

SERIE DE INFORMES DEL GRUPO DE TRABAJO DE COMBUSTIBLES Y VEHÍCULOS DE IPIECA: VOLUMEN III



Azufre en el combustible:

*Estrategias y opciones para el uso de
combustibles y vehículos limpios*



Producido en asociación
con ARPEL

Agradecimientos

Este documento fue elaborado y editado por la Dra. Miriam Lev-On y Rob Cox en representación del Grupo de Trabajo de Combustibles y Vehículos de IPIECA, con la participación de los siguientes colaboradores:

Miguel Moyano e Irene Alfaro (ARPEL)

Jim Williams, David Lax y Peter Lidiak (API)

Bob Leidich (BP)

Brian Harney, Nazeer Bhore, Albie Hochhauser y Brian Doll (ExxonMobil)

Jean-Yves Touboulic (Total)

Neville Thompson* (CONCAWE)

También participaron los funcionarios y miembros del Grupo de Trabajo de Combustibles y Vehículos de IPIECA:

Presidente: Stewart Kempself (Shell)

Vicepresidentes: Paul Bennett (BP), Benoît Chagué (Total) y Roger Organ (Chevron)

Steve McArragher (Consultor)

La traducción y edición de la versión en español fue realizada por ARPEL

** Este volumen de la Serie de Informes de IPIECA sobre Combustibles y Vehículos está dedicado al fallecido Dr. Neville Thompson (ExxonMobil y CONCAWE), en reconocimiento por su entusiasmo y apoyo al Grupo de Trabajo de Combustibles y Vehículos de IPIECA y a la Red de Asociaciones de Combustibles (AFN) durante muchos años.*

© Los derechos de autor del presente documento, ya sea en su versión impresa, electrónica (CD o disquete) o de otra índole, pertenecen a la Asociación de la Industria Internacional del Petróleo para la Conservación del Medioambiente (IPIECA). Toda copia de este documento debe incluir este aviso sobre los derechos de autor. Al utilizar este documento en el futuro, el usuario le dará a IPIECA todos los créditos como fuente de información.

Fotografías

Tapa: imagen de fondo: Photodisc Inc.; refinería, tractor y tráfico: Corbis; asistente de laboratorio: Photodisc Inc. página 5: Photodisc Inc.; páginas 9, 17 y 31: Corbis; páginas 21 y 22: Photodisc Inc.



INTRODUCCIÓN A LA VERSIÓN EN ESPAÑOL

La preocupación por la calidad del aire especialmente en zonas urbanas a nivel mundial ha sido la causa principal de la implementación de programas para la eliminación del azufre en combustibles. Naturalmente, la región de América Latina y el Caribe no escapa a esta realidad. Es más, actualmente, la mayoría de sus países se encuentran desarrollando (o por desarrollar) procesos de inversión para la desulfurización de sus combustibles vehiculares.

En este contexto, y considerando que muchos países desarrollados ya cuentan con combustibles de bajo y muy bajo contenido de azufre, al momento de establecer las especificaciones de combustibles es importante tener claras las diferentes realidades por las que transita cada región y cada país, tanto a nivel ambiental como económico.

En este sentido, ARPEL entendió necesario e importante traducir al idioma español el presente documento, como forma de facilitar su uso por parte de las Empresas Miembro de ARPEL y de los países de América Latina y el Caribe, esperando que apoye a los mismos en la toma de decisiones acerca de la desulfurización de sus combustibles.

Agosto de 2007

Azufre en el combustible:
*Estrategias y opciones para el uso de
Combustibles y vehículos limpios*

Contenido

Introducción	5
Seis principios clave para abordar la reducción del azufre en el combustible	6
Consideraciones clave sobre política	9
La importancia de una gestión de la calidad del aire integrada	11
El impacto del transporte vial en la calidad del aire	11
El vínculo entre la calidad del aire y la salud	12
El rol de las estrategias referentes a combustibles y vehículos para mejorar la calidad del aire	13
El rol del azufre del combustible: consideraciones sobre el control de las emisiones vehiculares	17
Generalidades	17
Tecnologías de control de las emisiones vehiculares	17
<i>Reconversión de motores diesel</i>	18
El rol de la inspección y el mantenimiento	19
Combustibles con bajo contenido de azufre: conceptos básicos sobre refinación y logística	21
Estrategias y opciones de políticas	22
Estrategias para reducir las emisiones vehiculares	22
<i>El sistema vehículo-combustible</i>	23
<i>Marco para la asignación de prioridades de recursos</i>	24
Elaboración de estrategias de refinación y suministro	25
<i>Análisis de opciones</i>	26
<i>Consideraciones adicionales en cuanto a planificación</i>	26
<i>Impactos adicionales de la reducción del azufre del combustible</i>	28

El camino a emprender	31
Referencias	33
Glosario	36
Documentos Complementarios	
Documento Complementario A: <i>Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas (estudio de un caso)</i>	39
Documento Complementario B: <i>Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible</i>	43
Documento Complementario C: <i>Características del petróleo crudo y rendimientos previstos del producto</i>	54
Documento Complementario D: <i>Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución</i>	58
Documento Complementario E: <i>Tecnologías de tratamiento del combustible diesel</i>	68
Documento Complementario F: <i>Temas a abordar al evaluar las opciones para la reducción del azufre en el combustible</i>	70
Documento Complementario G: <i>El sistema vehículo-combustible: factores para la consideración de los encargados de la formulación de políticas</i>	72
Documento Complementario H: <i>La importancia de considerar el punto de referencia inicial (o "¡cuidado con los porcentajes!")</i>	73
Documento Complementario I: <i>Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe (estudio de un caso)</i>	75



Introducción

A nivel mundial, se prevé que la movilidad personal y el transporte de bienes crecerán rápidamente, de acuerdo con un incremento previsto del ingreso per cápita real. Aunque se prevé que las emisiones de contaminantes del aire descendan drásticamente en los países desarrollados, si las tendencias actuales se mantienen, también se prevé un aumento del tráfico en los países en desarrollo. Por este motivo, el mantenimiento y la mejora de la calidad del aire en áreas urbanas y en proceso de urbanización de muchos países en desarrollo es un desafío clave.

Las estrategias regionales y nacionales de gestión de la calidad del aire deben basarse en un análisis de las causas específicas de la contaminación, y en la comprensión de la contribución de todas las fuentes de emisiones, ya sean móviles, residenciales o comerciales. La clave es implementar estrategias eficaces en función de los costos para controlar las emisiones de fuentes de alto impacto, de modo tal de maximizar los beneficios para la salud pública. Por lo tanto, es esencial comprender la contribución relativa del transporte vial a las emisiones en general para evaluar el impacto potencial de los cambios de combustibles y vehículos en la calidad del aire. Ese es un proceso gradual.

A los países en desarrollo que continúan utilizando **gasolina con plomo** se les insta a asignar la prioridad principal al desarrollo de un programa de eliminación gradual del plomo, como se describe en el informe de IPIECA titulado "*Eliminando el plomo: estrategias y recursos del sector downstream para la eliminación gradual de la gasolina con plomo*" [IPIECA, 2003] (disponible en el sitio web de IPIECA en www.ipieca.org o [haciendo clic aquí](#)). El principal beneficio en cuanto a la calidad del aire proviene del hecho de que la gasolina sin plomo estará disponible en todo el mundo en un futuro cercano, lo que permitirá el uso de sistemas catalíticos de postratamiento de escapes. **La gasolina y el combustible diesel con bajo contenido de azufre** pasarán a ser la norma en el mundo desarrollado después de 2010 y permitirán sistemas avanzados de control de emisiones. Ese análisis concluye que si se diseña un "mapa de ruta" apropiado ahora, este sería una realidad en muchos países en desarrollo en el año 2030.

A diferencia del plomo, el azufre se encuentra presente en forma natural en el petróleo crudo, y debe quitarse en el proceso de refinación para crear combustibles con menor contenido de azufre. Los procesos de remoción presentan grandes desafíos tecnológicos y también en relación con los recursos. Para ayudar a los países en desarrollo a abordar estos desafíos, la Asociación de la Industria Internacional del Petróleo para la conservación del Medioambiente (IPIECA) ha elaborado este documento guía sobre el azufre del combustible, que es el tercero de una serie de informes preparados por el Grupo de Trabajo de Combustibles y Vehículos de IPIECA. El objetivo de la serie es brindar a los encargados de la toma de

decisiones información y lineamientos para el abordaje del tema de los combustibles y los vehículos en el contexto de un marco integral de gestión de la calidad del aire. Este informe considera los temas relacionados con la reducción de los niveles de azufre en los combustibles utilizados para transporte y analiza estrategias y opciones apropiadas para abordar estos temas en base a las circunstancias locales.

Los miembros de IPIECA reconocen que:

- Los combustibles y los vehículos deben considerarse un sistema integrado;
- Tanto el azufre en los combustibles como las condiciones de los motores/vehículos son elementos que contribuyen a las emisiones;
- Los costos no se miden solamente en términos de centavos por litro, sino también en cuanto a los costos de capital significativos relacionados con las modificaciones necesarias a la refinería;
- No siempre es factible o apropiado para los países pasar a las normas más estrictas sobre combustibles y vehículos;
- La naturaleza de los problemas de la calidad del aire, así como los principales factores que contribuyen a estos problemas, pueden variar de país en país; y
- Los recursos gubernamentales/privados son limitados y deben dirigirse a los programas que mejoran la salud pública en función de las necesidades públicas y para una mayor eficacia en función de los costos.

Para seguir adelante, es esencial reconocer las implicancias económicas significativas de la reducción del contenido de azufre de los combustibles utilizados para el transporte, y las diferencias, prioridades y realidades económicas entre los países desarrollados y los países en desarrollo.

Seis principios clave para abordar la reducción del azufre en el combustible

- Los combustibles y los vehículos deben ser tratados como un sistema integrado, en el cual las reducciones del azufre se vinculan a las tecnologías vehiculares para maximizar los beneficios de la reducción de las emisiones.
- Es necesario comprender que el azufre en el combustible y las condiciones de los motores/vehículos pueden contribuir a las emisiones, lo cual lleva a la necesidad de desarrollar programas de inspección y mantenimiento viables para obtener beneficios a largo plazo de las tecnologías vehiculares de avanzada.
- Es necesario reconocer las soluciones transaccionales que pueden enfrentar los gobiernos al confiar en las importaciones de productos, que en algunos casos les permiten aprovechar las ventajas de los costos inferiores en el mercado abierto, frente a la potencial seguridad del suministro, y los beneficios en cuanto a trabajo y creación de riqueza derivados de la refinación local o interna.
- Es necesario comprender que los costos no se miden solamente en términos de centavos por litro, sino también en cuanto a los altos costos de capital relacionados con las importantes modificaciones a la refinería que se necesitan para obtener combustibles con menos contenido de azufre.

Los miembros de IPIECA continuarán trabajando para mejorar sus refinerías y sus sistemas de distribución, y en el curso normal de sus negocios continuarán colaborando con los grupos de interés para abordar actividades relacionadas que también conduzcan a la reducción de emisiones de fuentes de transporte y a la mejora de la calidad del aire. Dichas áreas pueden incluir la aplicación de normas relativas a límites de emisiones y combustibles, de la inspección y el mantenimiento de vehículos, el retiro de los vehículos más viejos y la reconversión de vehículos con dispositivos de control de emisiones. El uso de enfoques óptimos para la reducción de emisiones de vehículos "nuevos" y "en uso" garantizará que se obtengan plenos beneficios de la reducción de los niveles de azufre en los combustibles utilizados para el transporte.

Diversos factores determinan la naturaleza específica de los temas relativos a la calidad del aire a nivel local y regional. La identificación y el análisis de las causas específicas de los problemas de la calidad del aire determinarán las estrategias de control más eficaces. Deben investigarse todas las fuentes de contaminación del aire, ya sean móviles, estacionarias, o residenciales y comerciales, como parte de una estrategia integral. La consideración más importante debe ser lograr el control eficaz en función de los costos de las fuentes de emisiones que también ofrezca beneficios significativos a la salud pública. Algunas de las categorías de fuentes de emisiones podrían ser: calefacción, cocinas interiores, transporte e incineración de residuos. Por más información sobre este asunto, consultar, entre otros, el informe de IPIECA titulado "*Limpieza del aire: estrategias y opciones para la gestión de la calidad del aire urbano*" [IPIECA, 2004] (disponible en el sitio web de IPIECA en www.ipieca.org o [haciendo clic aquí](#)).

- Es necesario reconocer que no siempre es factible o apropiado para los países saltar a las normas más estrictas en cuanto a combustibles/vehículos, en especial si la infraestructura y las autoridades normativas gubernamentales no están en posición de implementar y hacer cumplir normas relativas al suministro de estos nuevos combustibles y vehículos.
 - Es necesario aceptar que la naturaleza de los problemas de la calidad del aire, así como los principales contribuyentes a esos problemas, pueden variar de país en país, y respetar que hay disponibles recursos gubernamentales/privados limitados, por lo cual los recursos deben dirigirse a programas para mejorar la salud pública para lograr la eficacia en función de los costos y cumplir con las necesidades públicas.
- IPIECA y sus empresas y asociaciones miembro están prontas para brindar asistencia técnica a los gobiernos de los países en desarrollo para realizar la transición hacia combustibles con niveles de azufre inferiores.

Comprender la contribución del transporte vial en relación con otras fuentes de emisiones resulta esencial para evaluar el impacto general de los cambios en combustibles y vehículos sobre los inventarios de emisiones y la calidad del aire, y es posible que temas diferentes al azufre, por ejemplo, la eliminación gradual del plomo, constituyan una prioridad mayor para los países en desarrollo. Por más información sobre la eliminación gradual del plomo, las partes interesadas pueden remitirse, entre otras fuentes, al informe de IPIECA titulado *"Eliminando el plomo: estrategias y recursos del sector downstream para la eliminación gradual de la gasolina con plomo"* [IPIECA, 2003] (disponible en el sitio [web de IPIECA](#) o [haciendo clic aquí](#)).

Se ha demostrado que los niveles más bajos de azufre son importantes para mejorar el rendimiento de los sistemas catalíticos de control de emisiones, mientras que los niveles muy altos de azufre pueden reducir la actividad de los catalizadores. A diferencia del plomo, el azufre se encuentra presente en forma natural en el petróleo crudo, y debe quitarse en el proceso de refinación para crear combustibles con menor contenido de azufre. La guía que brinda este documento se centra en consideraciones técnicas para la introducción exitosa de vehículos con emisiones inferiores, y en la reducción del contenido de azufre de los combustibles para permitir que las tecnologías avanzadas de control automotor cumplan con las normas actuales. Además, se brinda información sobre el rol de la reconversión y los programas de inspección y mantenimiento. También se analizan estrategias de refinación para la reducción gradual del contenido de azufre y se aborda la necesidad de mejoras simultáneas en la infraestructura para facilitar la entrega de combustibles de alta calidad a los mercados.

IPIECA comprende cabalmente que las refinerías en muchos países en desarrollo enfrentarán desafíos reales en relación con las inversiones multimillonarias en dólares para pasar a niveles de azufre inferiores. Los miembros de IPIECA apoyan un enfoque de la reducción de azufre basado en los seis principios clave que se muestran en el cuadro de las páginas 6-7. Debido a las significativas implicancias económicas de la reducción gradual del contenido de azufre en el combustible, es esencial que todos los grupos de interés reconozcan las diferencias entre la situación en los Estados Unidos (E.U.A.) y la Unión Europea (UE), donde la norma es la propiedad privada de las refinerías, y la situación en los países en desarrollo, donde, en la mayoría de los casos, el gobierno es propietario total o mayoritario de la infraestructura de refinación y comercialización de combustible.



Consideraciones clave sobre política

Algunos factores clave que los encargados de la toma de decisiones deben considerar al elaborar estrategias para reducir el azufre en los combustibles y disminuir las emisiones vehiculares son los siguientes:

- Tecnologías de control de emisiones y antigüedad de la flota existente;
- Niveles actuales de azufre en los combustibles e incorporación paulatina de nuevas normas sobre emisiones vehiculares;
- Características del uso de los vehículos y capacidades de mantenimiento y reparación de vehículos; y
- Capacidades de la infraestructura de refinación, distribución y venta minorista.

Las implicancias estratégicas de cualquier política sobre combustibles propuesta requiere la consideración de ciertos temas, como seguridad de la oferta de combustible, competitividad económica, apertura de nuevos mercados y empleo. Para maximizar las posibilidades de una implementación exitosa es necesario consultar a todos los grupos de interés, incluso administradores estatales y locales, refinadores y distribuidores de combustible, fabricantes e importadores de vehículos, representantes públicos y grupos comunitarios. La Figura 1 muestra los vínculos entre las diversas categorías de temas y análisis necesarios para desarrollar una estrategia de implementación local detallada. Estos temas se abordarán más adelante en este documento y pueden utilizarse como marco para la elaboración de una estrategia integrada para la reducción gradual del contenido de azufre de los combustibles.

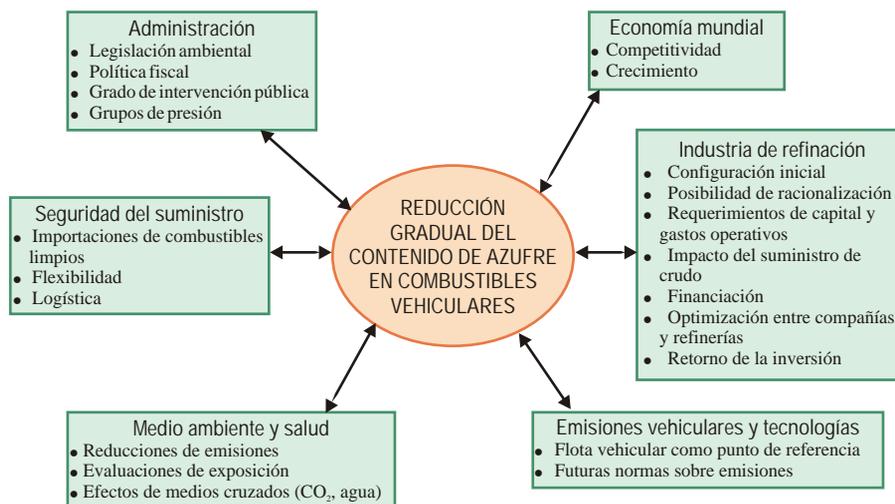
Las estrategias para reducir las emisiones del sector del transporte en un país determinado deben basarse en los factores pertinentes para ese país y/o región. Los países pueden tener refinerías nacionales, y esas refinerías serán diferentes en cuanto a su complejidad y flexibilidad para producir combustibles más limpios. Al desarrollar sus estrategias, los países deben considerar la gama de opciones y diseñar un "mapa de ruta" específico para el país. Por ejemplo:

- En el **corto plazo**, los países podrían pasar al crudo "dulce" (con bajo contenido de azufre), que sería más costoso de importar pero menos caro de procesar, y/o podrían importar productos terminados con menor contenido de azufre para utilizar en áreas donde la calidad del aire es particularmente mala; y
- Las alternativas más a **largo plazo** pueden incluir la armonización regional de normas sobre combustibles y vehículos en forma simultánea con la mejora de las capacidades de procesamiento de las refinerías para producir combustibles con bajo contenido de azufre.

Dado que el costo de la reducción del azufre en los combustibles vehiculares y su impacto en la calidad del aire urbano variarán de país a país, los encargados de la toma de decisiones deberán considerar si la mejor manera de seguir adelante es reducir gradualmente el contenido de azufre con el correr del tiempo o "saltar" de inmediato a combustibles con contenido de azufre ultra bajo*. Además, sin importar qué opciones de políticas se consideren, resulta imperativo tratar a los combustibles para automóviles como un sistema integrado. La tecnología avanzada de control vehicular requiere niveles de azufre reducidos para maximizar los beneficios de la reducción de emisiones.

En los E.U.A., la UE y Japón, los cambios en las propiedades del combustible se han introducido con el correr del tiempo, de acuerdo con las reducciones de los límites de las emisiones vehiculares que requieren nueva tecnología vehicular. Los países en desarrollo que en la actualidad están enfrentando asuntos relativos a la gestión de la calidad del aire pueden beneficiarse de esta experiencia acumulada. Esto ayudará a elaborar estrategias de implementación de acuerdo con la gravedad de sus problemas de contaminación del aire, refinación de combustible, infraestructura de distribución y suministro, y también con sus prioridades de asignación de recursos.

Figura 1: Representación esquemática de interrelaciones a considerar al planificar la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles vehiculares



* La definición de contenido de azufre ultra bajo es diferente en los Estados Unidos de América y en Europa (ver Glosario).

La importancia de una gestión de la calidad del aire integrada

Se necesita un enfoque integrado y estructurado de la gestión de la calidad del aire para establecer y lograr los objetivos de calidad del aire a nivel nacional y local. Como se analizó en diversos documentos guía, incluso en el informe de IPIECA titulado "*Limpieza del aire: estrategias y opciones para la gestión de la calidad del aire urbano*" [IPIECA, 2004] (disponible en el sitio [web de IPIECA](#) o [haciendo clic aquí](#)), un enfoque integrado requiere información técnica apropiada, por ejemplo: inventarios de emisiones, control de la calidad del aire ambiental, modelos de predicción de la calidad del aire y evaluación de brechas entre la calidad del aire medida y deseada. Dicho programa, sumado a información técnica sólida, también debe basarse en un análisis de la eficacia en función de los costos, en la transparencia de la toma de decisiones y en la participación de los grupos de interés.

El impacto del transporte vial en la calidad del aire

El transporte vial tiene impacto en la calidad del aire a través de múltiples procesos, incluso los siguientes:

- Emisiones de escapes de vehículos y otras fuentes de combustión;
- Evaporación de hidrocarburos de combustibles de tuberías de combustibles gaseosos y líquidos y de tanques de almacenamiento a bordo de vehículos motorizados, y
- Emisiones por conceptos no relacionados con combustibles (por ejemplo, desgaste de neumáticos y frenos, material particulado).

Estos compuestos emitidos reaccionan en la atmósfera para formar ozono, partículas secundarias y otros contaminantes secundarios. La combustión también produce gases de efecto invernadero como dióxido de carbono.

El transporte es solo una de las actividades que contribuye a los inventarios de emisiones generales que tienen influencia en la calidad del aire de un área determinada. En la Tabla 1 se enumeran los datos publicados que documentan la parte de las emisiones que puede atribuirse al transporte para diversas ciudades en todo el mundo. Aunque estos datos constituyen solo una pequeña muestra, sirven para demostrar la variabilidad entre las diversas regiones y ciudades de lo que el sector del transporte contribuye al total de inventarios de emisiones. Como se indica en "*Limpieza del aire*", la eficacia de las medidas orientadas al transporte para mejorar la calidad del aire variarán de acuerdo con las condiciones locales y la comprensión cabal de todas las fuentes.

Tabla 1: Porcentaje de emisiones originadas por vehículos en algunas ciudades

Ciudad/ región	Monóxido de Carbono	Compuestos orgánicos volátiles	Óxidos de nitrógeno	Dióxido de azufre	Partículas
Beijing	39	75	46	n/d	No disponible
Budapest	81	75	57	12	No disponible
Cochin	70	95	77	n/d	No disponible
Colombo	100	100	82	94	88
Nueva Delhi	90	85	59	13	37
Lagos	91	20	62	27	69
Ciudad de México	100	54	70	27	4
Santiago	92	81	82	25	10
San Pablo	97	89	96	86	42

Basado en el Inventario Global de Emisiones del Transporte de las Naciones Unidas (GITE, 2002)
Fuentes: Dietrich Schwela y Olivier Zali, Eds. 'Motor vehicles and air pollution,' in *Urban Traffic Pollution* (Londres, E & FN Spon, 1999); Bekir Onursal y Surhid P. Gautam, *Vehicular Air Pollution: Experiences from Seven Latin American Urban Centers*, Documento Técnico 373 del Banco Mundial (Washington, D.C., Banco Mundial, 1997); y Christopher Zegras y otros, *Modeling Urban Transportation Emissions and Energy Use: Lessons for the Developing World* (Washington, D.C., International Institute for Energy Conservation, 1995).

El vínculo entre la calidad del aire y la salud

La contaminación del aire exterior puede provenir de fuentes puntuales, que pueden afectar solo a un área relativamente definida, o de varias fuentes pequeñas y difusas. En cualquier área dada, una variedad de fuentes difusas, como el tráfico, fuentes del área (por ejemplo, quema de bosques, secado de pintura, calefacción residencial) y fuentes puntuales (por ejemplo, calderas industriales, plantas de energía) emiten una mezcla de compuestos hacia la atmósfera. Además de esos contaminantes emitidos directamente por fuentes locales, algunos contaminantes son creados por una cadena de complicadas reacciones atmosféricas o son transportados a distancias medianas y largas.

La contribución relativa de las fuentes de emisiones a la exposición humana a la contaminación del aire varía de acuerdo con las condiciones regionales y factores relacionados con el estilo de vida. Para algunos contaminantes, las fuentes interiores pueden tener mayor importancia que

las exteriores en términos de exposición, pero esto no disminuye la importancia de la contaminación externa. Los contaminantes producidos en el exterior pueden penetrar en el medio ambiente interno y pueden afectar la salud humana por la exposición en el interior y en el exterior.

Es sabido que los niveles excesivamente altos de contaminación del aire tienen impacto en la salud humana. Sin embargo, el camino de las emisiones provenientes del transporte a la salud humana no es directo. Por eso, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha elaborado directrices u objetivos de Calidad del Aire recomendados, como indicadores de la exposición de la población. Los países que quieran utilizar este método para mejorar la calidad del aire pueden utilizar estos objetivos y las directrices de control de la calidad del aire para documentar las condiciones ambientales (ver www.who.int). Las directrices de la OMS brindan objetivos de calidad del aire específicos para SO_2 , CO , NO_2 , O_3 y lineamientos referentes al control de las partículas trasladadas por el aire con un diámetro $< 10 \mu\text{m}$ (MP_{10}) o $< 2.5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$).

