 10 ppm, ofrece un análisis del impacto sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de esta reducción. Concawe encontró que la reducción de azufre en la gasolina de 150 ppm a 50 ppm podría resultar en un incremento aproximado de 3.3% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de refinación. Para el diesel una reducción de 350 a 50 ppm de azufre resultó

Figura C.1  
Incremento en las Emisiones de CO<sub>2</sub> de Refinerías  
(Fredriksson et al. 2000)



en un incremento de aproximadamente 3% de las emisiones de refinación. Para llegar a niveles de azufres más bajos, el reporte sugiere que las emisiones se incrementarían substancialmente para gasolina y en menor grado para diesel. Para una reducción de 50 a 10 ppm, las emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementarían adicionalmente en 4.3% para la refinación de gasolina y un 1.8% para el diesel (ver figura C.1). El reporte sugiere que el impacto total en las emisiones de refinación para la producción de gasolina y diesel con 10 ppm de azufre serían mayores que la suma aritmética, con un incremento de 12.9% en las emisiones de CO<sub>2</sub> para alcanzar un contenido de azufre de 10 ppm en el diesel y la gasolina (Fredriksson et al, 2000).

Mientras que estos incrementos de las emisiones de refinación son significativos — particularmente para las industrias que están tratando de demostrar su compromiso con la reducción de emisiones— la producción de petróleo y su refinación, transmisión y almacenamiento, totalizan menos del 1% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Por otra

parte, el uso de estos combustibles en los vehículos, es la fuente del 14% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. El potencial total del incremento estimado en las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria europea de la refinación, se traduciría en menos de medio punto porcentual del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> por fuentes vehiculares en Europa (Directorate-General Environment 2001; EDGAR 2001). En forma adicional, los incrementos de las emisiones de CO<sub>2</sub> reportados pueden ser elevados, considerando las eficiencias de los nuevos catalizadores y las posibilidades de que las técnicas de refinación por adsorción reduzcan los insumos energéticos y de hidrógeno para la desulfuración de la gasolina y el diesel.

Una reducción de 20–45% en el uso del combustible es posible de lograrse con diseños avanzados de motor, que funcionan con combustibles de bajo azufre. Esto se traduce en un potencial de reducción de emisiones de 700–1,700 Mt de CO<sub>2</sub> por año, que equivale al 3–7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales derivadas de combustibles fósiles (EDGAR 2001). La Comisión Europea ha realizado estimaciones más conservadoras de los beneficios en el rendimiento energético. Ellos asumieron que, inicialmente, aproximadamente 20% de los automóviles nuevos obtendrían beneficios de rendimiento energético de 2–3%, con el uso de combustibles de bajo azufre, incrementando el volumen de automóviles beneficiados a 90% en un período de tres años. Diversos escenarios para la entrada paulatina de los combustibles con 10 ppm de azufre fueron considerados, desde la penetración al 100% del mercado en el 2007 hasta un esquema que balancea la entrada de combustibles de ultra bajo azufre y el número de vehículos nuevos en circulación. El estudio encontró un beneficio neto, en el rango de 53.3 Mt CO<sub>2</sub> a 74.6 Mt CO<sub>2</sub> en un período de 12 años (lo que equivale al 0.6–0.8% de las emisiones anuales del transporte vehicular), para cada uno de los escenarios correspondientes. El esquema de entrada completa demostró el mayor beneficio (Directorate-General Environment 2001).

## **C.2 Transporte y Re-refinación de Lotes Contaminados**

Existe una preocupación general de que el diesel de bajo azufre para el uso de vehículos en las carreteras pueda ser contaminado durante su transporte por combustibles con mucho mayor contenido de azufre y con keroseno para uso de calefacción. En tanto que la diferencia entre distintos grados de combustible se hace más amplia, este riesgo se incrementa. Incluso con una pequeña dosis de combustible contaminado con contenido de varios miles de ppm de azufre, se provocaría un deterioro de diesel de bajo azufre sobre el límite de 10 a 15 ppm de azufre. Esto no sería una preocupación para la gasolina, la cual tiene una aplicación única, a menos que diferentes grados de gasolina disponibles comercialmente mantengan diferencias importantes en el contenido de azufre.

El diesel es frecuentemente transportado a través de poliductos, en las mismas líneas que los combustibles para vehículos estacionarios, sin una separación física entre los dos grados de combustible. La mezcla de los dos productos generalmente resulta en un producto de menor valor. La contaminación con azufre también puede ocurrir cuando diesel de bajo azufre es almacenado o transportado en una pipa tanque o en un poliducto que fue previamente usado para productos con alto contenido de azufre.

La necesidad de separar estrictamente el diesel y la gasolina ofrece cierta perspectiva. A pesar de que ambos combustibles son transportados en el mismo poliducto, la mezcla

de cualquier cantidad de gasolina en el diesel puede provocar un peligro de explosión. Se toman extremos cuidados para evitar esta mezcla, ninguna de las interfaces entre los dos productos puede añadirse al lote de diesel.

Es cierto que puede presentarse la necesidad de regresar lotes contaminados a la refinería para reprocesamiento, pero en este caso los distribuidores seguramente preferirán optimizar las prácticas de transporte para reducir la probabilidad de eventos de contaminación. Puede haber opciones adicionales para manejar lotes contaminados, tales como mezclar con un diesel que tiene un cierto contenido de azufre o con combustibles para maquinaria o vehículos estacionarios. Si es imperativo reprocesar el combustible, deberá tratarse de una mezcla de ultra bajo azufre, que por tanto no requerirá un tratamiento excesivo.