

CATALISIS Y MEDIO AMBIENTE

Consuelo Montes de Correa*

RESUMEN

En este documento se hace una revisión de algunos de los problemas globales ocasionados por la emisión de gases nocivos a la atmósfera, principalmente como consecuencia del consumo de combustibles fósiles. Se dan ejemplos sobre el empleo de tecnologías catalíticas para la disminución de dichos contaminantes y se presentan los retos de estas tecnologías para finales del siglo presente y comienzos del próximo.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha empeorado el proceso de deterioro de las condiciones del planeta. El efecto invernadero, la reducción de la capa de ozono, la lluvia ácida, la deforestación y desertización de importantes áreas, la erosión de los suelos y los alarmantes niveles de pobreza de los países del "Tercer Mundo" son problemas globales que deben solucionarse mediante acciones concertadas en el plano internacional. En la denominada "Cumbre de la Tierra" realizada en Río de Janeiro (Junio 1992) se establecieron los principios universales que deben regir la relación entre el desarrollo armónico de las actividades humanas y la preservación de la naturaleza. Igualmente se aprobó un plan detallado de acción y cooperación internacional para ponerlo en práctica en la perspectiva del próximo siglo¹.

Tradicionalmente, el sistema económico de libre mercado aunque ha demostrado gran eficiencia, ha fomentado la desigualdad

social, la destrucción del tejido comunitario, la inestabilidad política y el marginamiento de amplios grupos de la población². Además, el libre acceso a los recursos naturales en su calidad de bienes públicos ha permitido distorsiones en la evaluación de los costos de producción. En estos últimos no se ha considerado el gasto o deterioro del ambiente, así como su uso ineficiente o sobre-explotación. Tampoco se han asumido los costos derivados de utilizar el medio ambiente como sumidero de los desechos de las actividades humanas, contribuyendo de esta forma, a la degradación del aire, los suelos, las aguas y los seres vivos del planeta¹.

El nuevo concepto de desarrollo debe integrar plenamente la política económica, la social y la ambiental. Igualmente, es un proyecto de sociedad democrática fundamentado en el respeto de los derechos humanos y legitimado en el reconocimiento de su propia historia, en la concertación y en la participación de la sociedad civil. Por lo tanto, además de los criterios de crecimiento económico, eficiencia y competencia el desarrollo debe ser sostenible, equitativo y con identidad³.

En general, aunque en todos los países se hacen esfuerzos por enfrentar los problemas ambientales locales y mejorar sus más inmediatos entornos, en los últimos años se ha generado mayor conciencia sobre los problemas que se refieren al entorno de todo el planeta. Colombia no ha sido ajena a la problemática ambiental global. Poco a poco

* Profesora del Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia

el gobierno Colombiano viene construyendo una política internacional sobre temas ambientales más integrada y mejor definida. Esto se concreta mediante la firma de la Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo, La Convención de Cambio Climático, La Convención sobre Diversidad Biológica y el Programa 21. Aunque después de cinco años de la firma de estos acuerdos se considera⁵ que Colombia aún no se está encaminando hacia modelos de desarrollo sostenible, se han hecho algunos esfuerzos. Por ejemplo, en materia de producción limpia el Gobierno ha firmado acuerdos con diferentes sectores productivos. También ha impulsado la reconversión de tecnologías obsoletas a tecnologías que producen menor impacto ambiental, como es el caso de la sustitución de sustancias que agotan la capa de ozono en la fabricación de equipos de refrigeración, aire acondicionado y otros artículos.

El sector energético ocupa un lugar predominante dentro de la economía del país, en particular, como principal generador de exportaciones y de recursos para programas y proyectos de desarrollo social, regional y de infraestructura. Se ha estimado⁴ que los costos de las medidas de prevención o mitigación del deterioro ambiental asociadas con la producción y uso de energía pueden significar hasta el 10% del monto de nuevas instalaciones y un porcentaje aún mayor en algunas de las existentes.