Las estrategias actuales para mejorar la calidad del aire se centran en todo el mundo en los compuestos objetivo identificados por la OMS, con especial atención en la contribución de los escapes diesel a la carga atmosférica general de partículas trasladadas por el aire. El escape diesel es una mezcla compleja de cientos de componentes en estado gaseoso, líquido o particulado. La fase gaseosa del escape diesel contiene numerosos hidrocarburos de bajo peso molecular. El escape diesel contiene también material formado por partículas finas (diámetro $< 2.5 \mu\text{m}$) e incluye un subgrupo de partículas ultrafinas (diámetro $< 0.1 \mu\text{m}$), que se piensa son pequeñas gotas líquidas.

Hay profusa investigación en curso que intenta caracterizar mejor los efectos en la salud que podrían atribuirse a la exposición al escape diesel y a otro material particulado. Las investigaciones van desde estudios de efectos respiratorios crónicos (excluyendo cáncer) hasta el potencial de desarrollar cáncer de pulmón. El Instituto de Investigación de Efectos en la Salud (HEI, por su sigla en inglés), ha emitido un buen resumen de los conocimientos actuales sobre los impactos de las partículas de diesel en la salud, que también incluye una breve descripción de otros estudios que se están emprendiendo para comprender mejor estos vínculos [HEI, 2003].

El rol de las estrategias referentes a combustibles y vehículos para mejorar la calidad del aire

La magnitud del problema de la calidad del aire y la contribución del sector del transporte a las emisiones totales determinará el alcance de los requerimientos del control de emisiones vehiculares. El componente principal de una estrategia de control de emisiones vehiculares en cualquier plan de gestión de la calidad del aire debe ser la mejora de la tecnología vehicular y los cambios en la calidad de los combustibles que pueden posibilitar o contribuir con dicha mejora.

Si bien las características de los combustibles son importantes, sus efectos sobre las emisiones en forma aislada son relativamente pequeños:

- Los cambios de los combustibles por sí solos por lo general permiten reducir las emisiones provenientes de la flota vehicular existente en forma limitada.
- Los cambios en los combustibles por sí solos no generan la magnitud de reducciones de emisiones que puede lograrse introduciendo paulatinamente nuevos vehículos que generen menos emisiones.
- Es posible que los combustibles deban cambiar para adaptarse a nuevas tecnologías vehiculares, en especial las utilizadas en los vehículos que generan menos emisiones.
- Es importante tener un nivel apropiado de azufre en el combustible para diversos vehículos equipados con catalizadores y/o filtros de partículas.

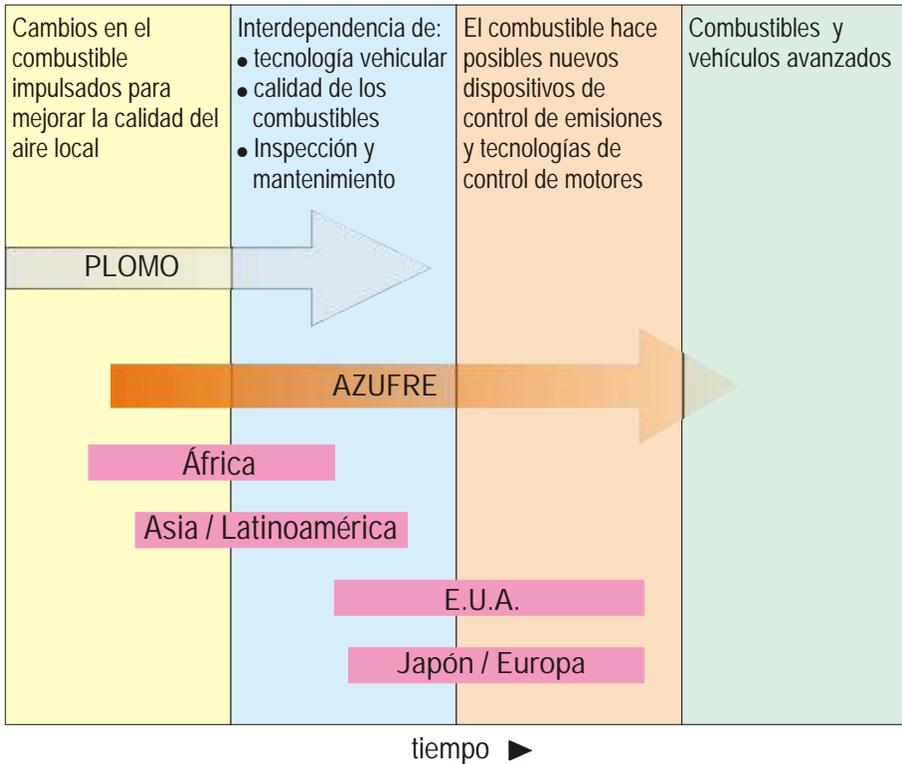
Un sistema de gestión de la calidad del aire eficaz en función de los costos requiere que las autoridades locales y nacionales aborden en forma simultánea los temas de la calidad del aire, la tecnología vehicular, el mantenimiento de los vehículos y las condiciones viales/del tráfico. [Remitirse al Documento Complementario A: Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas](#), que incluye el estudio de un caso de una ciudad asiática hipotética que muestra las reducciones de emisiones que pueden lograrse cambiando la tecnología vehicular, reduciendo el contenido de azufre en el combustible e implementando una política de inspección y mantenimiento (I&M).

La Figura 2 presenta la evolución de las etapas del concepto de "Sistema combustible-vehículo" cuando las diferentes regiones han adoptado medidas futuras referentes a combustibles y vehículos. El impulsor inicial clave fue casi siempre la eliminación del plomo de la gasolina para permitir la introducción de vehículos equipados con catalizadores y reducir los niveles de plomo transportados por el aire.

A esto por lo general le sigue un período durante el cual el combustible, la tecnología vehicular y la I&M son interdependientes y cambian en forma paralela a la reducción de las emisiones a niveles muy bajos. La propiedad clave del combustible es el azufre, objeto del presente informe. La etapa final serían las nuevas tecnologías radicales, como vehículos con células de combustible, que todavía distan mucho de implementarse y cuyo futuro es incierto.

Los Estados Unidos de América y Europa han reducido los niveles de azufre en forma gradual, a lo largo de varios años, mientras adaptaban la calidad del combustible a los requerimientos de la tecnología vehicular. La introducción y posterior mejora de los controles catalíticos en los vehículos para cumplir con las normas más rígidas provocaron reducciones de emisiones significativas, con límites de azufre en el combustible de 500 ppm en la UE y de 1000 ppm en los Estados Unidos de América. En la siguiente sección, titulada "El rol del azufre del combustible: consideraciones sobre el control de las emisiones vehiculares", se brinda un análisis de estos límites referentes al azufre y de la tecnología vehicular correspondiente.

Figura 2: Etapas del combustible limpio y la tecnología vehicular



Esta tendencia a vincular los cambios en los parámetros de los combustibles con los requerimientos de la tecnología vehicular - según se necesite para cumplir con normas relativas a emisiones más estrictas - se está expandiendo a más regiones y países con el correr del tiempo. Las Tablas 2 y 3 brindan una evolución histórica de las emisiones provenientes de escapes y de los límites del contenido de azufre de la gasolina y el combustible diesel en Europa y los Estados Unidos de América. Los países en desarrollo pueden aprender de la experiencia de otros países y desarrollar su propio "mapa de ruta", tanto para las normas relativas a emisiones vehiculares como a los requerimientos correspondientes de calidad del combustible, lo cual debe incluir una evaluación de la implicación de pasos intermedios.

Es posible que algunos países estén preparados para saltar de inmediato a las tecnologías más avanzadas. Sin embargo, para la vasta mayoría de los países, un gran salto a niveles ultra bajos de azufre en los combustibles por sí solo no favorecería sus intereses económicos o ambientales, ya que los beneficios serían pocos si no logran introducir al mismo tiempo los vehículos de alta tecnología correspondientes. Los tipos de vehículos existentes en el país o área local deben guiar el nivel de azufre necesario en el combustible en cualquier fase particular del "mapa de ruta".

Tabla 2: Límites del azufre en la gasolina y normas de emisiones vehiculares en los Estados Unidos de América y Europa

E.U.A.			Europa		
Año	Limitación de emisiones	Máx. azufre en combustible (ppm)	Año	Limitación de emisiones	Máx. azufre en combustible (ppm)
1975	Primer catalizador (oxidación)	1000	Pre-1993	Especificaciones del país (con plomo)	1000-2000
1980	Tier 0 (catalizadores de 3 vías)	1000	1993	Euro 1 (catalizadores de 3 vías)	1000
1994	Tier 1	1000	1996	Euro 2	500
1999	NLEV	1000	2000	Euro 3	150
2004	Tier 2(*)	80(30)	2005	Euro 4	50(10)

* La norma Tier 2 considera un promedio de 30 ppm y un máximo de 80 ppm por Galón. Esto resulta en un nivel de azufre muy inferior al de un máximo de 80 ppm simplemente. Parte de la Gasolina comercializada debe contener menos de 30 ppm de acuerdo a esta definición.

Tabla 3: Límites del azufre en el combustible diesel y normas de emisiones vehiculares en los Estados Unidos de América y Europa

Vehículos de carga pesada de los E.U.A.			Vehículos de carga liviana de Europa		
Año	Control vehicular	Azufre en combustible (ppm)	Año	Norma	Azufre en combustible (ppm)
			1980	EEC/75/716	5000
1988	Mod. Motor	5000	1989	EEC/87/219	3000
1993	Mod. Motor	500	1993	Euro 1	2000
1998	Mod. Motor	500	1996	Euro 2	500
2004/2006	EGR	500/15	2000	Euro 3	350
2006/2010	Postratamiento	15	2005	Euro 4	50(10)



El rol del azufre del combustible: Consideraciones sobre el control de las emisiones vehiculares

Generalidades

El factor principal que ha contribuido a la disminución de las emisiones vehiculares en los últimos 30 años ha sido la introducción de vehículos con catalizadores de escapes. Ciertas propiedades de los combustibles son importantes para permitir que estos catalizadores operen en forma eficaz durante toda la vida del vehículo. La primera prioridad a nivel mundial ha sido, y sigue siendo, la eliminación gradual del plomo, un veneno de los catalizadores, para permitir el postratamiento eficaz de los vehículos a gasolina.

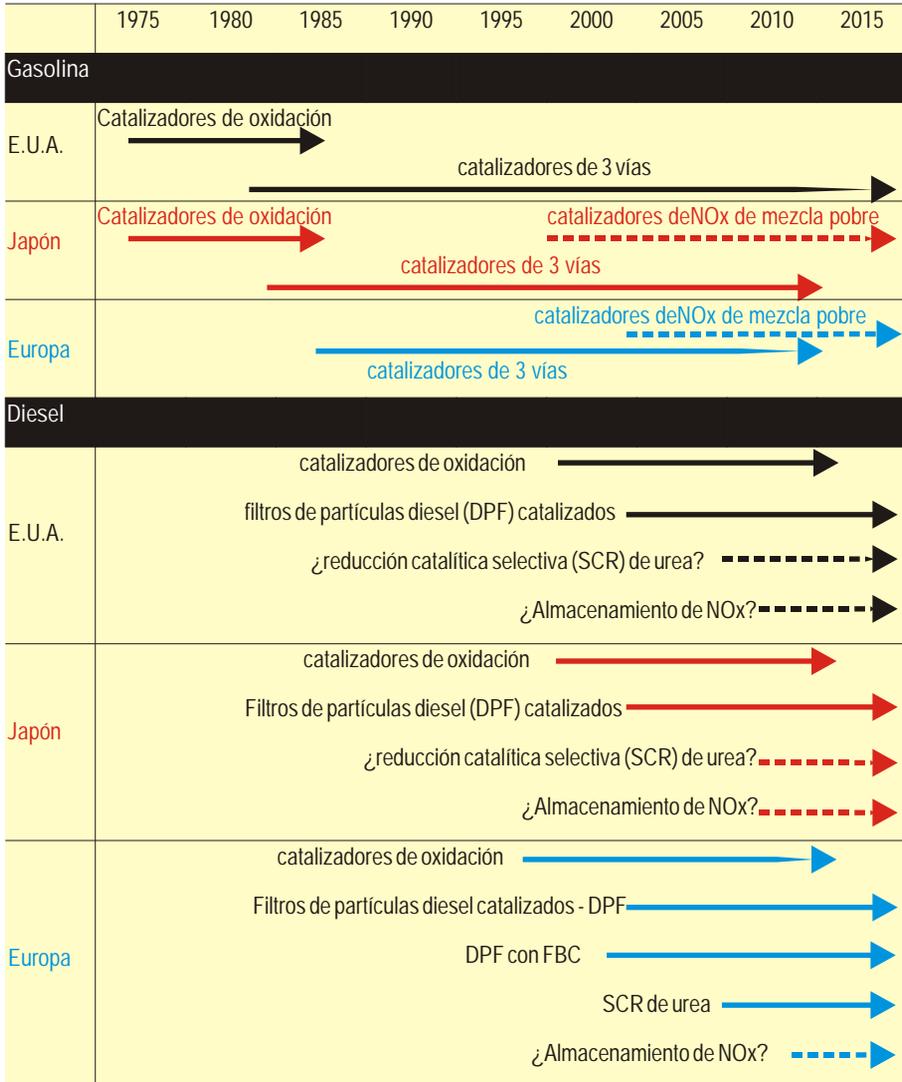
A diferencia del plomo, que se agrega a la gasolina durante el proceso de refinación, el azufre es un elemento que se encuentra presente en el petróleo crudo en forma natural. Aunque el nivel de azufre en el combustible también puede afectar el rendimiento de los catalizadores de los vehículos, no lo afecta tanto como el plomo, que es un veneno grave e irreversible de los catalizadores. Los niveles de azufre en el combustible deben determinarse de acuerdo con la tecnología de control de emisiones vehiculares correspondiente para cada mercado regional.

Tecnologías de control de las emisiones vehiculares

Es claro que la mejora en la tecnología de control de emisiones vehiculares puede provocar reducciones sustanciales de las emisiones. En áreas donde no se han aplicado los controles de las emisiones vehiculares, la adopción de las normas sobre emisiones estadounidenses o europeas que estaban vigentes para vehículos nuevos de mediados a fines de los años 90 ofrecerá una reducción significativa de las emisiones de la flota de vehículos carreteros a largo plazo. Estas normas pueden adoptarse mientras se mantienen los niveles de azufre en la gasolina y el combustible diesel en el rango de 300 - 1000 ppm, como se analiza a continuación. La imposición de las normas estadounidenses o europeas más avanzadas sobre emisiones para vehículos nuevos ofrecerá un beneficio incremental muy inferior que puede no ser eficaz en función de los costos.

La Figura 3 muestra la secuencia de la introducción de las tecnologías automotrices en los Estados Unidos de América, Europa y Japón para vehículos a gasolina y a combustible diesel. La línea de tiempo se extiende

Figura 3: Línea de tiempo que muestra la introducción pasada, presente y prevista para el futuro de tecnologías de control de emisiones



desde 1975, cuando se introdujeron los primeros convertidores catalíticos, hasta 2015, cuando se prevé que estén disponibles en forma habitual las tecnologías que actualmente están en etapa de desarrollo. El [Documento Complementario B](#) ofrece una descripción más completa de las diferentes tecnologías de control de emisiones vehiculares y su sensibilidad al azufre.

Reconversión de motores diesel

En algunos casos es posible realizar la reconversión de motores diesel con diversos tipos de sistemas de postratamiento de escapes para reducir las

emisiones. Se puede utilizar catalizadores de oxidación en muchos motores más viejos de vehículos de carga liviana y pesada para lograr una reducción significativa de las emisiones de MP (~25%) y reducir también los HC y el CO.

También es posible reconvertir algunos tipos de filtros de partículas, en particular, el filtro de regeneración continua (CRT) y el filtro de partículas diesel catalizadas (C-DPF) pueden brindar reducciones sustanciales (~90%) en las emisiones de MP con combustible con azufre de 50-mg/kg [DECSE, 2001]. Sin embargo, estos sistemas son muy eficaces solo cuando la temperatura de escape del motor es lo suficientemente alta como para regenerar los filtros. De lo contrario, los filtros pueden llenarse de hollín y obstruirse, a veces rápidamente. No son aptos para vehículos más viejos, que producen una gran contaminación, deben adaptarse a los vehículos individuales y requieren buenas prácticas de mantenimiento. También pueden mostrar un incremento del consumo de combustible, por eso algunos no los consideran la solución más eficaz en función de los costos. El enfoque por lo general es más apropiado para los vehículos de carga pesada, los autobuses urbanos o las flotas de taxis, más que los autos para uso privado. Los filtros FTF (Flow-Through Filters), con diseños de malla de alambre o "flujo tortuoso" para ayudar a oxidar la mayoría de las partículas, están siendo desarrollados actualmente y pueden resultar útiles para vehículos diesel de carga pesada más viejos, en especial aquellos con controles mecánicos. Bajar los niveles de humo negro es valioso en cuanto al beneficio social y la percepción pública. En ciudades de los Estados Unidos como Nueva York, Los Ángeles, Seattle y otras se han realizado numerosas campañas exitosas de reconversión de vehículos, y ha habido proyectos similares en Europa y Japón. Los estudios piloto realizados en condiciones típicas de "uso local" son importantes para la aplicación eficaz de estrategias de reconversión, y los mismos están comenzando ahora en países latinoamericanos y asiáticos.

El rol de la inspección y el mantenimiento

No cabe duda de que las mayores reducciones de las emisiones vehiculares provienen de la introducción de nueva tecnología para los motores y los sistemas postratamiento, en especial el uso de catalizadores en vehículos a gasolina y a combustible diesel. El rendimiento de esta tecnología puede mejorarse reduciendo el contenido de azufre en el combustible, como se analizó anteriormente. Sin embargo, los beneficios de estas tecnologías solo se logran si los dispositivos de la tecnología de control de emisiones están funcionando correctamente. Si un catalizador de gasolina pierde eficacia por utilizar por error gasolina con plomo, o si el catalizador es quitado, las emisiones aumentarían en un factor de 10, y podrían ser superiores a las de un vehículo sin catalizador. Hay una concepción errónea común de que los vehículos que cuentan con dispositivos de control de emisiones no rinden tan bien como los vehículos que no los tienen, lo que alienta las maniobras de "interferencia" con los sistemas de control. Esta percepción es falsa y los

programas de educación pública deben concienciar a los consumidores sobre los beneficios de los dispositivos de control de emisiones, y de la necesidad de mantenerlos correctamente y asegurar su durabilidad.

Por lo tanto, es esencial contar con un sistema de inspección y mantenimiento (I&M) para verificar y controlar las emisiones de vehículos en servicio y asegurar que continúen funcionando tal como fueron diseñados. Esto es importante aun si no se instalan catalizadores, porque la mala puesta a punto del motor también puede incrementar sustancialmente las emisiones. Es claro que esto es más importante todavía cuando se agregan a los vehículos tecnologías de control de emisiones avanzadas, y con la introducción de motores de tecnología avanzada en las flotas de los distintos países. El tema es analizado muy bien en un informe reciente del Banco Mundial [Banco Mundial, 2004] sobre los diversos asuntos que implica.

Un sistema de I&M sólido debe basarse en protocolos de prueba que estén diseñados para:

- **Minimizar** las falsas aprobaciones o las falsas reprobaciones
- **Dificultar** que se realicen trampas o se eviten inspecciones;
- **Minimizar** las diferencias de medición entre los distintos centros de prueba; y
- **Maximizar** la precisión y la exactitud.

La experiencia realizada en Ciudad de México y en todos los otros lugares ha demostrado que los grandes centros centralizados solo de prueba funcionan mejor que los garajes descentralizados de prueba y reparación, que están más abiertos al fraude. Si los vehículos están equipados con sistemas de diagnóstico a bordo (OBD, por su sigla en inglés), los centros solo de prueba también podrían integrar lecturas de OBD en el procedimiento general de I&M. Además, deben realizarse campañas de educación para mejorar los procedimientos de mantenimiento, en especial de motores pequeños de dos tiempos.

Sin importar qué sistema de I&M se elija, el gobierno debe estar dispuesto a y ser capaz de brindar recursos sustanciales para auditar y supervisar el programa, aun si la supervisión es brindada por terceros. Este es un elemento obligatorio para garantizar la objetividad y transparencia de esos programas. Además de supervisar adecuadamente el programa de I&M, los gobiernos también deben estar dispuestos a brindar financiación para asegurar que: (a) haya equipos de diagnóstico y reparación disponibles en cantidades suficientes; y (b) los mecánicos estén capacitados adecuadamente para realizar el mantenimiento y la reparación de los vehículos en forma eficiente.

En el [Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible](#) se ofrece un análisis de diversos enfoques para detectar y reparar los vehículos que funcionan mal. A medida que se introduzcan a la flota vehículos con tecnología más nueva, es importante asegurar que un pequeño porcentaje de "grandes emisores" no revierta el progreso logrado por la introducción de la nueva tecnología.



Combustibles con bajo contenido de azufre: conceptos básicos sobre refinación y logística

El petróleo crudo o petróleo es una mezcla compleja de miles de diferentes moléculas de diversos tamaños. El tamaño de las moléculas es determinado por el número de átomos de carbono e hidrógeno que se unen. La amplia variedad de tamaños y configuraciones de las moléculas de petróleo crudo significa que los puntos de ebullición van desde la temperatura ambiente a más de 800°C. El [Documento Complementario C](#) contiene más información sobre la composición química, los rendimientos de destilación típicos y las características de una gama de crudos de diferentes regiones del mundo.

Las refinerías deben convertir el petróleo crudo en los productos que los clientes necesitan utilizando varios procesos diferentes, que se describen brevemente en el [Documento Complementario D](#), cumpliendo con las especificaciones locales o internacionales, incluso las referentes al contenido de azufre. Las operaciones de refinación de petróleo en todo el mundo están cambiando mucho. El diseño de los equipos ha avanzado, la demanda de productos ha cambiado, las especificaciones son más estrictas y las materias primas han cambiado con la diversidad de las fuentes de suministro.

Hay diversas tecnologías disponibles para reducir el contenido del azufre en el combustible, que también se describen en el [Documento Complementario D](#). Los principales temas son la disponibilidad de capital suficiente para financiar las mejoras de las refinerías y la capacidad local de emprender el diseño y la construcción necesarios. Todas las consideraciones técnicas analizadas en los Documentos Complementarios deben llevarse al contexto local a través de estrategias de implementación detalladas que deben tener en cuenta:

- Las fuentes de petróleo crudo que están a disposición de las refinerías locales, y la seguridad de la oferta a largo plazo;
- Los requerimientos de capital para modificar y actualizar las refinerías locales, en base a su configuración actual; y
- Las mejoras necesarias en la infraestructura local y/o regional para transportar productos con bajo contenido de azufre al mercado evitando la contaminación y/o la adulteración.



Estrategias y opciones de políticas

Cuando las autoridades nacionales y regionales desean evaluar la pertinencia de reducir gradualmente el contenido de azufre en los combustibles dentro del marco de su programa integral de gestión de la calidad del aire, tienen varios caminos abiertos para la implementación. Los pasos a seguir han sido analizados anteriormente en este documento y también descritos en varios documentos guía [Banco Mundial, 2004; IPIECA, 2004; y otros]. Estas directrices, junto con su conocimiento de las condiciones locales, les ayudarán a determinar el camino más apropiado a seguir. Durante los últimos 30 años, la experiencia en el tratamiento de los temas de gestión de la calidad del aire en muchas partes del mundo ha demostrado que no hay un camino fácil para lograr reducciones de las emisiones y mejoras de la calidad del aire. Hacer eso requiere un esfuerzo integrado y una gama de medidas y estrategias que, cuando se implementan juntas, llevan al logro de los objetivos deseados en cuanto a calidad del aire.

Por una lista de verificación ilustrativa de los asuntos a abordar al considerar las opciones para reducir gradualmente el contenido de azufre en los combustibles para automóviles remitirse al [Documento Complementario F: *Temas a abordar al evaluar las opciones para la reducción del azufre en el combustible*](#). Se prevé que el grado de control de emisiones requerido variará de país en país y de lugar en lugar. El uso de un enfoque sistemático, como se analiza a continuación, enfocará el proceso de toma de decisiones y maximizará los beneficios.

Estrategias para reducir las emisiones vehiculares

Las estrategias pueden confiar en medidas que se orientan hacia la tecnología, apuntando a los vehículos y los combustibles utilizados, y en prácticas de mantenimiento dentro del sector, o prácticas de comportamiento, en procura de reducir (o impedir aumentos de) la cantidad de actividad de los vehículos que más contaminan. Dichas medidas también pueden centrarse en aspectos sistémicos del sistema de transporte, es decir, en las formas en las cuales la red de transporte influye en la cantidad total del uso de vehículos o la intensidad de las emisiones de los vehículos individuales.

Algunos de los factores importantes que pueden impactar en la eficacia de cualquier estrategia de control de fuentes móviles son los siguientes:

- Contribución relativa de las fuentes móviles a la contaminación del aire local;
- Composición de la flota de vehículos actual y futura, y expectativas de crecimiento futuro;
- Tiempo necesario para introducir nuevos vehículos con bajo nivel de emisiones; e
- Índice de abandono de la flota de vehículos carreteros más viejos.

Las prácticas locales referentes al mantenimiento de vehículos y al cumplimiento de normas tienen gran influencia en los beneficios que pueden obtenerse de las estrategias de control de las emisiones vehiculares.

Es necesario considerar con cuidado las condiciones locales, por ejemplo: el nivel de uso de vehículos; la antigüedad de la flota de vehículos y la tecnología que utiliza; el grado de mantenimiento correcto de los vehículos y la disponibilidad de combustibles apropiados y si se usan en forma adecuada. Los factores a considerar en estas cuatro áreas se analizan brevemente en el [Documento Complementario G: *El sistema vehículo-combustible: factores para la consideración de los encargados de la formulación de políticas.*](#) En un documento publicado recientemente por el Banco Mundial [Banco Mundial, 2004] se puede encontrar un análisis más completo de estos temas.

Al analizar el impacto de las nuevas tecnologías es importante cuantificar los beneficios en términos absolutos, y no en porcentajes. En otras palabras, es importante determinar el punto de referencia inicial. Ver el [Documento Complementario H: *La importancia de considerar el punto de referencia inicial.*](#) por un ejemplo ilustrativo de este tema.

Una estrategia integral para reducir las emisiones de los vehículos motorizados deberá abordar temas de implementación práctica y adaptarse a las limitaciones de recursos, la eficacia tecnológica y la factibilidad social del éxito. Al evaluar las estrategias a seguir frente al azufre en los combustibles, también es importante tener en cuenta la producción de combustible y la infraestructura de distribución local y regional. Es posible que las especificaciones de combustibles que se han desarrollado en una región no sean eficaces en función de los costos o requieran un largo tiempo de preparación al aplicarse en una región diferente. Debe estudiarse la posibilidad de especificaciones de combustibles locales, regionales, nacionales o multinacionales para cada situación individual, en base al mercado específico y a consideraciones financieras y políticas.

El sistema vehículo-combustible

El control de las emisiones vehiculares y los niveles de azufre en los combustibles debe realizarse como parte de un plan coordinado para abordar todas las fuentes locales de contaminación del aire, incluso las fuentes estacionarias, además de las fuentes móviles. El plan debe estar adaptado específicamente para la ciudad, el país y la región de interés.

Al evaluar las opciones de políticas es imperativo que los combustibles de automóviles y vehículos sean tratados como un sistema integrado. En particular, las reducciones del nivel de azufre deben estar vinculadas con la introducción de tecnologías vehiculares de avanzada, a fin de asegurar beneficios significativos en la reducción de las emisiones. Por lo tanto, toda política debe incluir una normativa paralela en tres áreas clave:

- control de las emisiones vehiculares;
- calidad de los combustibles; e
- inspección y mantenimiento (I&M).

Aunque los cambios en la calidad del combustible por sí solos por lo general no son eficaces en función de los costos, dentro del sistema vehículo-combustible, los dos factores clave a considerar relacionados con los combustibles son:

- (a) las especificaciones, en particular sobre el **contenido de azufre**, para los combustibles limpios, y en forma más general, las **normas de calidad** sobre gasolina y combustible diesel; y
- (b) la distribución, la logística y el potencial de **adulteración** de combustibles.

En el mundo en desarrollo, además de examinar las estrategias norteamericanas, europeas o japonesas para automóviles y camiones, es de particular importancia considerar la contribución de las emisiones de motocicletas y trirrodados equipados con motores de dos tiempos. Las limitaciones de diseño inherentes a estos vehículos llevan a emisiones extremadamente altas, en particular humo e hidrocarburos no quemados del uso excesivo de lubricante. El bajo nivel de octanaje requerido para estos motores también hace que sea fácil adulterar el combustible. En este sentido, los gobiernos de Taiwán y Tailandia han optado por prohibir esos motores de dos tiempos. Claramente, cualquier programa para eliminar los motores de dos tiempos debe incluir también normas para nuevas motocicletas y trirrodados, y debe brindar un marco temporal suficiente para el recambio de la flota. Aunque esas medidas son difíciles de tomar, y suelen ser impopulares por la necesidad de movilidad y el bajo costo de las motocicletas de dos tiempos, siguen siendo esenciales. En algunas áreas, esas medidas pueden ser la forma más efectiva de revertir la degradación de la calidad del aire urbano, dentro de un programa integral de gestión de la calidad del aire.

Marco para la asignación de prioridades de recursos

Una vez establecido el nivel de reducción de emisiones requerido, el organismo de gobierno competente debe evaluar los diferentes caminos posibles para lograr estas reducciones, y los costos asociados a cada camino. Si bien el análisis a continuación se centra en los costos y beneficios de la cambiante tecnología vehicular y en la reducción del azufre de los combustibles para automóviles, estos deben compararse con los costos y beneficios que se obtienen de controlar las emisiones de otras fuentes (por ejemplo, fuentes estacionarias).

El análisis debe tener en cuenta factores económicos y sociales, incluso los siguientes:

1. Disponibilidad de capital;
2. Cambios que puedan requerirse en la infraestructura;

3. Disponibilidad de recursos humanos y técnicos para implementar los cambios;
4. Disponibilidad de recursos humanos y técnicos necesarios para mantener los cambios; y
5. Futuros programas de control que pueden traducirse en costos de transición a la competencia.

Si bien todos los elementos enumerados son muy importantes para un análisis completo, el punto 4 es de particular importancia. Para que los programas de control sean eficaces, deben implementarse mecanismos de aplicación y capacidades técnicas adecuados. Por ejemplo, los vehículos nuevos solo producirán un bajo nivel de emisiones si existen normas sobre emisiones apropiadas y todos los vehículos nuevos las cumplen. Del mismo modo, los beneficios se perderán si no se mantienen adecuadamente los vehículos, o si se utilizan combustibles incorrectos (por ejemplo, gasolina con plomo).

Al priorizar recursos debe tenerse en cuenta que aunque la reducción del contenido de azufre puede reducir un poco las emisiones de las tecnologías actuales, el beneficio mayor se deriva del requisito de reducir los niveles de azufre para que los sistemas de control de emisiones más nuevos puedan operar en forma eficaz. Si los niveles de azufre en el combustible se han fijado demasiado alto, es posible ahorrar dinero inicialmente en inversiones en refinerías, pero esto tendrá como resultado mayores emisiones vehiculares y por lo tanto se dilapidarán los recursos invertidos en los sistemas de control vehicular. Por el contrario, si los niveles de azufre en el combustible se han fijado demasiado bajo, es posible que no se reduzcan significativamente las emisiones y se dilapide el capital invertido en modificaciones a las refinerías si el mercado local no dispone de vehículos con bajas emisiones, equipados con la tecnología apropiada.

Elaboración de estrategias de refinación y suministro

Con las tendencias actuales a especificaciones más estrictas tanto para gasolina como para combustible diesel, es importante que exista una estrategia a largo plazo para cumplir con estos objetivos. Se han elaborado muchos documentos estratégicos en diversos países y regiones en todo el mundo, y el siguiente resumen no intenta incluirlos a todos, sino solo describir algunas opciones para la implementación de esas estrategias. Dependiendo de las condiciones locales específicas, las soluciones probablemente serán exclusivas [ver por ejemplo ASEAN, 2002].

Además de las modificaciones a las refinerías, será necesario actualizar las instalaciones fuera de sitio para permitir una manipulación de estos productos con especificaciones más altas. Al realizar una evaluación completa será importante maximizar el retorno de la inversión, teniendo en cuenta el potencial de realizar remodelaciones a las refinerías que sean eficaces en función de los costos, los ahorros en energía y la apertura de nuevos mercados como parte de un análisis financiero general.

Análisis de opciones

Debe desarrollarse una estrategia de combustibles limpios del mismo modo que cualquier otro proceso de toma de decisiones sobre inversiones. Por lo general, los pasos que implica tal estrategia de desarrollo son los siguientes:

1. Definir los objetivos.
2. Desarrollar una amplia gama de ideas para posibles soluciones para cumplir con los objetivos, que podría incluir realizar sesiones de lluvia de ideas con el personal de las refinerías, licenciatarios y contratistas.
3. Exponer algunas opciones para ulterior consideración.
4. Evaluar el costo de las opciones y la viabilidad económica.
5. Recomendar una estrategia y acordar un camino a seguir, que puede incluir un "mapa de ruta" sobre inversiones.

Remitirse al [Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe](#), por el estudio de un caso sobre este tema.

Los objetivos de la refinería son, por lo general, producir combustibles limpios que cumplan con las especificaciones al menor costo posible y, al mismo tiempo, dar el mejor retorno a la inversión (ver Cuadro 1). Es importante reconocer que existen soluciones transaccionales para cada una de las opciones contempladas, que deberán desarrollarse teniendo en cuenta los diferentes aspectos relativos a la refinería específica. Se recomiendan los siguientes pasos, entre otros, para el análisis general de las opciones:

- Analizar las opciones de **importación** y/o exportación del **producto**;
- Considerar la **sustitución del crudo**, es decir, cambiando la razón de crudo procesado dulce a crudo procesado ácido;
- Aumentar las **inversiones en instalaciones fuera del sitio** en lugar de en nuevas unidades de procesamiento, a fin de maximizar el uso de las instalaciones existentes y brindar más flexibilidad para mezclas y logística; y
- Evitar inversiones innecesarias en la remodelación de instalaciones aprovechando las ventajas de las **sinergias de la inversión en refinería e intercambiando productos o componentes** con refinerías vecinas.

Consideraciones adicionales en cuanto a planificación

Al elaborar un "mapa de ruta" específico para disminuir el contenido de azufre en los combustibles pueden considerarse varios enfoques diferentes. Como se indicó anteriormente, estos incluirán desde la evaluación de la oferta de crudo y las necesidades de procesamiento de la refinería hasta la comercialización de productos y la logística. La Tabla 4 brinda una enumeración de los estudios técnicos recomendados que se requieren para examinar estos temas.

Cuadro 1: Posibles pasos para modificación de refinerías para reducir el contenido de azufre en el combustible diesel

Los siguientes pasos y la figura correspondiente intentan abarcar las lecciones aprendidas para realizar las inversiones en refinerías al incorporar paulatinamente combustibles con menor contenido de azufre. Estas etapas se aplican en particular a refinerías simples sin capacidad de hidrotratamiento o con una capacidad mínima de hidrotratamiento.

1. Cambiar a crudo con bajo contenido de azufre: este nivel no llegará a 500 ppm, pero podría llegar a 1000 - 2000 ppm.
2. Instalar un hidrotratador pequeño: el tamaño del mismo puede ser apropiado para el tratamiento de ~50% de la producción de la refinería. La combinación de esto con un cambio a crudo con menor nivel de azufre podría ser una estrategia útil. La fracción de destilación directa con mayor nivel de azufre (~1000 ppm) puede ser mezclada con la fracción que ha sido hidrotratada, produciendo así un producto final con un contenido de azufre de 350 a 500 ppm.
 - *Nota: cuando se tome una decisión futura para pasar a una especificación de nivel de azufre inferior, la refinería puede construir un segundo hidrotratador para operar en paralelo. De este modo la inversión de capital se realiza en etapas y brinda redundancia, ya que hay un hidrotratador disponible para cuando deban realizarse tareas de mantenimiento en el otro.*
3. Instalar un hidrotratador grande de alta presión: este podría incluir una unidad de procesamiento de alta presión de una sola etapa que podría producir productos con un contenido de azufre de 50 ppm o menos, dependiendo de la intensidad con la cual se opera. Si se dispone de financiamiento para esa unidad de alta presión podría construirse y operarse inicialmente con menos intensidad para producir productos con un contenido de azufre de 500 ppm, lo cual reduce los costos operativos iniciales hasta que se requieran combustibles con un menor contenido de azufre.
 - *Nota: para unidades de tamaño equivalente los costos operativos se asocian con el menor consumo de hidrógeno y el mayor tiempo del ciclo del catalizador (4-5 años en lugar de ~2 años para un nivel de azufre de 50 ppm).*
4. Instalar un hidrocraqueador - esta es la opción más cara (probablemente de cuatro a cinco veces más que un hidrotratador de alta presión). Esto se justificaría cuando sea necesario un aumento del rendimiento del diesel / queroseno.

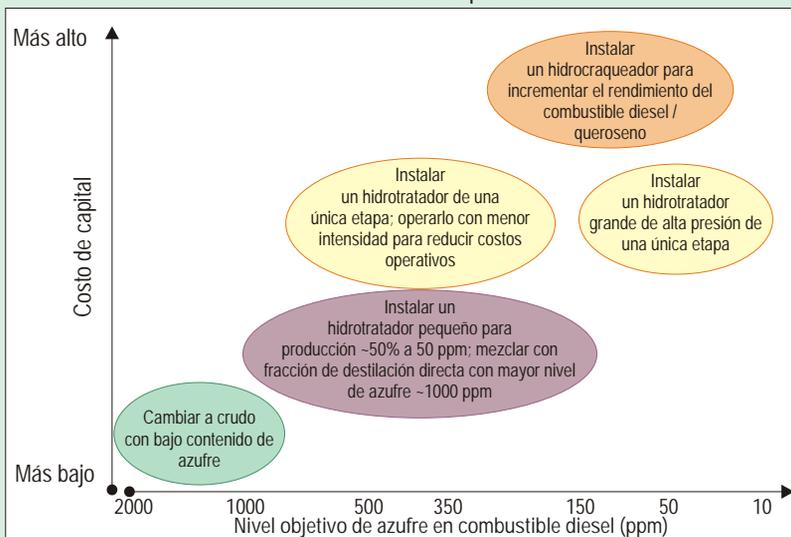


Tabla 4: Enumeración de potenciales estudios necesarios para elaborar un "mapa de ruta" de refinación a niveles de azufre inferiores

Área de estudio	Breve descripción
Planificación de refinerías	Estudios económicos para evaluar las opciones de procesamiento para una refinería dada. Estos estudios pueden abarcar cambios potenciales en la calidad de las materias primas y en las especificaciones de productos y evaluar el impacto potencial de los cambios en las unidades de procesamiento (a través de la remodelación o el agregado) y las opciones de mezcla de productos.
Opciones de remodelación	Estudios de diseño innovador para utilizar de la forma más eficaz posible la planta de procesamiento actual a fin de cumplir con las nuevas especificaciones de productos y maximizar la producción.
Gestión de hidrógeno	Estudios para determinar el uso óptimo del hidrógeno dentro de la refinería, que abarcan opciones de producción, recuperación y purificación, así como oportunidades de importación y exportación.
Eficiencia energética	Estudios para mejorar la eficiencia energética dentro de una unidad o complejo de procesamiento.
Evaluación de tecnología	Estudios de evaluación independientes para comparar las tecnologías disponibles (bajo licencia o no) para una aplicación particular.

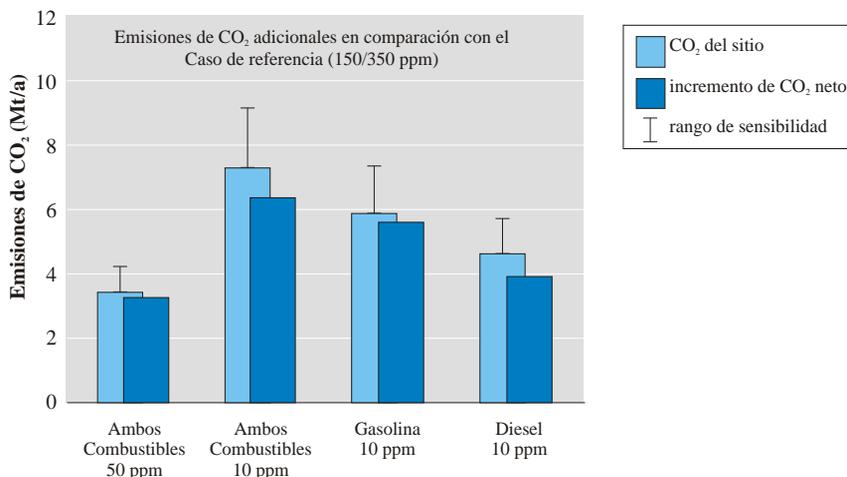
Impactos adicionales de la reducción del azufre del combustible

La reducción del contenido de azufre tiene un impacto significativo en otras diversas propiedades del combustible, algunas de las cuales implican temas relativos a la seguridad que deben tenerse en cuenta. Estos temas a considerar son, entre otros:

- **Uso de la energía.** La energía que se necesita para el procesamiento adicional y para producir el hidrógeno utilizado para quitar el azufre del combustible provocará emisiones de dióxido de carbono adicionales. La Figura 4 presenta la correlación entre las emisiones de dióxido de carbono adicionales y los diversos niveles de azufre en los combustibles para automóviles, en base a la evaluación de las refinerías de la UE con un punto inicial de 150/350 ppm de azufre en la gasolina/el combustible diesel, respectivamente [CONCAWE, 2005]. Cabe destacar que si bien esto representa la tendencia general, la magnitud del efecto dependería de las tecnologías actuales y las nuevas tecnologías para refinerías.

Figura 4: La reducción del azufre aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero de las refinerías

Fuente: Informe CONCAWE No 8/05 [CONCAWE, 2005]



- Pérdida de octanaje.** Además de quitar el azufre, el hidrotratamiento puede saturar una parte de los hidrocarburos olefínicos del combustible. En el caso de la gasolina, esto puede provocar la pérdida de octanaje, que debe ser reemplazado - una ineficiencia del proceso que incrementa su costo, además de provocar un consumo adicional de energía. El desarrollo de la tecnología de catalizadores y reactores está mejorando la eficiencia del tratamiento del azufre, minimizando de este modo estas pérdidas de octanaje. Ver [Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución](#), por más información sobre la pérdida de octanaje.
- Lubricidad.** Por el contrario, al aplicar el proceso de hidrotratamiento al combustible diesel hay una tendencia al aumento del número de cetano, con efectos beneficiosos. Sin embargo, esto también quitará una parte de la especie polar activa que brinda lubricidad al combustible. En términos simples, la lubricidad es la característica que impide el desgaste cuando dos piezas de metal que se mueven entran en contacto en el sistema de combustible. Desde la introducción del combustible diesel con bajo contenido de azufre en 1993, la industria automotriz, los usuarios y la industria del petróleo han realizado esfuerzos considerables para incorporar un "requisito de lubricidad" en el combustible diesel de uso comercial. Este fue un tema importante en Europa, y ahora se ha incluido un requisito de lubricidad en las especificaciones CEN europeas para combustible diesel y en las especificaciones ASTM de los E.U.A. En casos extremos, el hecho de

no especificar una norma de lubricidad para el combustible diesel puede provocar un desgaste excesivo de las bombas de inyección diesel. Hay métodos de referencia disponibles para medir la lubricidad, y pueden utilizarse aditivos para restaurar la lubricidad de ser necesario. Este efecto depende de la intensidad del hidrotratamiento y no se relaciona específicamente con un nivel de azufre particular, aunque por lo general NO es un problema para niveles de azufre superiores a 500 ppm.

- **Filtraciones en el sistema de combustible.** La reducción del azufre tiende a reducir los niveles de aromáticos en el combustible diesel. Los cambios grandes y repentinos en los aromáticos pueden producir filtraciones en el sistema de combustible en vehículos más viejos o con poco mantenimiento (esto ha ocurrido en California, Australia y hasta en Japón). El motivo es que los componentes de goma y plástico que se utilizan en los sistemas de combustible se hinchan en presencia de los aromáticos. Con el correr del tiempo estos componentes se mantienen en ese estado de modo tal que si el nivel de aromáticos se reduce, los componentes se encogen provocando filtraciones.
- **Electricidad estática.** La creación de electricidad estática durante el llenado de vehículos cisterna para transporte carretero o por vías férreas puede provocar la generación de chispas en el espacio vacío que queda por encima del combustible. Esto debe evitarse mediante buenas prácticas de manipulación, ya que constituye una seria amenaza a la seguridad. Para la gasolina pura, el espacio de vapor es demasiado rico en combustible como para permitir una explosión, y para el diesel es demasiado magro en combustible. Sin embargo, si se ha cambiado la carga de gasolina a diesel, puede ser inflamable y una sola chispa puede provocar una explosión devastadora. La reducción del contenido de azufre en los combustibles puede reducir la conductividad, por lo tanto las actividades de manipulación y puesta a tierra son todavía más importantes.

Un estudio europeo sobre el Riesgo de carga de combustible con bajo contenido de azufre ha confirmado que al cargar combustible diesel con bajo contenido de azufre (< 50 mg/kg) aumenta el riesgo de encendido electrostático. Por este motivo, deben tomarse las precauciones apropiadas para minimizar el riesgo, incluso la reducción de la velocidad de carga o el uso de un Aditivo Disipador Estático (SDA, por su sigla en inglés) en algunas circunstancias, en especial cuando se desconoce la conductividad del combustible. Como estos riesgos son bien conocidos, se han elaborado Directrices de la Industria [Código Modelo de la UE Parte 21; ASTM D 5865-98] para prácticamente eliminarlos, pero estas deben aplicarse en forma rigurosa.



El camino a emprender

Este documento pretende brindar información a los encargados de la toma de decisiones en países en desarrollo de todo el mundo que están abordando los temas de mejora de la calidad del aire y reducción del impacto relacionado con las emisiones vehiculares. IPIECA, sus empresas miembro y sus asociaciones regionales afiliadas han brindado aquí una recopilación de conocimientos técnicos y experiencias que provienen de muchos años de tratar estos temas en los países desarrollados (principalmente de la OCDE). El informe intenta analizar las opciones y estrategias que las naciones y regiones pueden considerar sin asumir que la misma solución es adecuada para cualquier lugar.

El desarrollo de estrategias de combustibles y vehículos limpios ha sido un tema clave en los países de la OCDE durante los últimos 20 años, o más, y ha tenido como resultado una considerable reducción en las emisiones vehiculares. Se prevé que estos mismos temas tengan preponderancia en los países en desarrollo en los próximos 10 años.

En el contexto de exploración de la potencial contribución de las emisiones vehiculares a la calidad del aire urbano, el informe brinda una breve descripción de la reducción que puede lograrse mediante tecnologías avanzadas y combustibles con niveles inferiores de azufre. Es importante reconocer la palabra "potencial", ya que ambas tecnologías para combustibles y vehículos son meramente "habilitadoras". Para contribuir realmente a mejorar la calidad del aire, estas tecnologías deben llevarse a las flotas de vehículos carreteros, y estas tecnologías avanzadas deben ser mantenidas, y su implementación debe hacerse cumplir en forma adecuada.

Al considerar la reducción gradual de los niveles de azufre en los combustibles, resulta esencial analizar las necesidades de inversiones de capital y los costos operativos en base a la configuración de las refinerías locales, las fuentes prevalentes de petróleo crudo y las especificaciones futuras previstas para los productos. Anteriormente en este documento se demostró que este análisis debe estar unido a la comprensión cabal de las reducciones de emisiones que pueden lograrse con cada nivel de azufre y su impacto en el objetivo integral en cuanto a la calidad del aire local. Es en este contexto que deberán tomarse las decisiones finales referentes al nivel de azufre deseado.

El siguiente paso en el desarrollo de la estrategia es evaluar los aspectos económicos, tanto en cuanto a mercado como en cuanto a tecnología, y elaborar "mapas de ruta" coherentes para su implementación. Es importante subrayar el hecho de que en los países de la OCDE, los sistemas de producción y comercialización de combustible están operados por lo general por la industria privada. Esto no es así en el mundo en desarrollo, donde los gobiernos asumen una función más activa en la producción y la distribución de productos energéticos. Sin embargo, ni siquiera las empresas públicas pueden ignorar las realidades comerciales, y los países

no deben caer en quiebra intentando obligar a una adopción prematura de tecnologías inapropiadas y no factibles desde el punto de vista económico. Al mismo tiempo, la sociedad debe centrar sus recursos financieros en el abordaje de las mejoras necesarias en la calidad del aire, en un nivel acorde a la gravedad del problema y a la necesidad de proteger la salud y el bienestar de sus habitantes.

IPIECA y sus empresas miembro esperan tener la posibilidad de continuar realizando aportes al diálogo mundial en curso sobre estos temas y brindar experiencia adicional según sea necesario. Por su parte, IPIECA y sus empresas miembro continuarán mejorando la eficacia de las tecnologías de refinación, y también trabajarán con todos los grupos de interés para abordar temas que se ubiquen específicamente dentro del dominio público. Dichas áreas pueden incluir la elaboración de normas relativas a combustibles y vehículos, programas de inspección y mantenimiento de vehículos, retiro de los vehículos más viejos y reconversión tecnológica apropiada, por mencionar solo algunas. El uso de estos enfoques combinados para tratar con vehículos tanto nuevos como en uso garantizará estrategias óptimas para la reducción de las emisiones, facilitadas por la reducción del nivel de azufre en los combustibles utilizados para el transporte.

Referencias

API, 2000. *An Assessment of the Potential Impacts of Proposed Environmental Regulations on US Refinery Supply of Diesel Fuel*. Preparado para API por Charles Rivers & Associates. Informe No D02316-00. Washington D.C., agosto de 2000.

ARPEL, 1999. *Impactos del cambio de combustibles en las operaciones de refinerías y las emisiones atmosféricas*. Informe No ARPELCIDA03AEREP0799. ARPEL, Montevideo, Uruguay. Junio de 1999.

ARPEL, 2000. *Opciones de estrategias de control de emisiones atmosféricas*. Informe No ARPELCIDA03AEREP082000. ARPEL, Montevideo, Uruguay, mayo de 2000.

ARPEL, 2003. *Tecnología vehicular, calidad del combustible y aspectos normativos: de dónde venimos y hacia dónde vamos*. Informe No 14-2003, ARPEL. Montevideo, Uruguay, Octubre de 2003.

ARPEL, 2003. *Desarrollos en el área de tecnología vehicular y combustibles desde el año 2000 en adelante*. Informe No 15-2003, ARPEL, Montevideo, Uruguay, octubre de 2003.

ARPEL, 2004. *Taller de ARPEL: Presente y futuro del negocio de refinación en América Latina y el Caribe*. Informe de Resumen y Conclusiones ARPEL, Montevideo, Uruguay, junio de 2004.

ASEAN, 2002. 'Developing Strategies to Meet the Latest Clean Fuels Specifications'. Propuesta de estrategia de refinación elaborada por Foster Wheeler, 2002.

ASTM D 4865-98, *Standard Guide for Generation and Dissipation of Static Electricity in Petroleum Fuel Systems*.

Benson, J.D. *et al.*, 1998. 'Effects of Gasoline Sulfur Level on Mass Exhaust Emissions-Auto/Oil Air Quality Improvement Programme', Documento SAE No 912323. (Ver también documentos SAE 932727 y 932728)

CARB, 1988. *Proposed Adoption of Regulations Limiting The Sulfur Content and the Aromatic Hydrocarbon Content of Motor Vehicle Diesel Fuel*. State of California Air Resources Board, Informe D 43. Sacramento, California, Estados Unidos de América. Octubre de 1988.

CARB, 1988. *Technical Support Document for Proposed Adoption of Regulations Limiting The Sulfur Content and the Aromatic Hydrocarbon Content of Motor Vehicle Diesel Fuel*. State of California Air Resources Board, Informe D 44. Sacramento, California, Estados Unidos de América. Octubre de 1988.

CARB, 1989. *Public Hearing to Consider the Adoption of Regulations Limiting The Sulfur Content and the Aromatic Content of Motor Vehicles Diesel Fuel: Final Statement of Reasons for Rulemaking, Including Summary of Comments and Agency Responses*. State of California Air Resources Board, Informe D 46. Sacramento, California, Estados Unidos de América. Agosto de 1989.

CONCAWE. 2000. Response to EU Commission 'Call for Evidence' on ultra low sulphur fuels. Julio de 2000.

CONCAWE, 2000. *Consultation on the need to reduce the Sulphur Content of Petrol and Diesel Fuels Below 50 parts per million*. EUROPIA and CONCAWE submissions. Bruselas, Bélgica. Julio de 2000.

CONCAWE, 2002. *Sulphur Dioxide Emissions from Oil Refineries and Combustion of Oil Products in Western Europe and Hungary (1998)*. Informe No 10/02, Bruselas, Bélgica. Diciembre de 2002.

CONCAWE, 2003. *Fuel Effects on Emissions from Modern Gasoline Vehicles: Part I-Sulphur Effect*. Informe No 5/03, Bruselas, Bélgica. Julio de 2003.

CONCAWE, 2005. *The impact of reducing sulphur to 10 ppm max in European automotive fuels*. Informe No 8/05, Bruselas, Bélgica. Agosto de 2005.

DECSE, 2001. Diesel Emissions Control-Sulfur Effects Project (DECSE). Resumen de Informes. US DOE National Renewable Energy Laboratory. Junio de 2001.

http://clubs.csumb.edu/sec/decse_summary_reports.pdf

ENSTRAT, 2004. *The Emission Reduction Potential of Low Sulphur Diesel Fuels in Asian Countries*.

Comisión Europea. Código modelo IP Parte 21. (Ver también documento técnico CENELEC R044 sobre riesgo de electricidad estática.)

EPEFE, 1995. *European Programme on Emissions, Fuels and Engine technologies*. ACEA y Europa. Informe final. Diciembre de 1995.

HEI, 2003. 'Research on Diesel Exhaust and Other Particles'. Health Effects Institute. Boston, Estados Unidos de América Octubre de 2003. <http://www.healtheffects.org/Pubs/DieselProgrSumm2003.pdf>

Hochhauser, A.M. *et al.*, 2006. 'Impact of fuel sulphur on gasoline and diesel vehicle emissions'. Documento SAE 2006-01-3370.

NPC, 2000. *US Petroleum Refining: Assuring the Adequacy and Affordability of Cleaner Fuels*. National Petroleum Council. Washington D.C., Estados Unidos de América, Junio de 2000.

LePera, M.E., 2000. 'Low Sulfur and Diesel Fuel Lubricity-The Continuing Saga'. LePera & Associates para el Ejército de los Estados Unidos. Julio de 2000. <http://usapc.army.mil/miscellaneous/Lubricity.doc>

PAJ, 2004. *Revisión Anual 2003*. Petroleum Association of Japan. Tokyo, Japón. Marzo de 2004.

Rickeard, D.J. *et al.*, 2003. 'Fuel effects on emissions from modern gasoline vehicles Part 1-Sulphur effects'. Informe CONCAWE 5/03.

Schaefer, R. J., 2003. 'Success of Diesel Retrofits: A Fuel Supplier Perspective'. Presentación en el Subcomité de Revisión Técnica de Fuentes Móviles de la EPA, diciembre de 2003.

Schaeffer, A, 2004. *Clean Diesel Technology: Progress and Potential*. AWMA Environmental Management Magazine, mayo de 2004.

Schleyer, C.H. *et al.*, 1998. 'Effect of fuel sulfur on emissions in California low emission vehicles'. Documento SAE No 980236.

Thompson, Neville *et al.*, 2004. 'Fuel Effects on Regulated Emissions from Advanced Diesel Engines and Vehicles'. Documento SAE No 2004-01-1880.

UOP, 2004. Increase the value of your Light Cycle Oil (LCO), by Dr Vasant Thakkar. UOP Technology & More Newsletter, 2004.

Banco Mundial, 2004. 'Reducing Air Pollution from Urban Transport'. Ken Gwilliam, Masami Kojima, Todd Johnson. Banco Mundial, junio de 2004

Consejo de Comercio Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD), 2004. 'Mobility 2030'. Julio de 2004.

Glosario

ASTM

American Society for Testing and Materials: organismo normativo sobre las propiedades del combustible y los métodos de prueba aplicables.

Azufre

Elemento amarillento, no metálico, a veces conocido como sulfuro, que se encuentra presente en forma natural en el petróleo crudo.

Barril

Unidad volumétrica de medición utilizada para el petróleo crudo y productos petroquímicos. Un barril equivale a 42 galones estadounidenses, 35 galones imperiales o 159 litros.

Catálisis

Alteración de la velocidad de una reacción química por la presencia de una sustancia "foránea" (catalizador) que permanece relativamente incambiada al final de la reacción.

Catalizador

Sustancia que ayuda o promueve una reacción química sin formar parte del producto final. Permite que la reacción se produzca más rápidamente o a una temperatura inferior y permanece relativamente incambiada al final de la reacción. Sin embargo, en los procesos industriales, el catalizador debe reemplazarse en forma periódica para mantener la producción económica.

Combustible destilado

Clasificación general para una de las fracciones del petróleo producido en operaciones de destilación convencionales con un punto de ebullición de 175-350 °C (350-650 °F). Se utiliza principalmente para combustible para motores diesel para vehículos carreteros y no carreteros, calefacción y generación de energía eléctrica. Se incluyen los productos conocidos en los Estados Unidos de América como fuel oil No 1, No 2 y No 4; y combustibles diesel No 1, No 2 y No 4.

Compuestos oxigenados

Sustancia que, al agregarse a la gasolina, aumenta el contenido de oxígeno en la mezcla de gasolina.

Contenido de azufre ultra-bajo

En los Estados Unidos de América, se considera que el "azufre ultra-bajo" es <15 ppm, y en Europa <50 ppm, mientras que el término "libre de azufre" se refiere, en general, a un contenido de azufre <10 ppm. En este documento, "azufre ultra-bajo" significa <50 ppm, y "libre de azufre" significa <10 ppm.

Craqueo catalítico de fluido

Proceso de refinación que consiste en dividir las moléculas de hidrocarburo más grandes, pesadas y complejas en moléculas más simples y livianas. El craqueo catalítico se logra utilizando un agente catalítico, y es un proceso eficaz para incrementar el rendimiento de la gasolina del petróleo crudo.

Destilación atmosférica

Proceso de refinación para separación de los componentes del hidrocarburo a presión atmosférica calentando a temperaturas de 300-400 °C (600-750 °F) y condensando posteriormente las fracciones por enfriamiento.

Destilación directa

Descripción que se aplica a un producto de petróleo crudo que ha sido hecho por destilación, sin conversión química.

Diesel

"Diesel" es el nombre común para el gasoil para automóviles - Ver "Gasoil".

Diesel para vehículos carreteros

Combustible utilizado para transporte por carretera principalmente de automóviles, camiones y autobuses.

Diesel para vehículos no carreteros

Combustible utilizado generalmente para granjas, construcción, transporte marítimo y por vías férreas.

EGR

Recirculación de gas de escape

Fuel oil residual

Hidrocarburos pesados que permanecen después de que se destilaron el fuel oil y los hidrocarburos más livianos en las operaciones de refinería. Se utiliza para la calefacción comercial e industrial y la generación de electricidad, así como para suministrar energía a los buques.

Gasoil

Fracción de destilación media de la cual no más del 50% por volumen se destila a temperaturas inferiores a 240 °C (460 °F), y más del 50% por volumen se destila a temperaturas inferiores a 340 °C (640 °F).

Gasolina para motor (terminada)

Mezcla compleja de hidrocarburos volátiles, con o sin pequeñas cantidades de aditivos, que han sido mezclados para formar un combustible apropiado para motores de encendido a explosión. La "gasolina para motor" incluye gasolina para motor reformulada, gasolina para motor oxigenada y otras gasolinas para motor terminadas.

Hidrocarburo

Clase de compuestos químicos orgánicos compuestos de hidrógenos y carbono, que podrían estar en fase gaseosa, líquida o sólida en condiciones ambientales. La estructura molecular de los hidrocarburos varía de la más simple (por ejemplo, metano, un componente del gas natural) a la más pesada y compleja, como en el petróleo crudo.

Hidrocraqueo

Proceso utilizado para convertir un destilado al vacío en combustibles para transporte, por ejemplo, gas oil, mediante un catalizador y a temperatura y presión parcial de hidrógeno altas. Es un proceso eficaz para aumentar el rendimiento del diesel y del combustible para aviones a partir del petróleo crudo.

Hidroprocesamiento

Proceso de refinación que utiliza hidrógeno y catalizadores a alta presión para convertir el material de ebullición media o el material residual en gasolina de alto octanaje, solución stock para carga del reformador, combustible para aviones y/o fuel oil de alto grado. El proceso utiliza uno o más catalizadores, dependiendo del producto, y puede manejar materias primas con alto contenido de azufre sin desulfuración previa.

Hidrotratamiento

Procesos que convierten o quitan componentes no deseados mediante el uso de catalizadores e hidrógeno. Incluye la HDS (hidrodesulfuración), que se refiere a la remoción del azufre.

I&M

Abreviatura de "Inspección y mantenimiento" de vehículos, un programa normalizado de inspección vehicular diseñado para certificar a los vehículos en forma anual (o periódica) en cuanto a la aptitud/seguridad para el uso y su desempeño ambiental. Por lo general es implementado por las autoridades gubernamentales.

Materias primas

Material con el cual se alimenta una unidad de procesamiento. El término abarca tanto materias primas como crudos e intermedios. También puede abarcar petróleo base y aditivos, aunque estos podrían ser el producto de algunos procesos.

Material particulado (MP)

Término inclusivo utilizado para designar partículas sólidas suspendidas y pequeñas gotas líquidas que se encuentran en fuentes de emisiones y en la atmósfera ambiente. El material formado por partículas por lo general se clasifica por su tamaño, por ejemplo, MP10 se refiere a partículas con un diámetro promedio no superior a 10 micrómetros.

Nafta

Término por lo general restringido a una clase de mezclas de hidrocarburos líquidos incoloros, volátiles e inflamables. Se obtiene como una de las fracciones más volátiles en la destilación fraccionada del petróleo (cuando también se conoce como nafta del petróleo).

NLEV

National Low Emission Vehicle Program - Programa Nacional de Vehículos con Bajo Nivel de Emisiones (Estados Unidos de América)

NO_x

Óxidos de nitrógeno, incluyen principalmente la suma de óxido nítrico y dióxido de nitrógeno (NO + NO₂).

Octanaje

Medida de la calidad de detonación de la gasolina. Cuanto más alto es el número de octanaje, más alta será la resistencia a la detonación del motor.

Partida segregada

Cantidad de producto que no se mezcla con ninguna otra partida de producto; el transportista recibe las mismas moléculas que se enviaron. Esto puede ser necesario por las características exclusivas de un producto o por consideraciones ambientales.

Petróleo crudo

Parte del petróleo que existe en la fase líquida en reservorios subterráneos naturales y permanece en estado líquido en condiciones atmosféricas de presión y temperatura. El petróleo crudo puede incluir pequeñas cantidades de no hidrocarburos producidos con los líquidos.

PPM

Partes por millón, puede utilizarse tanto para peso como para volumen.

Queroseno

Fracción destilada de la cual más del 50% en volumen se destila a una temperatura inferior a 240 °C (460 °F).

Reformado catalítico

Proceso catalítico de deshidrogenación y cierre del anillo de los componentes de la gasolina para elevar el octanaje de la gasolina resultante. El subproducto hidrógeno suele utilizarse en las refinerías para el hidrogenación.

Transmezcla

Interfaz que ocurre entre partidas de productos de grados incompatibles y que no puede ser absorbida en partidas adyacentes.

Documento Complementario A:

Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas (estudio de un caso)

Antecedentes

Muchos gobiernos nacionales y municipales de Asia están manifestando cada vez mayor interés por la calidad de aire, ya que en diversas ciudades hay altos niveles de contaminación. En respuesta a esta situación, diversas organizaciones han establecido una "Iniciativa del Aire Limpio para Ciudades Asiáticas" (CAI-Asia)¹; a fin de implementar un intercambio de información y experiencias más estructurado entre todos los países de Asia. Esta iniciativa está patrocinando diferentes estudios de evaluación de la calidad del aire en diversas ciudades asiáticas y buscando estrategias para reducir las emisiones. Uno de estos estudios fue emprendido por Enstrat International Ltd con el objetivo de comprender mejor las emisiones actuales de los vehículos a combustible diesel y las opciones para su reducción [Enstrat, 2004].

El estudio consideró tres ciudades específicas, Bangkok, Bangalore y Manila, usando el modelo de inventario de emisiones de IPIECA [IPIECA, 2001], también conocido como IPIECA Toolkit. El modelo se basa en los factores de emisiones vehiculares europeos utilizados en el programa Iniciativa del Aire Limpio para Europa (CAFÉ, por su sigla en inglés)². Como la mayoría de los vehículos en las ciudades asiáticas son de origen japonés, pero similares en tamaño y tipo a los vehículos que se venden en Europa, este modelo resulta apropiado para esas ciudades. Además, la información detallada sobre el parque automotor que se necesita para el modelo estaba disponible para estas tres ciudades, junto con el millaje vehicular promedio anual, desglosado por transporte urbano, suburbano y carretero, incluso las velocidades promedio para una de estas formas de transporte. Se formularon hipótesis para el incremento y el reemplazo del parque automotor hasta 2020.

El modelo permite la simulación de diferentes niveles de control de emisiones vehiculares utilizando factores de emisiones apropiados. Se simularon los efectos de la calidad del combustible, incluso con niveles de azufre inferiores a 500 ppm, utilizando ecuaciones desarrolladas en el programa EPEFE [EPEFE, 1999]. Para simular el efecto de niveles de azufre superiores en emisiones de partículas, se asumió que un 3% del azufre del combustible formaría sulfato (un promedio entre los datos de los Estados

¹ www.cleanairnet.org/caiasia/1412/channel.html

² Base de datos COPERT III desarrollada en Noviembre de 2000

Documento Complementario A: Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas

Unidos de América y de Europa, que sugieren 2% y 4%, respectivamente). Se simuló el efecto de los programas de Inspección y Mantenimiento (I&M) avanzados reduciendo los números de los grandes emisores y reduciendo el desempeño de los vehículos en cuanto a la degradación de emisiones con el tiempo, lo cual se incorpora en el modelo. También se realizaron estudios de sensibilidad para parámetros como kilómetros conducidos, velocidad del tráfico y crecimiento de la flota vehicular.

Simulación de ciudad hipotética

Además de estas tres ciudades específicas, todas las cuales han implementado cierto nivel de control de las emisiones vehiculares y de la calidad del combustible en base a la legislación de la Unión Europea, el estudio desarrolló también un inventario para una ciudad asiática "hipotética", en base a poblaciones vehiculares de acuerdo con las de las tres ciudades conocidas, pero sin controles de emisiones implementados. Dicha ciudad hipotética puede utilizarse para comparar los efectos de:

- Introducir nuevos controles de emisiones vehiculares en diversos niveles;
- Reducir el nivel de azufre en el combustible;
- Implementar un esquema de Inspección y Mantenimiento.

Para comparar estos efectos, podemos estudiar la masa total de emisiones de NO_x y material particulado (MP) de la flota de vehículos diesel en 2020, después de un sustancial crecimiento del parque automotor a 2 millones de vehículos (de los cuales 800.000 son vehículos diesel), con diversos controles de emisiones introducidos en 2005. La Figura A1 presenta el desglose de esta flota de vehículos hipotética.

Análisis de los resultados

En la Figura A2 se comparan los efectos de la reducción del contenido de azufre, implementando los límites de emisiones europeos y los programas de I&M. Los casos donde se indica "ninguno" y los controles de emisiones Euro I son los "Casos Base", y todos los vehículos están en estos niveles al iniciar. Los otros casos suponen la introducción de diferentes límites de emisiones, considerando que todos ellos se inician en 2005, con un subsiguiente incremento del número de vehículos con emisiones controladas.

Esto muestra claramente que la reducción del contenido de azufre de 5000 a 50 ppm por sí sola tiene poco efecto en las emisiones, menos del 5% para los vehículos sin controles de emisiones, mientras que la introducción de los controles de emisiones vehiculares Euro II o Euro III, junto con la reducción del azufre para que estos controles funcionen de forma eficaz, reducirán las emisiones de NO_x en más de 60%. La introducción de un esquema de I&M presenta un pequeño beneficio adicional.

Documento Complementario A: Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas

Figura A1: Parque automotor de ciudad asiática hipotética en 2020

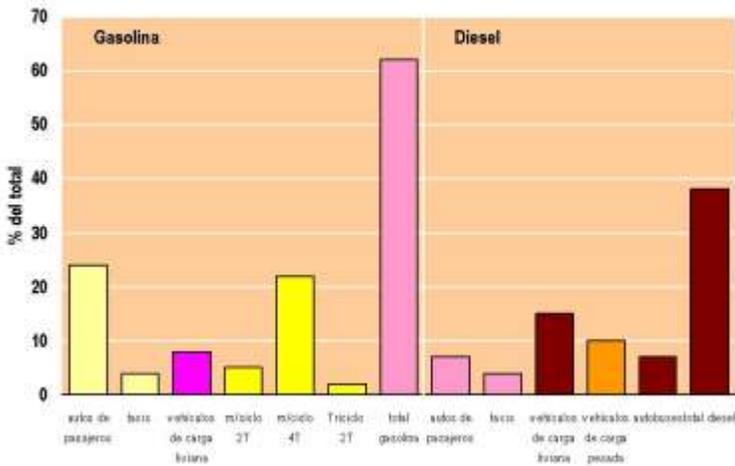
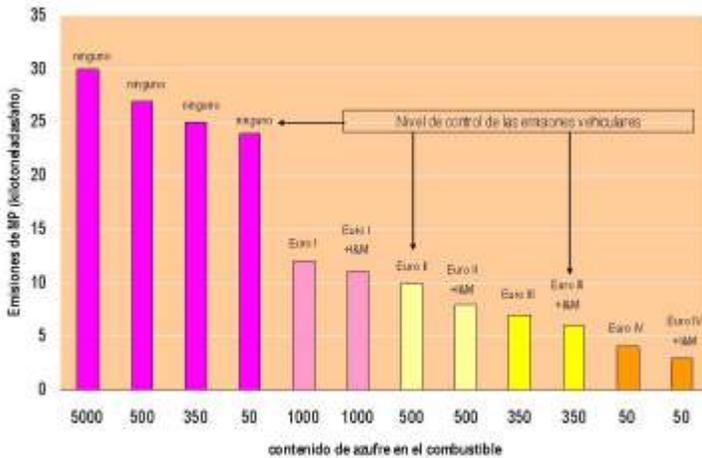


Figura A2: Efectos de los controles de emisiones vehiculares, del contenido de azufre en el combustible y de los programas de I&M en las emisiones de NOx de una ciudad asiática hipotética en 2020



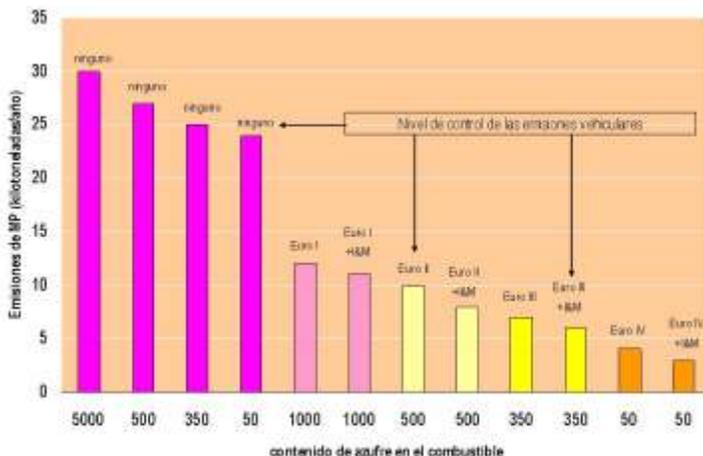
Documento Complementario A: Reducción de emisiones de diesel en ciudades asiáticas

La Figura A3 muestra una imagen similar de las emisiones de MP. Como aproximadamente el 30% del MP consiste en sulfato, la reducción del azufre, en especial de 5000 ppm a 500 ppm, no constituye una reducción significativa en el total de MP. Hay una reducción general de 18% del caso base a 50 ppm, pero la mayor parte del beneficio (13%) proviene de la reducción inicial a 500 ppm. Sin embargo, una vez más, la reducción principal de las emisiones proviene de la introducción de controles de las emisiones vehiculares, por ejemplo, Euro III con 350 ppm S reduciría las emisiones en 75%. La introducción de un esquema de I&M reduciría las emisiones otro 5%.

Conclusiones

Estos cálculos de inventario de emisiones hipotéticos son ejemplos de lo que debería hacerse para cualquier ciudad o país donde se está analizando el control de emisiones, aunque por supuesto, deben considerarse además las emisiones de vehículos a gasolina y de otras fuentes. Es necesario enfatizar que para muchas ciudades asiáticas las emisiones de motocicletas y trirrodados (con motores de 2 y 4 tiempos) pueden constituir un aporte significativo al total de emisiones, aunque por lo general no se incluyen en las evaluaciones tecnológicas que se basan en normas de emisiones europeas o estadounidenses. Sin embargo, lo que resulta indudable de este estudio y de otros estudios similares realizados en otras partes del mundo, es que la reducción del contenido de azufre en el combustible sin introducir los límites a las emisiones vehiculares correspondientes solo constituye una pequeña reducción de las emisiones del sector.

Figura A3: Efectos de los controles de emisiones vehiculares, del contenido de azufre en el combustible y de los programas de I&M en las emisiones de MP de una ciudad asiática hipotética en 2020



Documento Complementario B:

Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

Vehículos a gasolina

Los principales contaminantes a considerar de los vehículos a gasolina son el monóxido de carbono, los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno. Los vehículos introducidos a mediados de la década del 70 en los Estados Unidos de América y Japón tenían catalizadores de oxidación simples que oxidaban el CO y el HC no quemados pero no controlaban el NOx. A principios de los 80 se utilizaban algunos **catalizadores de oxidación** para reconversión en diversos países europeos.

Los **catalizadores de tres vías** se introdujeron a principios de los 80 y desde entonces se han utilizado en forma casi universal para controlar las emisiones de los vehículos a gasolina. Además de la oxidación del CO y el HC, los catalizadores de 3 vías utilizan parte del CO y el HC no quemados para convertir el NOx nuevamente en nitrógeno. Esto significa que deben trabajar exactamente en la relación estequiométrica (químicamente correcta) de aire/combustible, donde la eficacia de la conversión supera ampliamente el 90%. Los catalizadores de tres vías han sido objeto de mejoras significativas en cuanto a eficacia y durabilidad con el correr de los años. De hecho, los últimos sistemas de catalizadores producen muy bajos niveles de emisiones y están certificados en los Estados Unidos de América como Vehículos de Emisiones Súper Ultra Bajas (SULEV, por su sigla en inglés). Para lograr estos niveles se requiere un catalizador de avanzada, inyección correcta de combustible y un sofisticado sistema electrónico de control del motor.

El azufre ha sido vinculado al plomo de la gasolina porque degrada el rendimiento de los catalizadores. Sin embargo, hay importantes diferencias, ya que el efecto del azufre es reversible y el del plomo no. El plomo en la gasolina degrada en forma severa e irreversible el rendimiento del catalizador (de 3 vías y de oxidación). A diferencia del plomo, el azufre en la gasolina reduce la eficacia de los catalizadores convencionales en cuanto a la conversión de CO, HC y NOx en unos pocos puntos porcentuales. Sin embargo, esta reducción en la eficacia de la conversión puede revertirse totalmente haciendo funcionar al catalizador en condiciones de alta temperatura, ricas en combustible (es decir, conduciendo a alta velocidad) con combustible con bajo contenido de azufre.

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

El efecto del azufre en las emisiones vehiculares con catalizadores de 3 vías ha sido estudiado en diversos programas de prueba. En el programa EPEFE europeo, la disminución del contenido de azufre de 382 mg/kg a 18 mg/kg logró una reducción lineal de las emisiones de CO, HC y NO_x de 8-10% durante el ciclo de prueba europeo [EPEFE, 1995]. En los Estados Unidos de América se han llevado a cabo varios programas, incluso el Programa de Investigación para Mejora de la Calidad del Aire (AQIRP, por su sigla en inglés) que se centró en los vehículos con tecnología de fines de la década de los 80. El AQIRP mostró que una reducción de los niveles de azufre en la gasolina de 450 mg/kg a 50 mg/kg bajaba las emisiones de los escapes entre 10-15% [Benson, 1996]. Se realizaron estudios más recientes en vehículos de emisiones bajas (LEV, por su sigla en inglés) de modelos del año 1997, y en una extensión a vehículos LEV de modelos de 1999 [Schleyer, 1998]. Los resultados promedio para la flota de estos vehículos de California de 1997 y 1999 mostraron un mayor porcentaje de respuesta al azufre en el combustible que los estudios anteriores, en particular en lo que refiere al NO_x.

Esto se interpretó como que la sensibilidad al azufre aumentaría en los niveles de emisiones más bajos. Sin embargo, un análisis realizado por CONCAWE mostró que los resultados de la flota de LEV de California estuvieron fuertemente influenciados por un pequeño número de camiones livianos con alto nivel de emisiones, que mostró un gran efecto del azufre. Muchos de los otros LEV mostraron baja sensibilidad al azufre. Datos recientes de Europa [Rickeard, 2003] y los Estados Unidos de América [CRC, 2004] muestran que los vehículos más nuevos no son más sensibles al azufre que la tecnología más vieja. Un reciente estudio de SAE [Hochhauser et al., 2006] contiene un análisis completo de la respuesta de las emisiones al contenido de azufre. En ese documento se analizan otros temas, como la antigüedad de los catalizadores, la reversibilidad, el impacto del azufre en los programas de inspección y mantenimiento, y los efectos a largo plazo. La Figura B1 muestra el impacto del azufre en las emisiones provenientes de los escapes en diversos tipos de tecnologías vehiculares de los Estados Unidos de América y Europa, desde 1989 hasta 2001. Por motivos de simplicidad y brevedad, la figura se centra en el NO_x, aunque las tendencias son similares para el HC y el CO. La figura muestra claramente que las principales reducciones en las emisiones se obtienen al pasar de emisiones de motores no controladas a escapes controlados con catalizadores de 3 vías, lo que se hace posible quitando el plomo de la gasolina. Pueden lograrse pequeñas reducciones adicionales en las emisiones (CO, HC, NO_x) con una reducción del contenido de azufre. También muestra que los estudios de LEV de 1997 y 1999 muestran índices de sensibilidad al azufre mucho más altos que otros programas, a causa del impacto de unos pocos vehículos muy sensibles, como se indicó anteriormente.

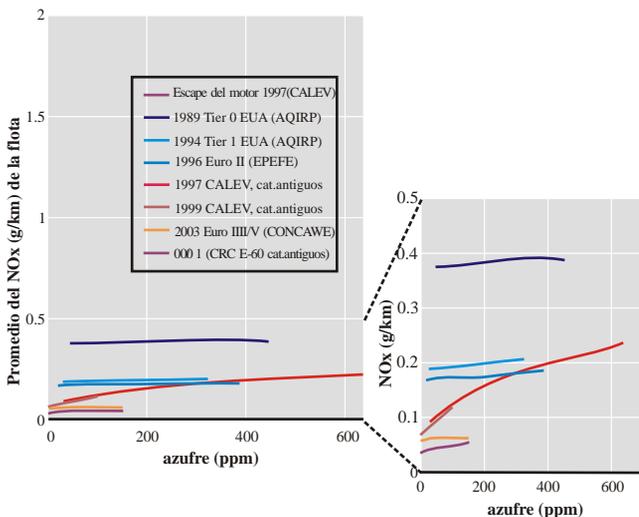
Los niveles de azufre en la gasolina se han reducido a 30 (Estados Unidos de América) y 50 (Europa y Japón) mg/kg, para permitir que los vehículos más modernos con un bajo nivel de emisiones (Estados Unidos de América Tier 2,

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

Euro 4) funcionen con la mayor eficacia posible. Sin embargo, es claro que estos catalizadores de avanzada de 3 vías aun funcionan en forma satisfactoria, aunque con una eficacia levemente reducida, con niveles de azufre relativamente altos, de hasta 500 ppm.

En 2005, Europa y Japón redujeron aún más el contenido de azufre, hasta alcanzar las 10 ppm, a fin de posibilitar un uso más eficiente de los motores de **inyección directa de mezcla pobre** (LDI, por su sigla en inglés), cuyo objetivo es mejorar la economía del combustible y reducir las emisiones de CO₂. Esos motores requieren dispositivos de postratamiento que funcionen con una relación aire/combustible de mezcla pobre, donde un catalizador convencional de 3 vías no controlará las emisiones de NOx. Muchos de los sistemas de postratamiento que se están desarrollando para LDI (catalizadores o purgadores pobres de NOx) son extremadamente sensibles al azufre y requieren un combustible esencialmente sin azufre. La principal razón para requerir gasolina sin azufre (<10 ppm S) en Europa y Japón fue facilitar la introducción de esta tecnología. Sin embargo, la tecnología LDI es solo una de las diversas tecnologías que pueden mejorar la economía del combustible, y recientemente la penetración de la LDI prácticamente se ha detenido en Europa y Japón porque es menos eficaz en función de los costos que otras tecnologías. Hay dudas sobre si la tecnología LDI se extiende o no fuera de Europa y Japón, en especial porque todavía no ha logrado llegar a los niveles de emisiones extremadamente bajos que se han logrado con los catalizadores de 3 vías que operan en relaciones estequiométricas de aire-combustible (SULEVs). Los países en desarrollo podrían aprender de la experiencia con la LDI en Europa y Japón y evitar adoptar este tipo de tecnologías emergentes que requieren nuevos combustibles hasta que estas estén ampliamente disponibles.

Figura B1: Efecto del contenido de azufre en emisiones de NOx en motores a gasolina: comparación de diversos estudios



Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

En la Tabla B1 se enumeran las diversas tecnologías aplicadas a los motores a gasolina, se resume su eficacia y su sensibilidad al azufre y se brindan los niveles de azufre “apropiados” para los países en desarrollo que deseen introducir esta tecnología.

Limite de emisiones	Sistema de control	Características	Uso	Eficacia			Efecto del azufre	Ahorro en el combustible	Limite normativo de S (mg/kg)	Limite de S apropiado
				CO	HC	Nox				
UE-ECE pre-1990 EUA pre 1975	Sin controles	No hay control de emisiones más allá de las características de diseño del motor. El motor puede funcionar con mezcla pobre con carga parcial.	Estados Unidos de América y Japón antes de 1975, Europa antes de mediados de los 80.	0	0	0	Ningún efecto.	0	1000	1000
EUA CAA 1975 Japón 1975	Catalizador de oxidación	Oxida el CO y el HC. El motor puede funcionar con mezcla pobre con carga parcial.	Autos estadounidenses y japoneses en los 70y principios de los 80. Algunas reconversiones europeas.	✓	✓	0	El azufre reducirá la eficacia de la conversión, pero no hay datos disponibles sobre la magnitud del efecto.	0	1000	500-1000
Euro I-III EUA CAAA Tier 1 Japón 1978	Catalizador de 3 vías	Oxida el CO y el HC y en forma simultánea reduce el NOx. Funciona solo en la relación estequiométrica de aire/combustible exacta. Necesita sensor de oxígeno, sistema de inyección de combustible y sistema electrónico de control del motor para lograr el control preciso de la relación de aire/combustible.	Utilizado universalmente en todos los motores a gasolina en EUA., Japón y Europa desde mediados/ines de los 80, y en muchos otros países.	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	Los fabricantes recomiendan un máximo de 500mg/kg. El uso por encima de este nivel es común. Sin embargo, el incremento del azufre reducirá la eficacia del catalizador. Varios estudios muestran diferentes efectos: EPEFE mostró un 10% de incremento en las emisiones para 382 vs 18 mg/kg S.	-	UE 500 EUA 1000 UE -3 150	500-1000
Euro IV EUA Tier 2 LEV, SULEV	Catalizador de 3 vías	Al igual que arriba, también con OBD, para diagnosticar por si mismo las fallas.	Estados Unidos de América y Europa desde 2004-5.	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓	Algunos estudios de los EUA han mostrado efectos mayores del azufre en los LEV, pero un trabajo más reciente indica que los vehiculos modernos con bajas emisiones no son más sensibles al azufre y funcionan bien con niveles de azufre mayores.	-	EUA. 30 UE 50	150-500
Euro III-IV Japón 1978	Catalizador de almacenamiento de NOx	Oxida el CO y el HC con el catalizador mientras el motor funciona con mezcla pobre, y almacena NOx como nitrato dentro del catalizador. El motor debe funcionar con mezcla rica periódicamente por unos pocos segundos cuando se utiliza CO y HC para reducir el nitrato a nitrógeno y regenerar el catalizador.	Nueva generación de motores de inyección directa con mezcla pobre (LDI) en Japón y Europa.	✓✓	✓✓	✓✓	Muy sensible al S. El catalizador absorberá el SO2 preferentemente al NO2, ya que se crea sulfato y la eficiencia del control del NOx se reduce en forma drástica. El catalizador puede regenerarse funcionando muy caliente y rico, pero esto reduce el beneficio económico del combustible. Se necesita combustible libre de azufre para un mejor rendimiento.	✓	10	No recomendado para los países en desarrollo. No hay tecnología ampliamente disponible.

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

Es posible, en principio, colocar un catalizador de oxidación en un vehículo sin catalizador, y esto se hizo en forma limitada en algunos países de Europa a fines de la década de los 80. Mediante estos sistemas se lograron reducciones sustanciales en las emisiones de CO y de HC. Sin embargo, los catalizadores de 3 vías no pueden reconvertirse por la necesidad de sensores complejos, controles electrónicos y sistemas de inyección de combustible electrónicos para controlar la relación aire/combustible. Por lo tanto, la reconversión de catalizadores de 3 vías para motores a gasolina con tecnología más antigua no es una propuesta realista.

Para los vehículos a gasolina sin convertidores catalíticos, la reducción del azufre no tendrá efecto en las emisiones de CO, HC o NOx. Como la cantidad de SO₂ emitida está en proporción directa con la cantidad de azufre en el combustible, los vehículos a gasolina no constituyen una fuente significativa de SO₂. La reducción del azufre ofrece algunos beneficios menores por la reducción de la acidez de los gases de escape, de modo que los sistemas de escape durarán un poco más, pero esto no afecta en forma significativa a las emisiones.

Vehículos diesel

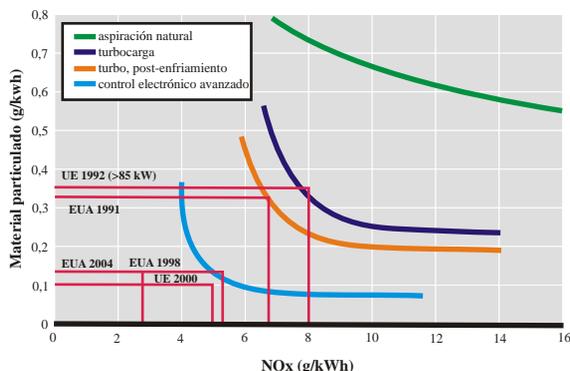
Los motores diesel son más eficientes que los motores a gasolina, ya que funcionan con una relación de compresión mayor, sin regulación y con una relación aire/combustible de mezcla pobre, de modo que las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible son inferiores. Además, el combustible diesel tiene una densidad ~10-15% superior a la gasolina, de modo que el consumo de combustible por unidad volumétrica es todavía inferior. Por estos motivos se utilizan motores diesel en casi todos los camiones y autobuses de todo el mundo. Recientes desarrollos en la tecnología (y a menudo incentivos fiscales favorables brindados por los gobiernos) han hecho que los vehículos diesel de pasajeros sean muy atractivos en Europa, donde alrededor del 50% de los autos nuevos utilizan combustible diesel. Algunas otras regiones de Asia y América del Sur también tienen principalmente vehículos diesel en sus flotas de vehículos de carga liviana, incluso taxis y vehículos de pasajeros y camiones livianos diesel, pero los automóviles de pasajeros para uso personal no han cambiado a motores diesel al mismo nivel que en Europa.

Sin ningún control de contaminación, los motores diesel producen emisiones muy bajas de CO y HC, pero las emisiones de NOx y en especial de material particulado (MP) son muy superiores a las de los motores a gasolina con catalizadores. Siempre hay una solución transaccional de diseño entre las emisiones de NOx y MP en cualquier nivel de la tecnología del motor, como se muestra en la Figura B2, de modo tal que las modificaciones que se realicen al motor para reducir el MP aumentarán el NOx y viceversa. Sin embargo, la reducción de MP también mejora el consumo de combustible, de modo que hay un incentivo para optimizar los motores con bajo MP/alto NOx y utilizar

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

dispositivos de postratamiento para reducir el NOx. El combustible diesel tiene el valor agregado de la baja volatilidad, que casi elimina las emisiones de HC evaporativas.

Figura B2: Vehículos diesel de carga pesada: Compensación de emisiones en distintos niveles tecnológicos



El azufre no tendrá efecto en las emisiones de CO, HC y NOx para los vehículos diesel sin sistemas de control de emisiones. Sin embargo, sí existe un efecto en las emisiones de MP por la siguiente razón: el azufre es combustionado en el motor y forma dióxido de azufre (SO_2), del cual una parte (por lo general 2-3%) se oxida aún más para formar trióxido de azufre (SO_3), que reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico y otras sales sulfatadas. Estas se condensan en el material particulado carbonoso que se emite. De hecho, las emisiones de escape diesel de material particulado (MP) están constituidas por tres componentes:

- i. partículas de carbono sólidas (hollín) derivadas del combustible no quemado;
- ii. hidrocarburos líquidos adsorbidos en el carbono del combustible y lubricante parcialmente quemados, también conocidos como Fracción Orgánica Soluble (SOF, por su sigla en inglés); y
- iii. sulfatos adsorbidos en la superficie, como se describió anteriormente.

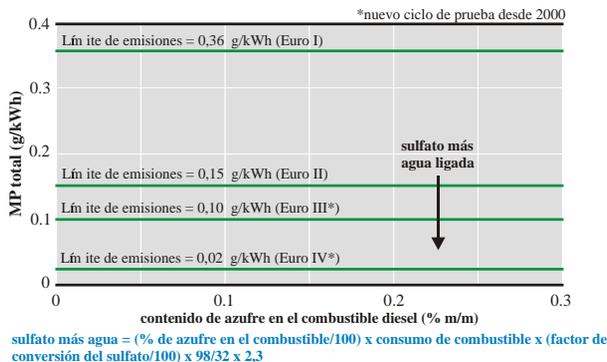
Las cantidades relativas de los tres componentes son una función de la tecnología del motor y de los niveles de azufre en el combustible.

La Figura B3 muestra la contribución al MP del azufre a niveles diferentes en motores de vehículos de carga pesada para diferentes límites de emisiones europeos. Para los motores EURO I (1992) sin controles de emisiones, la contribución del azufre como sulfato es menor. ¡Sin embargo, en los niveles EURO IV (2005), el sulfato de un combustible con un contenido de azufre de 0,1% m/m llegaría a -o excedería- el límite de emisiones sin ningún carbono!

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

Este es un motivo por el cual se necesitan niveles de azufre inferiores para los motores con bajo nivel de emisiones. En Europa, los límites establecidos para el azufre fueron 0,2% para EURO I, 500 ppm para EURO II, 350 ppm para EURO III y 10 ppm para EURO IV. Esta es también la razón por la cual el nivel de azufre se redujo de 0,5% a 0,05% en el combustible diesel de los EUA en 1991.

Figura B3: Contribución del azufre en el combustible a las emisiones de MP de los motores diesel de vehículos europeos de carga pesada



Además, el azufre en el combustible contribuye a las emisiones totales de SO_2 , aunque es necesario reconocer que la mayor parte del SO_2 en áreas urbanas proviene de fuentes estacionarias. Todo el SO_2 emitido a la atmósfera puede provocar la formación de partículas secundarias partículas que se forman a través de una complicada serie de reacciones durante el transporte atmosférico a una distancia larga.

Se han logrado reducciones de emisiones significativas **modificando los motores** sin dispositivos de postratamiento de alto costo. Los inyectores de combustible de alta presión inyectores common-rail o unit mejoran la atomización y la eficacia de la combustión. Las presiones del inyector han estado aumentando en forma continua desde principios de la década del 1900. Los nuevos motores llegan a presiones tan altas como 2000 bares, con múltiples inyecciones por ciclo, y utilizan sofisticados Sistemas de Gestión del Motor para controlar el número, la periodicidad y la duración de las inyecciones. Los motores modernos también tienen pistones y cámaras de combustión, diseñados para una combustión completa y para reducir las emisiones en toda la cadena operativa.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) pueden reducirse sustancialmente utilizando el sistema de **Recirculación del Gas de Escape (EGR, por su sigla en inglés)**. Esta técnica es de amplio uso en los motores a gasolina, y funciona disminuyendo la temperatura de combustión pico, que controla la formación de NO_x . Los sistemas EGR no son sensibles al azufre, pero requieren bajas emisiones de MP para impedir que se obstruya la válvula

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

de control del EGR.

Muchos vehículos diesel de carga liviana cuentan actualmente con **catalizadores de oxidación**, lo cual ayuda a reducir las emisiones de MP. Los catalizadores de oxidación funcionan oxidando la fracción SOF del MP. También reducen las emisiones gaseosas de HC y CO. Solo son eficaces si el catalizador está por encima de su temperatura de “apagado”, que es aproximadamente 200 °C. Sin embargo, si la temperatura del escape es demasiado alta (por encima de 350 °C), se oxidará más SO₂ a MP sulfatado en comparación con un vehículo sin catalizador de oxidación. Por lo tanto, la temperatura de escape y la posición del catalizador resultan críticos, y un contenido de azufre más bajo es esencial para una operación eficaz. El combustible diesel con un contenido de azufre de 500 mg/kg (500 ppm) fue introducido en Europa para permitir el uso de catalizadores de oxidación que cumplan con los límites de emisiones EURO II. El nivel de azufre de 500 mg/kg ha sido ampliamente adoptado en todo el mundo para permitir el uso de modernos motores diesel de emisión controlada para carga liviana y pesada.

Las **trampas de partículas** son muy eficaces y pueden reducir el MP en más de 95%. Sin embargo, las trampas son esencialmente filtros que se obturan si no se regeneran. Se han adoptado diversos enfoques para la regeneración, tal como se resume en la Tabla B2. Esta es un área de gran desarrollo y se están probando diferentes estrategias para la regeneración de trampas en diversas aplicaciones. Las trampas en sí, si se regeneran en forma térmica, no son especialmente sensibles al azufre. Sin embargo, al combinarse con un catalizador para oxidar el hollín, pasan a ser más sensibles al azufre, ya que el azufre en el escape se oxida a MP sulfatado, lo cual aumenta las emisiones de MP totales. Hay sistemas más complejos, como la trampa de regeneración continua (CRT) para motores de vehículos de carga pesada, que son muy eficaces pero sensibles al azufre, y requieren combustibles con un nivel de azufre de 50 mg/kg o menos. Existe otro tipo de trampa de amplio uso en algunos motores de vehículos de carga liviana en Europa, que utiliza un catalizador disuelto en el combustible. Sus emisiones de MP son muy bajas con combustibles que contengan hasta 350 mg/kg de azufre [Schaefer, 2003].

Se están desarrollando **catalizadores de almacenamiento de NOx**, que operan según el mismo principio que para los motores a gasolina con mezcla pobre (ver arriba). Sin embargo, es mucho más difícil hacer que un motor diesel funcione enriquecido para regenerar el catalizador sin producir grandes cantidades de partículas. Por lo tanto, estos sistemas son complejos, de alto costo, y su durabilidad a largo plazo todavía no ha sido demostrada. Si alguna vez se desarrollan para uso comercial, casi con seguridad requerirán combustibles con un contenido de azufre de 15 mg/kg para funcionar en forma eficaz.

Otro enfoque para reducir el Nox es la **Reducción Catalítica Selectiva (SCR, por su sigla en inglés)**. Esta requiere la inyección de amoníaco en el flujo de escape, que reacciona con el NOx mediante un catalizador y lo reduce a

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

nitrógeno. Estos sistemas son muy eficaces y se han utilizado ampliamente para motores estáticos, calderas, etc. Es más difícil desarrollar sistemas que funcionen en camiones diesel con sus rápidos cambios de carga, pero esto se ha logrado y ha sido introducido en Europa. Aunque inicialmente se utilizaba amoníaco para la inyección, ahora se ha llegado a un acuerdo de la industria para utilizar una solución de urea líquida en la cual la urea se convierte en amoníaco mediante otro catalizador en el escape. El sistema SCR por sí mismo no es sensible al azufre, por lo que puede funcionar con combustibles con un contenido de azufre de 500 mg/kg. Sin embargo, los sistemas más avanzados utilizan catalizadores de oxidación adicionales antes (para convertir el NO en NO₂, que reacciona mejor con el amoníaco) y después (para controlar las emisiones de amoníaco) del catalizador principal. Estos son sensibles al azufre, por lo tanto, los sistemas SCR avanzados probablemente requieran combustible con un contenido máximo de azufre de 50 mg/kg.

Como se analizó anteriormente, pueden diseñarse motores para lograr altas emisiones de NO_x con bajo MP, y utilizar el control de emisiones de NO_x, u ofrecer bajas emisiones de NO_x pero altas emisiones de MP y utilizar una trampa de MP. Con el primer enfoque se logra un motor más eficaz con más economía del combustible (y emisiones de CO₂ inferiores por distancia transitada). Por ejemplo, el uso de la tecnología SCR de NO_x para cumplir con los límites de emisiones EURO IV ofrece una economía del combustible 5-10% mejor que un motor con bajas emisiones de NO_x con una trampa de MP. Sin embargo, al reducirse los límites de emisiones a niveles muy bajos, es probable que sea necesario realizar el control de NO_x y de MP, y se están desarrollando sistemas de “4 vías”, como el sistema DPNR (Reducción de Partículas y NO_x en Combustible Diesel) de Toyota.

En la Tabla B2 se enumeran las diversas tecnologías aplicadas a los motores diesel, se resume su eficacia y su sensibilidad al azufre y se brindan los niveles de azufre “apropiados” para los países en desarrollo que deseen introducir esta tecnología.

Programas de inspección y mantenimiento (I&M)

Se necesita un programa eficaz de inspección y mantenimiento vehicular para mantener la reducción de las emisiones de las tecnologías para motores y de postratamiento arriba mencionadas. La Figura B1 muestra que si los catalizadores de tres vías no están funcionando correctamente, es fácil aumentar las emisiones de NO_x desde la base de 0,1 a 0,4 gm/km hasta 1,8 gm/km de NO_x a la salida del motor.

Los vehículos más nuevos con control de emisiones en los EUA y Europa deben contar con sistemas de diagnóstico a bordo (OBD, por su sigla en inglés) que controlen el rendimiento de los dispositivos de control de emisiones y adviertan al conductor cuando haya un problema. Para los motores a gasolina, los sistemas OBD deben controlar la operación del catalizador y del sensor de

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

Límite de emisiones	Sistema de control	Características	Uso	Eficacia				Efecto del azufre	Ahorro en el combustible	Límite normativo de S (mg/kg)	Límite de S apropiado
				CO	HC	NOx	MP				
UE-ECE Euro I EUA, pre 1998	Ningún sistema de control de emisiones	No hay control de emisiones más allá de las características de diseño del motor.	Motores livianos, anteriores a 1996 en la UE y los EUA, motores pesados más actuales.	0	0	0	0	Ningún efecto en las emisiones, pequeños incrementos en emisiones de MP sulfatado.	0	2000-5000	2000-5000
EUA, 1991	Modificaciones del motor.	Inyectores de unidad de alta presión controlados por computadora, diseño de pistón y cámara de combustión mejorados.	Vehículos pesados diesel de los EUA.	✓	✓	✓	✓	Ningún efecto en las emisiones, pequeños incrementos en emisiones de MP sulfatado.	0	5000	5000
EUA, 1994 Euro II-V (vehículos pesados)	Modificaciones del motor. Recirculación del Gas de Escape (RGE)	Inyectores mejorados, turbo-cargadores post-enfriados. El gas RGE enfriado llena una capacidad calorífica mayor que el aire, contiene menos oxígeno y disminuye la temperatura de combustión, disminuyendo de ese modo la formación de NOx. La RGE puede reducir el NOx hasta 40%.	Vehículos pesados diesel de los EUA.	✓	✓	✓	✓	Ningún efecto en las emisiones, pequeños incrementos en emisiones de MP sulfatado.	0	EU2 500 EUA 50	500
Euro III-IV (vehículos livianos) 1996-2005	Catalizador de oxidación (Oxcat)	Oxida solamente el CO y el HC. Reduce las emisiones de MP oxidando la Fracción Orgánica Soluble (FOS) a temperaturas de escape superiores a 200°C pero inferiores a 350°C.	Vehículos livianos EURO II desde 1996. Algunos vehículos europeos reconvertidos.	✓	✓	0	✓	Los catalizadores de oxidación también pueden oxidar SO ₂ para formar SO ₃ , que reacciona con el agua y otros materiales para formar sulfatos, que condensan y aumentan las emisiones de IMP. Por lo tanto se necesita un combustible con un contenido de azufre < 500 mg/kg.	0	EU2 500 EUS 350	500
Euro IV-V a partir de 2005	Filtros de Partículas Diesel (FPD)	Reduce las emisiones de MP por filtración, por lo general con un filtro cerámico poroso similar a un catalizador de oxidación pero con los extremos porosos de los pasajes bloqueados, de modo que el escape fluya a través de las paredes. La eficacia de la filtración es muy alta. El problema es limpiar o regenerar el FPD. La forma más simple es quemar el IMP mediante calentamiento eléctrico, un quemador de combustible o inyección tardía de combustible.	No es de uso común por problemas de complejidad y durabilidad. Las altas temperaturas generadas durante la regeneración hacen que falle el filtro cerámico.	0	0	0	✓✓	No existen efectos específicos del azufre, pero el sulfato no se quema en la trampa. Se necesitan trampas que se regeneren o se limpien físicamente cuando se realiza el servicio. El insumo energético aumenta el consumo de oxígeno y CO ₂ . Se requieren combustibles con bajo contenido de azufre.	-	EU4 50 EU5 10	500
Euro IV-V a partir de 2005 (vehículos pesados)	Filtros de Partículas Diesel (FPD) catalizados – e). trampa de regeneración continua (TRC)	Combinación de filtro y catalizador para reducir la temperatura a la cual se quema el hollín. En la TRC de Johnson Matthey, un catalizador de oxidación ubicado antes del FPD convierte el INO a NO. Este último es mejor oxidante para carbono que el oxígeno. Requiere temperaturas de escape > 200°C para ser eficaz.	Aún no ha sido utilizado como equipamiento de origen, pero hay más de 3000 TRC en uso en camiones y autobuses pesados reconvertidos a nivel mundial.	✓✓	✓✓	0	✓✓	Los sistemas catalizados requieren bajos niveles de azufre, < 50 mg/kg. Johnson Matthey indica que la TRC funciona con 50 mg/kg pero que con 10-15 será mejor.	-	UE 50/10 EUA 15	50
Euro IV-V a partir de 2005	Filtros de partículas diesel (FPD) con catalizadores transportados por el combustible (FBCs, por su sigla en inglés)	Al momento de llenar el tanque, se inyecta un aditivo (generalmente cenizo y/o hierro) al combustible. Este se deposita en la trampa y reduce la temperatura de oxidación del hollín de forma que la trampa se regenera a una temperatura de escape alta.	Utilizado por un OEM de la UE para vehículos EURO III livianos, otros planifican utilizarlos también. Es poco probable que se utilice en los EUA.	✓✓	✓✓	0	✓✓	No muy sensible al azufre: los sistemas están funcionando con 350 mg/kg de azufre en Europa, sin embargo, éste contribuye a la formación de cenizas las cuales deben ser removidas durante los servicios.	-	UE 50/10	350
Euro V a partir de 2005 (vehículos pesados)	Catalizador de almacenamiento de NOx	Similar al sistema de almacenamiento de NOx para gasolina. El catalizador oxida CO, HC, y algo de MP cuando el motor funciona con mezcla pobre, y se almacena NOx dentro del catalizador como nitrato. El motor debe funcionar con mezcla rica periódicamente durante unos segundos para poder utilizar al CO y HC para reducir el nitrato a nitrógeno y así regenerar el catalizador. (Sin embargo, es muy difícil operar un motor diesel con mezcla rica sin incrementar considerablemente el MPI)	Muy distante de ser utilizado para fines comerciales debido a su costo, tamaño y durabilidad.	✓	✓	✓✓	✓	Muy sensible al azufre. El catalizador absorberá SO ₂ en lugar de NO _x , a medida que se genera sulfato se reduce drásticamente la eficiencia de control de NOx. El catalizador se puede regenerar funcionando con mezcla rica en gasoleno, aunque esto reduce el ahorro del combustible. Requiere combustible libre de azufre, < 10-15 mg/kg.	✓	UE 10 EUA 15	No recomendado para países en desarrollo. Tecnología aun no disponible.
Euro IV-V a partir de 2005 (vehículos pesados)	Reducción catalítica selectiva (RCS)	La RCS utiliza un catalizador y amoníaco en el escape para reducir NOx a nitrógeno y oxígeno. Se puede inyectar amoníaco, pero es más aceptable inyectar urea (la cual se convierte en amoníaco por medio de otro catalizador). Se puede necesitar un tercer catalizador a continuación para oxidar el amoníaco que no haya reaccionado.	Ampliamente utilizado para flotas estacionarias. Utilizado para motores pesados en Europa a partir de 2005.	✓	✓	✓✓	✓	El catalizador RCS básico no es sensible al azufre, pero otros catalizadores de oxidación sí lo son por lo que es preferible utilizar combustibles con bajo contenido de azufre (< 50 mg/kg). Requiere un sistema independiente de distribución de urea líquida.	✓	UE 10 EUA 15	Depende del sistema: 500 sin catalizadores de oxidación; 50 con catalizadores de oxidación.

Tabla B2: Sistemas de control de emisiones en vehículos diesel

Documento Complementario B: Correspondencia entre las tecnologías de control de las emisiones vehiculares con el azufre del combustible

oxígeno y detectar fallas. En el caso de los motores diesel, el OBD debe controlar el funcionamiento del catalizador y/o trampa, además de la inyección de combustible. Los sistemas de control electrónico deben verificarse tanto en los motores a gasolina como en los motores diesel. Estos sistemas son eficaces pero muy complejos, y se necesitan técnicos capacitados con computadoras de diagnóstico para determinar qué es lo que está funcionando mal y qué reparaciones deben realizarse para corregirlo. En los EUA y en Europa, los programas de I&M controlan el rendimiento de los vehículos equipados con sistemas OBD para ayudar a garantizar que los conductores hayan tomado medidas correctivas cuando se hayan encendido las luces de advertencia del sistema OBD. Si se utilizan vehículos equipados con OBD en los países en desarrollo, deberían implementarse medidas similares para alentar la respuesta correcta de los conductores ante el encendido de las luces de advertencia.

El tema de I&M es analizado muy bien en un informe reciente del Banco Mundial [Banco Mundial, 2004] sobre los diversos asuntos que implica. La experiencia realizada en Ciudad de México y en todos los otros lugares ha demostrado que los grandes centros centralizados solo de prueba funcionan mejor que los garajes descentralizados de prueba y reparación, que están más abiertos al fraude. En algunas circunstancias pueden considerarse programas de incentivos para el desecho o reemplazo de grandes contaminadores de alto millaje para complementar los programas de I&M.

Las prácticas descritas por el Banco Mundial para un programa de I&M exitoso pueden mejorarse aún más utilizando tecnología de “sensores remotos” para identificar vehículos que son grandes emisores. Los sensores remotos miden las emisiones de un gran número de vehículos en un momento preciso determinado en condiciones de conducción reales. Esta tecnología utiliza un haz infrarrojo que atraviesa una calle para tomar lecturas casi instantáneas de emisiones de un vehículo a gasolina inmediatamente después de que este pasa a través del haz “en la línea de visión”. Los grandes emisores pueden ser detenidos o se les pueden tomar fotografías digitales que muestren el número de registro del vehículo para su ulterior seguimiento. Con este sistema es posible realizar mediciones de hasta 4000 automóviles por hora.

Documento Complementario C:

Características del petróleo crudo y rendimientos previstos del producto

Composición química del petróleo

El petróleo, también conocido como petróleo crudo, es una compleja mezcla de parafina, nafteno (cicloparafina) e hidrocarburos aromáticos, además de compuestos que contienen nitrógeno, oxígeno y azufre, trazas de diversos compuestos que contienen metales, y compuestos inorgánicos. En total, es probable que el petróleo “primario” contenga más de mil compuestos. Algunas de las clases de compuestos más importantes son:

Hidrocarburos

Contienen cadenas de carbono e hidrógeno en diversas proporciones y configuraciones, y se subdividen en:

- Alcanos normales **saturados** (n-alcanos) e isoalcanos (i-alcanos) -estos se caracterizan por la fórmula general C_nH_{2n+2} , con puntos de ebullición y densidades mayores al incrementar el número de átomos de carbono (C). Las cadenas ramificadas (isoalcanos) son por lo general pocas, y el punto de ebullición de las cadenas lineales es superior al de los isoalcanos con el mismo número de átomos de C.
- **Naftenos** o cicloparafinas (hidrocarburos cíclicos saturados, por ejemplo, ciclohexano) - se caracterizan por la fórmula general C_nH_{2n} para compuestos de un solo anillo.
- **Alquenos** u olefinas - consisten en hidrocarburos alifáticos no saturados (por ejemplo, etileno o propileno). Su cantidad inicial en el petróleo crudo es muy pequeña, y normalmente se producen durante la refinación.
- Hidrocarburos **aromáticos** (hidrocarburos cíclicos y poliinsaturados que contienen enlaces dobles conjugados) - incluyen los alquilaromáticos, que tienen números muy altos de octano, y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que contienen más de un anillo.

Compuestos heteroatómicos

Contienen átomos diferentes al carbono e hidrógeno en sus cadenas. Algunas de las clases de compuestos clave son las siguientes:

- Compuestos de azufre, que pueden estar presentes en formas inorgánicas y orgánicas. En el petróleo crudo la concentración de azufre puede variar

Documento Complementario C: Características de petróleo crudo y rendimientos previstos del producto

mucho, como se analiza más adelante. De algunos de los compuestos sulfúricos orgánicos -como el dibenciltiofeno (dos anillos de benceno separados por un átomo de S)- es muy difícil liberar el azufre.

- Los compuestos de oxígeno son responsables de la acidez del petróleo, en particular cuando hay compuestos carboxílicos o fenólicos presentes.
- Los compuestos de nitrógeno consisten en compuestos como el carbazol (neutro) o la quinolina (dos anillos de benceno con un átomo de N en un anillo).
- A veces hay metales presentes (por ejemplo, Ni, V, Fe) en forma de complejos orgánicos.

Clasificación de petróleos crudos

La clasificación más importante del petróleo crudo es por gravedad específica (o densidad). Los petróleos crudos con una gravedad API alta (densidad baja) rinden volúmenes grandes de componentes de gasolina y combustible diesel, pero volúmenes pequeños de fuel oil residual. Los petróleos crudos con una gravedad API baja rinden volúmenes pequeños de componentes de gasolina y combustible diesel, pero volúmenes grandes de fuel oil residual.

Los petróleos crudos también se clasifican como petróleo con bajo contenido de azufre (<0.5% m/m, o 5000 ppm), contenido de azufre intermedio (0.5 a 1.0 % m/m, o 5000-10000ppm), y alto contenido de azufre (>1.0 % m/m, o 10000ppm). Por lo general, la definición de “crudo dulce” corresponde al crudo que no contiene sulfuro de hidrógeno y tiene un contenido de azufre inferior a 0,5% m/m, y solo una parte menor del contenido de azufre se encuentra presente como mercaptanos. Los mercaptanos (compuestos orgánicos sulfurados) son los contaminantes del petróleo crudo y productos del petróleo con peor olor. Los petróleos crudos también pueden clasificarse según su tipo de molécula predominante, como parafínica o nafténica.

La Tabla C1 ofrece ejemplos de las características de diversos petróleos crudos de diferentes regiones del mundo. La tabla muestra el contenido de azufre típico de los crudos enumerados, los rendimientos previstos y la distribución de azufre en las diversas fracciones de destilación hechas a partir de estos en la refinería.

En el proceso de refinación, el petróleo crudo es convertido en muchos productos, como gas licuado de petróleo (GLP), gasolina, combustibles para aviación y diesel, y otros, como se muestra en la Figura C1 para diversas regiones del mundo. Las proporciones relativas de los productos terminados producidos dependerán de las características del crudo, el diseño de los procesos de refinería y la estrategia adoptada por una refinería dada para cumplir con la demanda de productos regional/local. De la Figura C1 queda claro de inmediato que los E.U.A. son un mercado principalmente de gasolina, mientras que otras regiones (por ejemplo, Europa), producen proporciones mayores de “destilados medios”, es decir, queroseno, diesel y gasoil industrial.

Documento Complementario C: Características de petróleo crudo y rendimientos previstos del producto

Tabla C1: Características y rendimientos de algunos petróleos crudos

	Petróleo crudo dulce		Petróleo crudo con contenido de azufre intermedio		Petróleo crudo con alto contenido de azufre	
	Gravedad alta (Bonny Liviano)	Gravedad baja (Bonny Medio)	Gravedad alta (Murban)	Gravedad baja (North Slope)	Gravedad alta (Arabian Liviano)	Gravedad baja (Bachaquero)
	Nigeria	Nigeria	EAU	EUA	Arabia S.	Venezuela
<i>Petróleo crudo</i>	37,6	26,9	39,4	26,8	33,4	16,8
Gravedad	0,13	0,23	0,74	1,0	1,8	2,4
Azufre (% m/m) *	0-0,5	0-0,5	0,51-1,0	0,51-1,0	1,0+	1,0+
<i>Fracción final liviana (<C4)</i>						
Rendimiento (% Vol.)	2,1	0,7	1,8	1,8	1,7	0,4
<i>Nafta liviana (C5-100°C)</i>						
Rendimiento (% Vol.)	6,4	2,1	6,7	5,8	9,0	2,5
Azufre (% m/m)	0,0002	0,001	0,012	0,01	0,024	0,01
<i>Nafta pesada (100-200 °C)</i>						
Rendimiento (% Vol.)	22,0	8,7	21,2	12,6	8,4	6,0
Azufre (% m/m)	0,003	0,01	0,013	0,02	0,027	0,10
<i>Queroseno (200-260 °C)</i>						
Rendimiento (% Vol.)	15,4	14,7	16,2	12,3	15,0	5,0
Azufre (% m/m)	0,03	0,063	0,058	0,2	0,094	0,48
<i>Destilado (260-350 °C)</i>						
Rendimiento (% Vol.)	23,3	29,7	10,4	12,1	19,8	15,5
Azufre (% m/m)	0,13	0,18	0,47	0,56	1,05	0,99
<i>Gasoil pesado</i>						
Rendimiento (% Vol.)	23,1	31,3	9,2	14,7	**	**
Azufre (% m/m)	0,21	0,31	1,06	0,9	**	**
<i>Fuel oil residual</i>						
Rendimiento (% Vol.)	7,7	12,8	34,5	40,7	46,1	70,6
Azufre (% m/m)	0,39	0,48	1,49	1,74	3,08	3,01
TOTAL (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

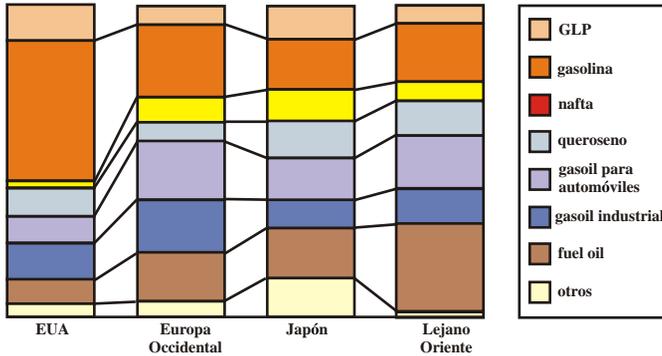
* Conversión de unidades de concentración de azufre: 1% m/m = 10.000ppm; 0,05 % m/m = 500ppm

** Datos para gasoil pesado incluidos en fuel oil residual

Fuente: US Petroleum Refineries, National Petroleum Council (Junio de 2000)

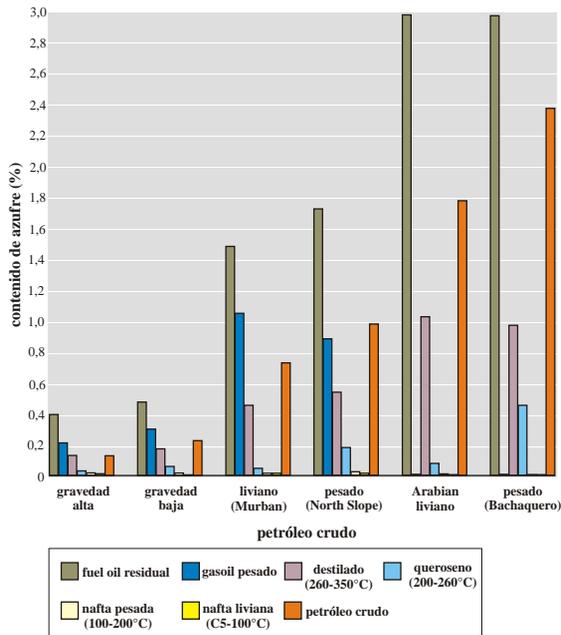
Documento Complementario C: Características de petróleo crudo y rendimientos previstos del producto

Figura C1: Productos típicos de un barril de crudo por región



La Figura C2 muestra la distribución del azufre observada en las diversas fracciones de destilación en una refinería típica, a partir de diversos petróleos crudos. La figura muestra cómo la concentración de azufre aumenta con los rangos de punto de ebullición típicos de cada una de las fracciones de destilación. Así, la nafta liviana (<math><100^{\circ}\text{C}</math>) tiene el menor contenido de azufre, mientras que las concentraciones aumentan en las fracciones más pesadas, por ejemplo: nafta pesada (

Figura C2: Distribución del contenido de azufre (%) en diferentes fracciones de destilación para algunos petróleos crudos seleccionados



Documento Complementario D:

Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Este documento brinda una breve descripción de los principales procesos de refinación, con más detalles sobre aquellos que resultan esenciales para la remoción del azufre durante la producción de gasolina y combustible diesel. La Tabla D1 (al dorso) contiene una recopilación de los diversos tipos de unidades de procesos de refinación y los equipos auxiliares que tipifican a la mayoría de las refinación complejas modernas.

Conceptos básicos sobre las operaciones de refinación del petróleo

Las operaciones de refinación del petróleo han crecido muchísimo en cuanto a capacidad y complejidad desde su creación en la década del 1800. El diseño de los equipos ha avanzado muchísimo, la demanda de productos ha cambiado, las especificaciones son más estrictas y las materias primas han cambiado con el cambio de las fuentes de suministro.

El primer paso importante del proceso de refinación es la destilación, primero a presión atmosférica, y después en condiciones de vacío, que separa el petróleo crudo en diferentes fracciones en base a los rangos de los puntos de ebullición. Históricamente, la destilación era el único proceso de refinación utilizado. A medida que fue evolucionando la demanda de productos con diferentes especificaciones, también evolucionó la tecnología, y se introdujeron diversas unidades de procesos a continuación del paso inicial de la destilación.

Estas unidades de procesos subsiguientes se clasifican en cuatro grupos principales:

- **Craqueo** de fracciones de destilación más pesadas en fracciones más livianas, como componentes de gasolina y combustible diesel.
- **Combinación** de productos más livianos, como isobutano y butanos, para hacer un componente de gasolina con alto octanaje.
- **Redistribución** de la estructura molecular para mejorar las características deseables, por ejemplo, conversión de la nafta con bajo octanaje en gasolina de alto octanaje
- **Tratamiento** para quitar los contaminantes que se encuentran presentes en forma natural, como el azufre y el nitrógeno.

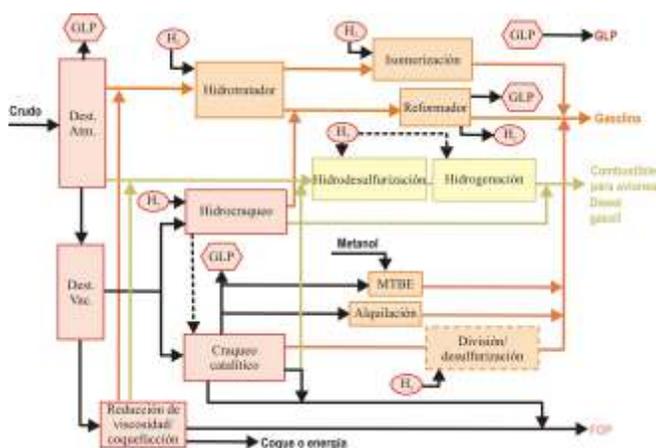
Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Tabla D1: Enumeración descriptiva de las unidades de proceso de refinería		
Categoría de unidad de proceso		Descripción funcional
Separación del petróleo crudo	<ul style="list-style-type: none"> • Destilación atmosférica • Destilación a vacío 	Separar las fracciones de petróleo crudo según los puntos de ebullición
Ruptura de moléculas de hidrocarburos pesados	<ul style="list-style-type: none"> • Craqueo catalítico • Hidrocraqueo • Coquefacción • Reducción de la viscosidad • Craqueo térmico 	Cambiar el tamaño y la estructura de la molécula de hidrocarburo. En los procesos de conversión se rompen las moléculas más pesadas del crudo para formar productos más pequeños, más
Combinación de moléculas de hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> • Alquilación • Eterificación • Polimerización 	Combinar pequeñas moléculas de hidrocarburo, por lo general gases, para formar productos
Reordenamiento de moléculas de hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> • Reformado catalítico • Isomerizaciones 	Reordenar las moléculas del petróleo para mejorar la calidad,
Tratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrodesulfurización • Tratamiento químico 	Quitar los contaminantes que se encuentran presentes en forma natural, como azufre, nitrógeno y
Mezcla de productos de hidrocarburos	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades de mezcla 	Mezclar fracciones de hidrocarburo o componentes producidos por diversos procesos de refinería para obtener productos finales que cumplan
Instalaciones operativas auxiliares	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de hidrógeno • Recuperación de fracción final liviana • Tratamiento de gas ácido • Remoción del agua ácida • Recuperación del azufre • Tratamiento del gas residual • Tratamiento de aguas de desecho 	Apoyar la operación de las unidades de procesamiento primario.
Instalaciones de refinería fuera de sitio	<ul style="list-style-type: none"> • Tanques de almacenamiento • Unidades de generación de vapor y energía • Antorchas de quemado • Sistemas de separación de líquidos • Sistemas de enfriamiento de agua • Sistemas de recepción y distribución • Sistemas de control de incendios 	Equipo necesario para apoyar las operaciones de refinería. También se considera instalaciones fuera del sitio a los garajes, las tiendas de mantenimiento, almacenes, laboratorios y edificios de oficinas administrativas.

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

La Figura D1 muestra de forma esquemática la disposición y la interconexión entre las unidades de proceso de refinería que se encuentran en muchas refinерías modernas (ver Tabla D1). En la descripción detallada de la Industria de la Refinación del Petróleo de los Estados Unidos del National Petroleum Council (NPC, 2000) se ofrece información integral sobre los conceptos básicos de las operaciones de refinación.

Figura D1: Esquema de la configuración de refinерías con múltiples unidades de proceso



Tecnologías para reducir el azufre en el combustible para automóviles

La principal tecnología utilizada para reducir el azufre en la gasolina y el combustible diesel es la hidrodesulfurización (HDS) o hidrotretamiento, donde se agrega hidrógeno para reaccionar con los compuestos de azufre y convertir el azufre en sulfuro de hidrógeno (H_2S). Después, este se quita y se convierte en azufre elemental en un proceso separado. El hidrógeno requerido puede provenir de otras partes de la refinерía, pero a menudo se necesita una unidad de generación de hidrógeno. Muchas refinерías ya cuentan con unidades de HDS para el tratamiento de varias corrientes de refinерía, pero a menudo se trata de unidades de baja presión con capacidad de desulfurización limitada. Las unidades de HDS modernas operan con presiones mucho más altas, y pueden ser de una o dos etapas, dependiendo del nivel de desulfurización requerido. Las descripciones contenidas en esta sección pretenden brindar un panorama rápido de las diversas opciones y no constituyen una lista exhaustiva. No se intenta cuantificar los costos de la implementación de estas tecnologías, ya que estos dependen en gran medida de las configuraciones de refinерía existentes.

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Hidrotratamiento

La hidrodesulfurización (HDS) es un proceso catalítico que se utiliza para quitar el azufre, el nitrógeno y los metales contaminantes de los líquidos del petróleo. La materia prima se mezcla con el hidrógeno, después se calienta y se introduce en el reactor catalítico, donde el azufre y el nitrógeno se convierten en sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3), respectivamente. Lo producido en el reactor va a los separadores de alta presión, donde el hidrógeno excedente es quitado y devuelto al reactor. Los gases del separador se envían al sistema de tratamiento de gas para quitar el H_2S .

La Figura D2 presenta una descripción esquemática del proceso de hidrotratamiento.

Unidad de recuperación de azufre

La planta de recuperación de azufre convierte el H_2S de las unidades HDS en azufre elemental. El sistema de recuperación más utilizado es el proceso Claus, que usa reacciones de conversión tanto térmica como catalítica. En el proceso Claus, parte del H_2S se quema para producir SO_2 . El H_2S y el SO_2 después reaccionan para formar azufre y agua. El azufre por lo general se vende para producción química o de fertilizantes.

Unidad de tratamiento del gas residual

Con el proceso Claus por lo general se recupera aproximadamente el 95% del H_2S . El H_2S no recuperado deja la unidad como gas residual. El contenido de azufre de este gas residual puede estar por encima de los límites ambientales, de salud y seguridad. Hay varios procesos disponibles para tratar el gas residual de la unidad de Claus para recuperar más azufre y reducir las emisiones. Algunos de estos procesos son el “Super Claus” (99% de recuperación), el “Claus Pol” y el “Sulfreen” (99,5% de recuperación), y el tratamiento conocido como SCOT (Shell Claus Off-gas Treatment) (99,9% de recuperación).

Unidad de producción de hidrógeno (HMU, por su sigla en inglés)

El hidrógeno se necesita para diversos procesos de refinación, incluyendo el hidrotratamiento, el hidrocrackeo y la isomerización. La fuente principal de hidrógeno en muchas refinerías es el proceso de reformado catalítico, que convierte a las parafinas y naftenos en aromáticos. Si esto no es suficiente, en especial cuando el contenido de aromáticos de la gasolina es limitado, puede producirse más hidrógeno en una HMU mediante el reformado de hidrocarburos livianos por vapor, en particular metano. Los hidrocarburos livianos se mezclan con vapor y pasan a través de tubos llenos de catalizador en el horno del reformador para formar hidrógeno y CO/CO_2 . El gas del reformador que contiene hidrógeno, CO , CO_2 y vapor excedente, pasa a través de un convertidor donde el CO y el vapor son convertidos a hidrógeno y CO_2 . El gas rico en CO_2 es tratado con una corriente alcalina para absorber el CO_2 , con lo que se produce un 95-98% de hidrógeno puro, mientras que lo que resta está compuesto principalmente por metano.

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Opciones de tratamiento de la gasolina

La principal fuente de azufre en la gasolina proviene de los vapores craqueados en forma catalítica. El componente del craqueo catalítico de la gasolina puede dividirse en dos o tres fracciones, y son estas las que deben desulfurizarse. La pérdida de calidad de octanaje debe reemplazarse. Existen diversas tecnologías de tratamiento que se describen a continuación.

■ *Hidrotratamiento convencional de gasolina*

Este método se ha utilizado en las refinerías para reducir el contenido de azufre de las corrientes de hidrocarburo durante décadas y es bien comprendido. Desafortunadamente, tiende a convertir las olefinas presentes en la gasolina obtenida por craqueo catalítico en parafinas de octanaje inferior, provocando una pérdida de octanaje de casi 10 números, y un alto consumo de hidrógeno. Esto no es recomendable, ya que la gasolina FCC de bajo octanaje es difícil de mezclar en la pileta de gasolina, a menos que se realice otro proceso para mejorar su calidad.

■ *Hidrotratamiento selectivo de gasolina*

Las nuevas tecnologías permiten realizar un hidrotratamiento para desulfurizar sin perder tanto octanaje. Algunos de estos procesos utilizan un catalizador modificado en condiciones óptimas y agregan un paso para evitar la pérdida de octanaje en la reacción de hidrotratamiento. Se han diseñado otros procesos para incrementar las reacciones como la isomerización o la aromatización. Todos estos procesos de hidrotratamiento selectivo limitan la pérdida de octanaje, pero por lo general están acompañados de cierta pérdida de rendimiento de la gasolina. En la actualidad hay varios de estos procesos disponibles comercialmente que se están utilizando en diversas refinerías de la UE, y probablemente serán utilizados por algunas refinerías de los EUA para producir mezcla para gasolina Tier 2.

■ *Destilación catalítica*

Esta tecnología también ha sido comercializada. Su premisa básica es el uso de catalizadores de hidrotratamiento dentro de una torre de destilación. La reacción de hidrotratamiento es la misma, pero se utiliza menos hidrógeno dentro de la torre, lo que permite realizar un hidrotratamiento más selectivo y minimizar la saturación de olefinas.

■ *Adsorción*

Más recientemente han surgido dos procesos que utilizan tecnología de adsorción para quitar el azufre de la fracción de la nafta. El proceso de Phillips, S Zorb, que ha sido probado comercialmente, utiliza un adsorbente que adsorbe en forma selectiva y reacciona con moléculas de azufre. El proceso de Black & Veatch, IRVAD, que actualmente se está

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

desarrollando, utiliza otro adsorbente que adsorbe moléculas de azufre de la nafta para su ulterior procesamiento.

Opciones de tratamiento del combustible diesel

El combustible diesel se hace mezclando varias fracciones destiladas, todas las cuales contienen algo de azufre. La capacidad de quitar el azufre del combustible diesel depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Tipos de compuestos de azufre en el crudo;
- Disponibilidad y presión operativa de las actuales unidades de hidrotratamiento;
- Disponibilidad de hidrógeno y pureza del mismo; y
- Tipo de catalizador utilizado y su actividad.

Las mezclas destiladas no tratadas pueden contener varios miles de ppm de azufre. El azufre en estas mezclas por lo general es reducido mediante el hidrotratamiento, lo cual puede requerir condiciones severas (presión y temperatura altas) para lograr niveles de azufre muy bajos. Dependiendo de la configuración de la refinería, para algunos refinadores puede resultar más ventajoso instalar un hidrocraqueador para la producción de cantidades mayores de combustible diesel con menor contenido de azufre. La instalación de nueva capacidad de hidrocraqueo es mucho más costosa que la que se requiere para el hidrotratamiento a temperatura/ presión altas. Tiene la ventaja de producir más combustible diesel y queroseno, más que los componentes de la gasolina producidos por un craqueador catalítico.

Si bien muchas refinerías en el mundo en desarrollo continúan produciendo combustible diesel con alto contenido de azufre, algunas ya están contemplando diversas estrategias para modernizar sus instalaciones e introducir nueva capacidad de procesamiento para producir combustible diesel con menor contenido de azufre. [*En el Documento Complementario E: Tecnologías de tratamiento del combustible diesel*](#), se incluye un resumen de un estudio reciente de los Estados Unidos de América sobre la desulfurización del combustible diesel.

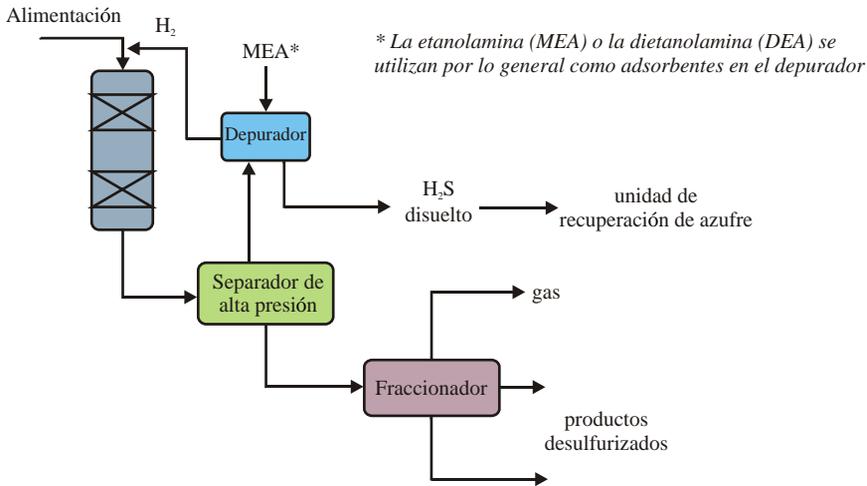
■ **Hidrotratamiento (remitirse a la Figura D2)**

El hidrotratamiento convencional funciona bien para el combustible diesel y puede brindar algunos beneficios adicionales, incluyendo la reducción de aromáticos y una leve mejora de la calidad del cetano. Sin embargo, el grado de desulfurización disponible depende del diseño del sistema, la capacidad y en especial de la presión operativa. Los hidrotratadores convencionales de presión baja-media funcionan con 30 bares y pueden reducir los niveles de azufre a 1000 ppm, dependiendo del tipo de crudo. Para producir combustibles con menor contenido de azufre, de 500 a 50 o

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

10 ppm S, se requieren hidrotratadores de alta presión (50-70 bares) más costosos, que pueden ser de una o dos etapas, dependiendo del tipo de materias primas y de otros requerimientos.

Figura D2: Esquema del proceso típico de hidrotratamiento para refinación



■ Hidrocrqueo

Esta es una tecnología de procesamiento de refinería importante pero de alto costo, que puede utilizarse para incrementar el volumen del diesel y del queroseno producidos con bajo contenido de azufre. El hidrocrqueo es una alternativa al craqueo catalítico (mediante el cual se producen principalmente componentes de la gasolina). Se utiliza para producir nafta de alto valor o productos destilados de una diversa gama de materias primas de refinería. El hidrocrqueo puede reducir los niveles de azufre en el combustible diesel a 50 ppm. Sin embargo, por debajo de este nivel seguirá siendo necesario el hidrotratamiento. Las tecnologías de hidrocrqueo tienen una larga historia de aplicación comercial, con varias decenas (o hasta cientos) de unidades de diversos tamaños y condiciones operativas en todo el mundo. Los refinadores que opten por instalar o modernizar un hidrocrqueador deben reconocer que es la opción de mayor costo para producir combustibles de menor contenido de azufre (unas 4-5 veces más costoso que un hidrotratador de alta presión). La principal ventaja de instalar dicha unidad de proceso es la capacidad de convertir productos pesados de menor valor en diesel y queroseno. Esto incrementará el rendimiento de las fracciones de diesel y queroseno y ofrecerá un retorno económico a la refinería.

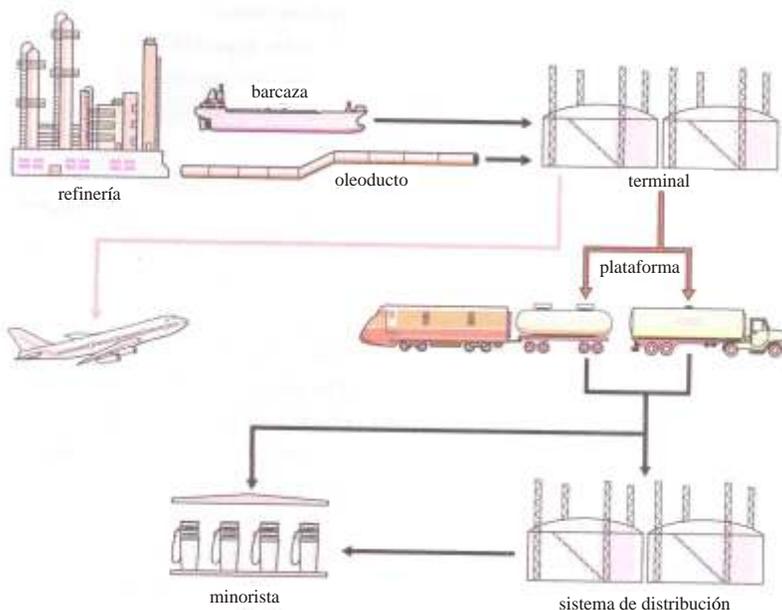
Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Consideraciones sobre distribución de productos y logística en relación con combustibles limpios

Con combustibles con muy bajo contenido de azufre, la contaminación con productos con un contenido de azufre superior durante la distribución puede ser un problema. En la Figura D3 se ilustra un sistema típico de distribución de combustible. Aunque puede haber variaciones en el proceso de distribución, en el sistema básico el combustible va de la refinera de petróleo en una carga a granel, por oleoducto, buque o barcaza, a una terminal. Una terminal es una instalación de almacenamiento y distribución. La plataforma de carga terminal se refiere al mecanismo utilizado para dispensar productos de combustible vehicular desde la terminal a camiones cisterna o vagones de tren. Desde la terminal, el combustible por lo general va al distribuidor mayorista, a veces a almacenamiento intermedio, después al minorista y finalmente al consumidor. El combustible también puede ir directamente al minorista desde la terminal.

Muchas refineras cuentan con estas instalaciones de carga, o plataformas (“racks”), que pueden entregar los productos terminados directamente en camiones y vagones, aunque en muchas partes del mundo las refineras se basan cada vez más en los oleoductos y el transporte marítimo para la entrega de la mayor parte de su producción.

Figura D3: Esquema de distribución de combustible y red logística



Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

Consideraciones sobre el transporte de los productos

El traslado de diferentes clases y lotes de productos de múltiples transportistas a través de un único oleoducto requiere un cuidadoso control de cómo y cuándo se trasladan los productos. Algunos de los lotes enviados son mezclables, es decir, tienen las mismas especificaciones de producto y pueden mezclarse durante el transporte. Este será el caso del envío de gasolina del mismo grado, por ejemplo, desde diversas refinerías a un mercado de distribución local.

Los productos que son suficientemente diferentes entre sí y que no deberían mezclarse se envían a través del oleoducto uno después del otro sin separación física. Se utiliza una secuencia específica para minimizar la contaminación del producto adyacente, aunque ocurre cierta mezcla en la interfaz entre los distintos lotes. Por ejemplo, una interfaz entre gasolina común y premium podría mezclarse, dando como resultado gasolina común. Sin embargo, las especificaciones de productos cada vez más estrictas, como las de EUA y Europa, están aumentando los requisitos de control de calidad y podrían restringir la flexibilidad actual para el almacenamiento, manipulación y distribución de productos.

Para los productos transportados por buque, barcaza, vías férreas o camión, la integridad durante el movimiento no plantea un problema siempre que los productos se mantengan en compartimientos sellados separados. Sin embargo, cuando los buques o barcasas son cargados o descargados existe la posibilidad de generación de una interfaz o “transmezcla” del modo analizado anteriormente para el caso de la operación por oleoducto.

Consideraciones sobre la distribución de los productos

Al considerar la reducción gradual del contenido de azufre en los combustibles, debe tenerse en cuenta que el hecho de ampliar el diferencial entre los productos con mayor y menor contenido de azufre en el sistema de distribución podría aumentar la cantidad de “transmezcla” y por lo tanto los costos operativos y las inversiones requeridas.

Algunos de los puntos generales a considerar son los siguientes:

- Con niveles inferiores de azufre, cualquier cantidad significativa (o incluso pequeña) de mezcla con otros productos con mayor contenido de azufre incrementará el nivel de azufre final por sobre el nivel indicado en la especificación. Esto requerirá un sistema de control de calidad estricto y el envío de la “transmezcla” nuevamente a las refinerías para su reprocesamiento.
- Como se prevé que el volumen de “transmezcla” casi se duplique al pasar a productos con bajo contenido de azufre, se requerirán tanques de almacenamiento adicionales para almacenar esta “transmezcla” a lo largo de las rutas del oleoducto y en las terminales hasta su traslado de regreso a las refinerías.
- En la mayoría de los puntos del sistema de distribución deberá haber equipos de medición de los niveles de azufre, que sean lo suficientemente precisos como para determinar el azufre en el nivel requerido.

Documento Complementario D: Conceptos básicos sobre refinación, remoción del azufre y distribución

- Si los niveles de azufre en la gasolina y el combustible diesel son diferentes, habrá costos adicionales debido a la interfaz del envío de la gasolina y el diesel, lo cual también requerirá un nuevo procesamiento en la refinería.
- Las diferentes concentraciones de azufre en diferentes productos destilados también podría provocar una contaminación cruzada (por ejemplo, en el envío y la manipulación de petróleo para calefacción con alto contenido de azufre, combustible para aviones o diesel para fines diferentes al transporte carretero, en comparación con el diesel para automóviles, que contiene menos azufre).

Todos estos factores deberán abordarse durante la implementación local de estrategias para reducir el azufre de los combustibles. Debe realizarse una planificación cuidadosa y deben asignarse recursos suficientes para actualizar el sistema de distribución y logística, a fin de evitar una contaminación cruzada inadvertida, y para impedir la adulteración de los productos y garantizar la entrega de productos de alta calidad a los consumidores.

Documento Complementario E:

Tecnologías de tratamiento del combustible diesel

Resumen de un estudio reciente sobre desulfurización de combustible diesel realizado en los Estados Unidos de América

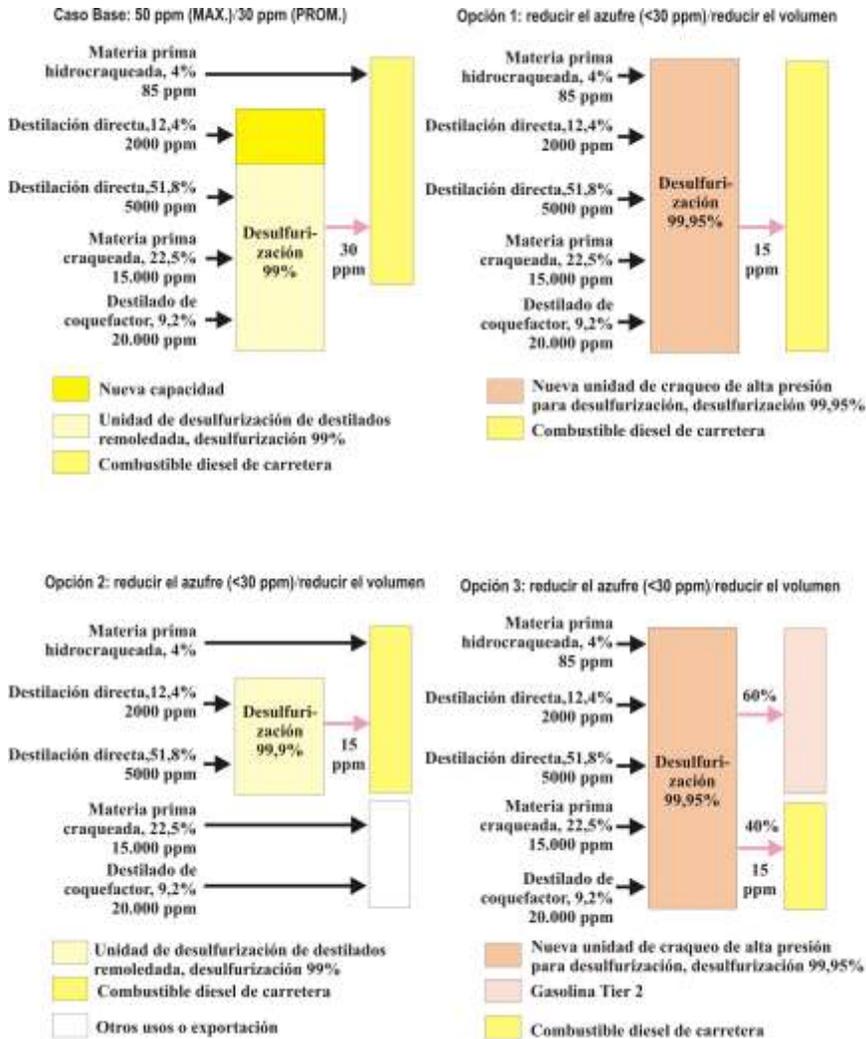
La Figura E1 (al dorso) presenta una serie de ejemplos específicos de rutas opcionales para la producción de combustible diesel con muy bajo contenido de azufre, especialmente apropiadas para aquellos refinadores que están contemplando la opción de producir diesel con 50ppm de azufre (o menos). Se muestran cuatro esquemas diferentes, denominados Caso Base y Opciones 1, 2 y 3. Estos ejemplos se crearon para mostrar la gama de opciones para remodelar las refinerías y su impacto en los recursos requeridos, así como las posibles consecuencias en el rendimiento de los productos.

Las opciones presentadas son:

- **Caso Base** - se asume un contenido de azufre máximo de 50 ppm, con un promedio de 30 ppm. Esto requerirá volúmenes y capacidad del reactor con unidades de desulfuración de al menos 99% de eficacia.
- **Opción 1** - reducir el contenido de azufre a < 30 ppm manteniendo los volúmenes de diesel para automóviles. Esta será una opción de muy alto costo, por lo menos 2-3 veces más costosa que el caso base. Se requiere la construcción de unidades de craqueo para desulfurización de alta presión con un 99,95% de eficacia en el tratamiento.
- **Opción 2**- reducir el contenido de azufre a < 30 ppm con un costo inferior al de la Opción 1. Esta opción requerirá la construcción de unidades de desulfurización de destilados remodeladas con una eficacia de 99,9%. Aunque esta opción es menos costosa, podría tener como resultado la pérdida de aproximadamente 30% del diesel para automóviles, ya que las fracciones con más contenido de azufre a las cuales no se les realiza tratamiento se desvían a otros productos o se exportan.
- **Opción 3** - reducir el contenido de azufre a < 30 ppm y obtener un retorno positivo de la inversión. Esta opción requerirá casi la misma inversión de capital que la Opción 1. Se requiere la construcción de nuevos hidrocraqueadores de alta presión con un 99,95% de eficacia en la desulfurización. Para lograr el retorno necesario de la inversión, con esta opción solo el 40% de lo producido se mezclará como diesel para automóviles, mientras que el restante 60% se utilizará para mezclar gasolina Tier 2 de los Estados Unidos de América.

Documento Complementario E: Tecnologías de tratamiento del combustible diesel

Figura E1: Ejemplos de opciones para producir diesel para automóviles con menor contenido de azufre



Documento Complementario F:

Temas a abordar al evaluar las opciones para la reducción del azufre en el combustible

Fijar metas de políticas de calidad del aire

- ¿Qué contaminantes?
- ¿Qué concentraciones en el aire, y en qué tiempo promedio?
- ¿Cuál es la exposición de la población? ¿Problema regional o local?

Evaluar fuentes de emisiones

- ¿Cuál es la contribución de las emisiones provenientes del transporte, en comparación con otras fuentes de emisiones (estacionarias)?
- ¿Qué sucede con el azufre del combustible en relación con estas emisiones?
 - Emisiones directas (SO₂)
 - Efectos secundarios (sulfatos, material particulado)
 - Tecnologías vehiculares instrumentales avanzadas

Considerar el contexto local para la reducción del contenido de azufre en el combustible

- ¿Cómo impactarán las medidas contempladas en el sistema "vehículo-combustible"?
- ¿Cuál es el rango actual de azufre en los combustibles?
 - En el rango porcentual. Podrían obtenerse beneficios directos en cuanto a calidad del aire a partir de los cambios en los combustibles con un mejor mantenimiento de la tecnología vehicular actual.
 - Por debajo de 0,1% (1000ppm). Posibilita una mejor tecnología vehicular y brinda beneficios solo si dichas tecnologías vehiculares están disponibles.
- ¿Cuál es la eficacia de las diversas mediciones consideradas en función de los costos?
 - Evitar costos más altos que afectarían la economía sin justificación.
- ¿El parque automotor está equipado con tecnologías apropiadas?

Documento Complementario F: Temas a abordar al evaluar las opciones para la reducción del azufre en el combustible

- Si no lo está, la introducción de combustibles con menor contenido de azufre puede ser absolutamente contraproducente.

Evaluar oferta y disponibilidad de combustible

- ¿Cuáles son las fuentes locales de los productos de combustible con menor contenido de azufre?
 - Si las refinerías locales proporcionan todos los suministros, es necesario evaluar el costo y el tiempo requerido para realizar modificaciones a la refinería.
 - Si todos los combustibles son importados, es necesario evaluar la disponibilidad de fuentes seguras de suministro ininterrumpido.
- ¿Cuáles son las modificaciones que deben realizarse a la refinería para producir combustibles con menor contenido de azufre?
 - Cambiar a crudo con bajo contenido de azufre solo puede reducir el azufre a -0,1%.
 - Mayor demanda de energía y emisiones para un mejor procesamiento.
 - Gastos de capital para modificaciones y costo incremental de los productos.
- ¿Cuáles son los cambios que es necesario realizar a la infraestructura logística de los combustibles?
 - Mayor capacidad de la terminal para poder almacenar diversos grados de combustibles.
 - Necesidad de nuevas terminales de importación.
 - Contaminación y adulteración de combustibles durante la distribución.

Documento Complementario G:

El sistema vehículo-combustible: a considerar por parte de los encargados de la formulación de políticas

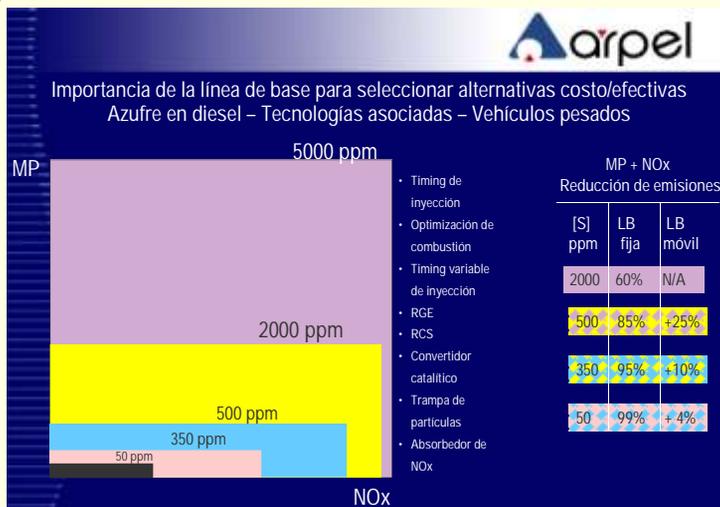
- (a) **Uso de vehículos** - El grado de uso de vehículos es importante en el análisis general de las emisiones provenientes del transporte, en particular al buscar soluciones a largo plazo para ayudar a evitar que se constituya un problema. Una cuestión central para los encargados de la formulación de políticas de los países en desarrollo es si es posible o deseable evitar el aumento del uso de vehículos.
- (b) **Flota vehicular y tecnología utilizada** - Los vehículos más viejos por lo general tienen un nivel de emisiones más alto que los vehículos más nuevos, principalmente debido al deterioro del rendimiento y al uso de tecnología obsoleta que genera un nivel de emisiones más alto. Los límites de las emisiones para los vehículos más nuevos asegurarán la introducción de tecnologías avanzadas de control de emisiones en la flota. También será importante tomar medidas específicas para abordar las emisiones de los vehículos en uso, ya que se prevé que lleve largo tiempo transformar las flotas de vehículos, en especial los de carga pesada, en la mayoría de los países.
- (c) **Mantenimiento de vehículos** - El deterioro de las características de las emisiones está vinculado con las prácticas de mantenimiento de los propietarios, en particular cuando se utiliza tecnología de postratamiento catalítico del escape. Es probable que el uso de combustibles no adecuados y el descuidar el mantenimiento del postratamiento del escape aumenten las emisiones, a menos que se implementen sistemas eficaces.
- (d) **Uso de combustibles apropiados** - Las autoridades normativas deben brindar especificaciones de combustibles claras en base a las tecnologías vehiculares que se están introduciendo. Además, deben tomarse medidas para impedir el uso de combustibles no adecuados y eliminar los incentivos económicos innecesarios para utilizar los combustibles incorrectos, impidiendo de ese modo la adulteración o la sustitución ilegal de combustibles.

Documento Complementario H:

La importancia de considerar el punto de referencia inicial (o ¡cuidado con los porcentajes!)

Al analizar el impacto de las nuevas tecnologías en términos de reducciones porcentuales es importante determinar el punto de referencia inicial. Para ilustrar este concepto nos basamos en un ejemplo utilizado por ARPEL que muestra cómo los pasos tomados por los países de la OCDE han hecho posible una reducción sustancial de las emisiones de MP y NOx de los vehículos de carga pesada, al ir disminuyendo los niveles de azufre en el combustible, y con diversas opciones de tecnología vehicular.

La siguiente Figura muestra los diversos pasos tomados en cuanto a tecnología vehicular con los niveles correspondientes de azufre en el combustible diesel, junto con las reducciones de emisiones de MP y NOx logradas en cada paso. Los tamaños de los rectángulos coloreados en la figura están diseñados para mostrar las emisiones combinadas {MP + NOx} en cada nivel de azufre en el combustible diesel. La disminución de los tamaños de los rectángulos muestra el total de reducciones de emisiones que se lograron. Claramente, las reducciones de emisiones porcentuales logradas en comparación con un “punto de referencia fijo” (por ejemplo, un nivel de azufre de 5000 ppm) son muy diferentes a las que se obtendrían si consideráramos un “punto de referencia en movimiento”, es decir, uno que utilice como base el nivel anterior.



Documento Complementario H: La importancia de considerar el punto de referencia inicial (o ¡cuidado con los porcentajes!)

Si tomamos como punto de partida un contenido de azufre de 5000 ppm, la reducción a 2000 ppm representaría una reducción del 60% del total de emisiones {MP + NO_x}, si se implementan las mejoras tecnológicas apropiadas que se indican en el lado derecho de los rectángulos. Al ir reduciendo los niveles de azufre y bajando de ese modo las emisiones, observamos que una reducción adicional de los niveles de azufre a 500 ppm ascendería a una reducción total de 85% en un enfoque de "punto de referencia fijo". Ulteriores reducciones de los niveles de azufre a 350 ppm o 50 ppm representarán reducciones totales de 95% o 99%, respectivamente, desde el "punto de referencia fijo". Sin embargo, si utilizamos el enfoque de "punto de referencia móvil", la disminución del contenido de azufre de 2000 a 500 ppm logra una disminución extra del 25% de las emisiones que corresponden a 2000 ppm. Sucesivamente, si el contenido de azufre desciende de 500 a 350 ppm las emisiones disminuirán sólo un 10% más, y si desciende de 350 a 50 ppm el descenso en las emisiones será de apenas un 4% más respecto de las que se daban con 350 ppm.

Por lo tanto, para evitar confusiones, los encargados de la formulación de políticas deben comprender cuál es el punto de referencia inicial para la evaluación de los escenarios de reducción de emisiones y cuál es su eficacia en función de los costos para las circunstancias locales. Para los países en desarrollo, en especial los que comienzan con altos niveles de azufre en sus combustibles, es preferible utilizar un enfoque de "punto de referencia fijo" como herramienta para brindar una mejor ilustración de la eficacia en función de los costos de cada etapa posterior en un enfoque de reducción gradual.

Documento Complementario I:

Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe¹ (estudio de un caso)

Antecedentes

El estudio realizado por ARPEL - OLADE - Banco Mundial² concluyó que en el correr de la próxima década, el sector refinación de la Región de Latinoamérica y el Caribe (LAC) necesitará una inversión continua de alrededor de US\$ 3000 millones por año (en comparación con los US\$ 2000 millones invertidos por año en la última década) para satisfacer la creciente demanda y para implementar una mejora de la calidad del combustible.

Además, el aumento en el uso del gas natural para la producción energética y para su aplicación en otras fuentes fijas ha provocado una reducción del mercado de combustibles pesados, por lo que la renovación de las refinerías y la introducción de más tecnologías de conversión y actualización resultarían esenciales para su viabilidad económica futura.

Además, existe una tendencia mundial a ejercer presión adicional sobre el sector, a fin de que este proporcione combustibles que permitan la implementación de tecnologías vehiculares más limpias. Esto tiene un impacto sobre la demanda y la calidad. Además, temas como la seguridad en el suministro de energía y la seguridad ambiental, junto con situaciones económicas y políticas mundiales, regionales y locales, también afectarán la toma de decisiones corporativas en el sector de refinación y distribución de combustible en LAC.

Este estudio de caso se basa en gran medida en el resultado del Taller organizado por ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas

¹ Extraído del informe de ARPEL titulado “Presente y futuro del negocio de refinación en América Latina y el Caribe” (2004)

http://domino.arpel.org/apps%5Carpel%5CML_Lib_Nueva.nsf/0/42D9297A149F442503257226006D3578?opendocument&FolderID=19DC961C1FF721190325721200691A15

² Estudio sobre el desarrollo del sector refinación en Latinoamérica y el Caribe - 2002, ARPEL - OLADE - Banco Mundial

http://domino.arpel.org/apps%5Carpel%5CML_Lib_Nueva.nsf/0/029BF5C3631D28CC03257226006D33E9?opendocument&FolderID=19DC961C1FF721190325721200691A15

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Natural en Latinoamérica y el Caribe), que tuvo lugar el 30 y 31 de marzo de 2004 en Kingston, Jamaica. La finalidad del Taller fue abordar principalmente el estado y las necesidades de modernización de las refinerías de petróleo en la región de LAC. Las empresas participantes en el Taller representan aproximadamente el 80% de la capacidad de refinación de la región. El sector de refinación es una parte importante del desarrollo económico sostenible de la región. Solo por esta razón, este Taller fue importante, y se espera que sus conclusiones formen parte de futuras estrategias regionales.

Los principales temas abordados fueron los siguientes:

- Necesidad de actualizar las instalaciones para incrementar la eficiencia de las operaciones y la rentabilidad.
- Consideraciones sobre mejoradores de octanaje apropiados si ha de eliminarse gradualmente el uso del MTBE.
- Compartir tanto el éxito como las dificultades de la experiencia brasilera con el etanol como una “lección aprendida” para la consideración de otros refinadores.
- Recursos necesarios para llevar a cabo las actualizaciones necesarias y opciones de financiamiento.

El taller contó con la presencia de 57 expertos del sector refinación, tomadores de decisiones gubernamentales y agencias de financiamiento, quienes compartieron sus perspectivas sobre estos temas. La discusión se centró en la experiencia y las expectativas en relación con los planes emergentes para la optimización de las tecnologías de procesos sin desatender la administración del suministro, tanto para los mercados internos como para las exportaciones. También se centró en la necesidad de contar con enfoques eficaces en función de los costos para disminuir la brecha existente entre los recursos de financiamiento y las necesidades de inversiones futuras.

Descripción del análisis

Cada una de las empresas participantes abordó los siguientes temas:

- Descripción general y configuración actual de la empresa en la región;
- Inversiones realizadas en los últimos 5-10 años;
- Planes relacionados con el cambio en la mezcla de productos y en las especificaciones de los combustibles;
- Fuentes de financiamiento previstas;
- Lecciones aprendidas durante el proceso.

La discusión sobre nuevas tecnologías de refinación se centró en las siguientes estrategias, entre otras:

- Nuevos catalizadores;
- Enfoques de optimización de procesos, incluyendo sus efectos directos e indirectos;

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

- Temas referentes al octano y cetano;
- Nivel de producción y consumo de hidrógeno;
- Enfoques sobre la cogeneración y sus potenciales beneficios, y
- Temas relacionados con las mejoras en la infraestructura.

En diversos países de Latinoamérica y el Caribe, el gobierno es el único propietario de sus refinерías nacionales. Esas refinерías están protegidas por restricciones a la importación, cuotas, subsidios o elevados aranceles. Esta estructura comercial ha constituido una carga cada vez más pesada para los gobiernos, debido a su incapacidad para atraer el capital para las inversiones necesarias en el sector.

La discusión puso énfasis en la necesidad de reestructurar y reformar el sector. Se están explorando varios modelos de negocios que permitirán mantener el control gubernamental y abrir los mercados a la creciente competencia. Entre otros temas, se discutieron diversos grados de privatización, modelos de joint venture con compañías que cotizan en bolsa, contratos de licencia para la fabricación y distribución de combustible, etc. Es claro que para los países en los cuales el sector downstream del petróleo todavía no está abierto, los tomadores de decisiones gubernamentales deberán considerar estos temas en detalle para ser capaces de atraer la inversión necesaria para actualizar sus instalaciones.

La Tabla I1 ofrece un resumen de los temas específicos abordados y del análisis subsiguiente. Uno de los principales resultados del análisis es que las especificaciones de combustibles parecen estar tornándose más estrictas de lo que se previó originalmente, como se muestra en la Figura I1. Esta tendencia está vinculada posiblemente a las consideraciones sobre la viabilidad futura de las empresas nacionales a la luz de las iniciativas regionales por la liberalización del mercado y a la necesidad de competir en posibles mercados abiertos en el futuro cercano. Además, las pequeñas refinерías de la región se perciben como más viables que hace cuatro años debido a la capacidad ociosa reducida y al incremento en la demanda de producto.

La Tabla I2 ofrece una mirada a los proyectos y a los temas que enfrentan las refinерías individuales en la región de LAC en la próxima década. La tabla brinda también una indicación inicial de los recursos estimados que se necesitarían para emprender todas las modernizaciones y mejoras previstas en refinерías.

Conclusiones y recomendaciones

Los participantes en general estimaron que los combustibles fósiles continuarán siendo la fuente predominante de energía en los próximos 30 años. Es en este contexto que los refinadores deben considerar las necesidades de demanda así como la inversión en potenciales proyectos de expansión. La tendencia, en particular para la región de LAC, es procesar petróleos crudos cada vez más pesados (y extra pesados) que crean muchos problemas técnicos y

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

a partir de los cuales se obtienen rendimientos menores de gasolina y combustible diesel. Los participantes reconocieron además la importancia de que la industria siga el ritmo de los requisitos del mercado en cuanto a calidad de los combustibles.

A medida que los refinadores van incursionando en el proceso de cambio, se estimaron vitales algunas consideraciones para mejorar las estrategias de gestión de las refinerías:

- Integrar las áreas de tecnología y producción de refinación puede ayudar a lograr una transición más eficaz en función de los costos para especificaciones de combustibles más estrictas.
- La capacitación y formación de capacidad para elaborar proyectos multidisciplinarios -necesarios para modernizar / renovar las refinerías- son un factor importante para el éxito.
- La participación en iniciativas de benchmarking (por ejemplo, Solomon, etc.) como medio para mejorar la eficiencia de procesos comerciales.
- Evaluar los efectos indirectos de cambios en los procesos al producir combustibles con nuevas especificaciones (por ejemplo, ¿qué hacer con el azufre generado por la gran desulfuración? ó ¿qué hacer con el coque del petróleo si las empresas necesitan aumentar el uso de procesos de coquefacción retardada?)

A pesar de todo lo que ya se ha logrado, el tema de la financiación de nuevos proyectos de cambios en la configuración de la refinería y mejoras en la calidad de los combustibles es todavía un asunto crítico. Para facilitar y reducir el costo de financiamiento de tales proyectos, se requieren cambios en el contexto y las modalidades de la operación de empresas estatales, a fin de reducir los riesgos que perciben los inversores privados. Esos cambios deben incluir los siguientes puntos destacados, entre otros:

- I. Eliminar las restricciones monopólicas de los mercados,
- II. Permitir la libre importación y exportación de los productos del petróleo, y
- III. Establecer una relación entre los precios del mercado internacional y los precios ex-refinería.

Si se toman estas medidas, la percepción del riesgo por parte de los inversores se basará solo en el negocio particular y no en el marco normativo.

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

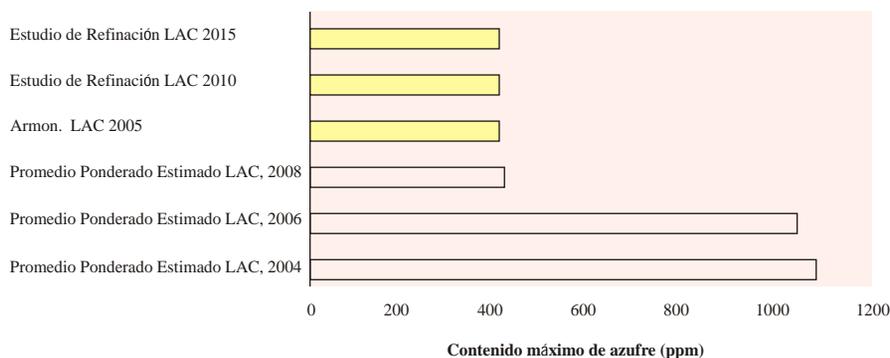
Tabla I1: Resumen de temas y análisis

Temas abordados	Resumen de discusiones
<p>¿Por qué las especificaciones de combustibles en la región de LAC se están tornando más estrictas que lo previsto originalmente?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Los principales resultados del estudio de Desarrollo del Sector Refinación en Latinoamérica y el Caribe se siguen aplicando a los diferentes países de la región. • Las especificaciones nacionales de combustibles están siendo cada vez más estrictas, posiblemente debido a consideraciones sobre la viabilidad futura de las empresas nacionales. • Las iniciativas regionales de liberalización de los mercados y la necesidad de competir posiblemente en el futuro en mercados abiertos.
<p>¿Cómo debería la región conciliar su capacidad de refinación y porcentaje de utilización (este último sin la potencial necesidad de financiamiento) para satisfacer la demanda de los productos?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La estrategia podría implicar un aumento de la utilización superior al 95% para aprovechar la capacidad ociosa a corto plazo. • Centrarse en las inversiones a mediano y largo plazo para optimizar el uso de la financiación disponible.
<p>¿Cuáles son las consecuencias de la tendencia a procesar crudos cada vez más pesados (y extra pesados) en la región?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Esto crea problemas con la corrosión ácida, la viscosidad alta y la desalinización. • Reduce el rendimiento de la gasolina/el combustible diesel. • Provoca una intensidad energética mayor (y más emisiones de GEI) proveniente de esas operaciones.
<p>¿Cómo debe manejar la región de LAC el uso cada vez mayor de etanol?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concluyó que hasta el 10% del contenido de etanol en la gasolina no parece requerir la reconversión de vehículos ni imponer nuevas restricciones ambientales. • El etanol podría utilizarse como potenciador alternativo del octanaje (particularmente a la luz de algunas iniciativas tendientes a prohibir el MTBE en algunos países). • Continuar controlando la evolución de este asunto a nivel del país y a nivel regional, tanto en la región como en América del Norte.
<p>¿Las pequeñas refinerías siguen siendo viables en la región de LAC?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Las pequeñas refinerías son percibidas como más viables que hace cuatro años. • Parecen cumplir una función nicho en cuanto a atender mercados con altos costos de transporte (estados islas). • Se benefician de la creciente demanda de productos, que está reduciendo la capacidad ociosa.

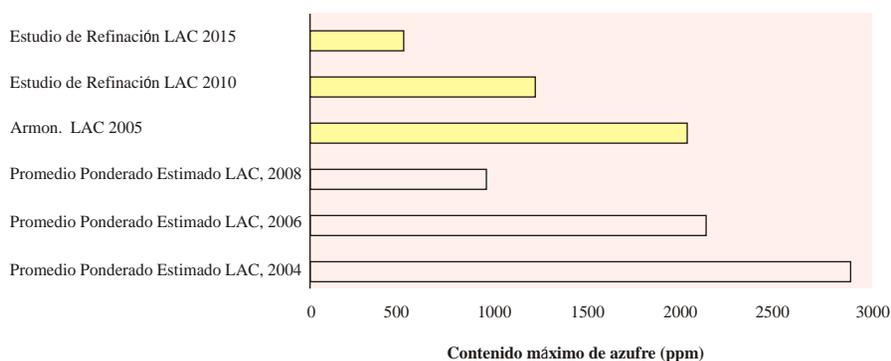
Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Figura I1: Contenido de azufre en los combustibles en la región de LAC

Contenido máximo de azufre en la gasolina región de LAC



Contenido máximo de azufre en el combustible diesel, región de LAC



Notas:

- Promedios Ponderados Estimados LAC {azufre x (consumo del país) / (consumo total)}- Calculados por ARPEL a partir de los estándares máximos regulados - actuales y propuestos- de los principales países consumidores de la región. Los estándares de concentración de azufre utilizados para el cálculo no incluyen el contenido inferior establecido para las grandes ciudades (por ejemplo, Buenos Aires, Santiago, Ciudad de México, etc.). Estándares de azufre obtenidos de los datos disponibles en la Base de Datos de Combustibles de ARPEL (2004). Los volúmenes de consumo estimados se extrapolaron de los datos obtenidos por el Banco Mundial (a.- "La demanda de productos del petróleo en países en desarrollo" - Documento de consulta No 359 (1997) y b.- Sitio web de Indicadores de Desarrollo Mundial).
- Armon. LAC 2005 - Valores derivados del estudio "Armonización de especificaciones de combustibles en Latinoamérica y el Caribe - 2005"
- Estudio de Refinación LAC 2010 y 2015 - Valores utilizados como base de los cálculos incluidos en el estudio "Desarrollo del Sector Refinación en Latinoamérica y el Caribe" (ARPEL - OLADE - Banco Mundial, 2002).

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Tabla I2: Estado actual de los planes de refinadores de las empresas que operan en la región de LAC y gastos de capital estimados para actualizaciones y modificaciones dentro de la próxima década^a

Empresa	Capacidad de refinación en la región de LAC ^b	Países en los que opera refinerías	Medidas tomadas para mejorar la cantidad y la calidad de los combustibles	Recursos necesarios
ExxonMobil	88,1 KBPD	Argentina	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución adecuada (potencial para logística regional) • Flexibilidad en el petróleo crudo utilizado • Optimización del rendimiento • Oferta de hidrógeno adicional • Mayor capacidad de hidrotratamiento • Capacidad de recuperación de azufre adicional 	A determinar
PDVSA	3,3 MMBD (capacidad mundial)	Venezuela y el Caribe (capacidad adicional también en los EUA y Europa)	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar el procesamiento de crudo y crudo pesado y la conversión de residuales • Adaptar las operaciones para ofrecer combustibles de calidad • Optimizar la relación crudo/producto • Mejorar la gestión de productos (por ejemplo, segregando los petróleos crudos, productos y caudales intermedios) • Desarrollar gasolina/diesel con bajo contenido de azufre y otros productos como asfaltos, lubricantes y ceras 	US\$ 5000 millones en los próximos 5 años. (De ellos, casi 16% se destinará a abordar el tema de la calidad del combustible).
PEMEX	1,68 MMBD	México	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar los procesos de conversión del petróleo crudo • Utilizar residuales para la cogeneración de electricidad y vapor • Procesar el petróleo crudo pesado 	A determinar

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Empresa	Capacidad de refinación en la región de LAC ^b	Países en los que opera refineries	Medidas tomadas para mejorar la cantidad y la calidad de los combustibles	Recursos necesarios
			<ul style="list-style-type: none"> ● Incrementar la comercialización de los productos del petróleo ● Maximizar el uso de la capacidad de refinación disponible actualmente 	
PETROBRAS	2,084 MMBPD	Brasil, Argentina y Bolivia	<ul style="list-style-type: none"> ● Abordar la creciente confianza en el crudo brasilero (más pesado) ● Optimizar las operaciones y la tecnología para mayor acidez, viscosidad y corrosión ● Conversión de residuales para abordar la demanda de fuel oil, gasolina y combustible diesel 	US\$ 5500 millones en los próximos 5 años (1/3 para incrementar la conversión de las refineries, 1/3 para la calidad de la gasolina y el combustible diesel, y el resto para asuntos relativos al ambiente, salud y seguridad industrial, automatización y mantenimiento)
Repsol YPF	482,5KBPD	Argentina y Perú (capacidad adicional también en España)	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptarse a las especificaciones de combustibles más estrictas ● Necesidad de más destilados intermedios y menos gasolina y fuel oil ● Abordar la calidad del combustible y la conversión en una estrategia conjunta que abarque el fraccionamiento de la nafta FCC, la desulfurización, la generación de hidrógeno y la recuperación de azufre. ● Abordar la reducción de costos y la mejora de los sistemas de gestión, incluyendo en los aspectos referentes a seguridad, ambiente y calidad 	A determinar

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Empresa	Capacidad de refinación en la región de LAC ^b	Países en los que opera refinerías	Medidas tomadas para mejorar la cantidad y la calidad de los combustibles	Recursos necesarios
ANCAP	50 KBPD	Uruguay	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalar un nuevo hidrotratador de nafta, un reformador de regeneración continua y una unidad de isomerización ● Los procesos instalados brindan hidrogeno suficiente como para hacer posible un hidrotratamiento limitado ● Remodelar la refinería con instalaciones y otras modificaciones fuera de sitio 	US\$ 131 millones en ampliaciones y actualizaciones recientemente completadas
ECOPETROL	277 KBPD	Colombia	<ul style="list-style-type: none"> ● Aumento de la producción de fuel oil en unidades de vacío ● Producción de asfalto de calidad internacional ● Optimización de inventarios ● Implementación de sistema de gestión basado en el riesgo ● Implementación de reducción de pérdidas de venteo y optimización de la distribución del vapor 	US\$ 155 millones en un periodo de 6 años (iniciado en 2001)
ENAP	226,5 KBPD	Chile	<ul style="list-style-type: none"> ● Instalación de unidades de proceso para saturación de benceno, hidro craqueo leve de combustible diesel, despentanización de gasolina para craqueo e hidrotratamiento. 	US\$ 319 millones en un periodo de 6 años (iniciado en 2001)
PETROJAM	34 KBPD	Jamaica	<ul style="list-style-type: none"> ● Cambio en la tecnología de producción de destilación simplificada a conversión ● Foco en el corto plazo en las eficiencias operativas y los ahorros de costos 	A determinar

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Empresa	Capacidad de refinación en la región de LAC ^b	Países en los que opera refineries	Medidas tomadas para mejorar la cantidad y la calidad de los combustibles	Recursos necesarios
PETROECUADOR	165 KBPD	Ecuador	<ul style="list-style-type: none"> ● Unidades de desulfurización para FCC y reducción de viscosidad de la gasolina ● Aumento de la producción de gas oil ● Aumento de la producción de gasolina FCC ● Aumento de la eficiencia de las unidades de reducción de viscosidad ● Instalación de unidades de alta conversión ● Diseño y construcción de una nueva refinaria de 100 KBPD 	US\$ 1700 millones
RECOPE	25 KBPD	Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> ● Ampliación de la capacidad de la unidad de destilación al vacío, del hidrotratamiento de queroseno, del reformado catalítico y del hidrotratamiento de combustible diesel ● Conversión de un reformador catalítico en una unidad de isomerización de nafta liviana ● Mejora de los procesos para cumplir con las normas ambientales de la refinaria y de los productos 	US\$ 116 millones

Documento Complementario I: Inversión actual y futura en el negocio de refinación en América Latina y el Caribe

Empresa	Capacidad de refinación en la región de LAC ^b	Países en los que opera refineries	Medidas tomadas para mejorar la cantidad y la calidad de los combustibles	Recursos necesarios
STAATSOLIE	7,3 KBPD	Surinam	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementar la producción a 15 KBPD instalando una nueva unidad de destilación al vacío y reducción térmica de viscosidad, una unidad de hidrotreatmento de gas oil pesado obtenido al vacío (HVGO) (incluyendo una unidad de hidrógeno y azufre) y una central eléctrica modular ampliable, a fuel oil pesado, de 30MW. • Las consideraciones ambientales incluyen la construcción de una unidad de tratamiento de aguas residuales, una planta de tratamiento biológico de fenoles y una unidad de tratamiento cáustico de gas oil liviano obtenido al vacío (LVGO) que incluye un módulo cáustico usado. 	US\$ 180 millones

^a En base a información del informe sobre el Taller de ARPEL [ARPEL, 2004].

^b Capacidad de refinería: KBPD = 1000 barriles por día de petróleo crudo, MMBPD = 1 millón de barriles por día de petróleo crudo.



La Asociación Internacional de Protección Ambiental de la Industria del Petróleo (IPIECA, por su sigla en inglés) fue fundada en 1974 tras el establecimiento del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). IPIECA brinda uno de los principales canales de comunicación de la industria con las Naciones Unidas.

Es la única asociación mundial que representa al sector upstream y downstream de la industria del petróleo y el gas en temas ambientales y sociales clave en todo el mundo. El programa de IPIECA tiene en cuenta las actividades internacionales en estos temas, actuando como un foro de análisis y cooperación para la industria y organizaciones internacionales.

Los objetivos de IPIECA son elaborar y promover soluciones científicamente sensatas, eficaces en función de los costos, prácticas y aceptables desde el punto de vista social y económico para los temas ambientales y sociales relativos a la industria del petróleo y el gas a nivel mundial. No es una organización de promoción de intereses, sino que ofrece un foro para alentar la mejora continua del desempeño de la industria.

International Petroleum Industry Environmental Conservation Association
5th Floor, 209215 Blackfriars Road, Londres SE1 8NL, Reino Unido
Tel: +44 (0)20 7633 2388 Fax: +44 (0)20 7633 2389
Correo electrónico: info@ipieca.org Internet: www.ipieca.org