En este artículo se analizan algunos de los problemas ambientales relacionados con la degradación de la atmósfera global ocasionados por el sector energético y se confrontan con las nuevas regulaciones del Ministerio del Medio Ambiente⁶. Adicionalmente, se discute el papel de la catálisis en el control de las emisiones de

contaminantes gaseosos a la atmósfera haciendo énfasis en la reducción de la contaminación producida por el parque automotor. Por último, se plantean algunas de las oportunidades futuras en la investigación y desarrollo de nuevos catalizadores y tecnologías catalíticas requeridas en este campo para finales del siglo y comienzos del siglo XXI.

2. EL PROBLEMA AMBIENTAL GENERADO POR ACTIVIDADES ENERGÉTICAS

Las actividades energéticas de consecuencias más significativas para el medio ambiente en el país son: la exploración, producción y transporte de hidrocarburos, la refinación del petróleo, la explotación de carbón mineral, la generación de electricidad, el consumo final de hidrocarburos y el consumo de leña. Dichas actividades presentan en mayor o menor grado efectos tales como la degradación de los suelos, alteración de la calidad del agua y la contaminación atmosférica⁴.

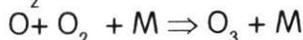
Uno de los mayores problemas de contaminación atmosférica que enfrenta Colombia es la gran cantidad de emisiones resultantes del consumo de energía. La combustión de derivados del petróleo, gas natural, carbón y leña son responsables de fenómenos tales como el smog fotoquímico, la disminución de la capa de ozono, el efecto invernadero y la lluvia ácida⁴.

El smog fotoquímico se asocia con la formación de ozono en la troposfera resultante de una secuencia de reacciones fotoquímicas entre O_2 y CO , O_2 e hidrocarburos en los cuales los NO_x están involucrados en las etapas intermedias de reacción⁷. Según la agencia Japonesa de Cooperación, la norma diaria vigente de 0.12

ppm de ozono está excedida en la mayoría de los centros urbanos del país⁴. La principal causa se atribuye a las emisiones de los vehículos automotores y a la combustión de derivados fósiles en calderas de uso comercial e industrial. Se estima que el sector de transporte liviano contribuye con el 60% de las emisiones de CO, 60% de hidrocarburos, 55% de las partículas suspendidas, 51.7 de NO_x y 33% de óxidos de azufre. El 80% del total de las emisiones de fuentes fijas se descarga en seis zonas: Cali, Medellín, Bogotá, Cartagena, Sogamoso y Barranquilla⁴.

Aunque a nivel del mar el ozono es un contaminante que además de contribuir al calentamiento de la superficie terrestre, ocasiona problemas de salud y daños en los cultivos agrícolas, el ozono de la estratosfera (10-50 km de altitud) es decisivo en el mantenimiento del equilibrio de la radiación del planeta ya que actúa como filtro al ingreso de la radiación ultravioleta proveniente de los rayos solares. Si la capa de ozono no existiera, no habría vida en el planeta⁸.

Hace varios decenios, la evidencia científica comenzó a demostrar que el contenido de ozono de la estratosfera daba señales de reducción. A finales de los años setenta apareció un gran hoyo en la capa de ozono ubicado sobre la Antártida. Durante ese decenio los científicos descubrieron la causa del fenómeno. Paul Crutzen, Mario Molina y Sherwood Rowland ganadores del Premio Nobel de Química en 1995, fueron los pioneros en explicar la formación y descomposición de ozono en la atmósfera⁹. El ozono se forma en la atmósfera mediante el rompimiento de moléculas de oxígeno por la radiación ultravioleta del sol. Los átomos de oxígeno liberados reaccionan con el oxígeno molecular de acuerdo con la siguiente ecuación:



donde M es una molécula de aire (N₂ y O₂)

Paul Crutzen en 1970 demostró⁹ que los óxidos de nitrógeno NO y NO₂ reaccionan catalíticamente con ozono acelerando la rata de reducción de este compuesto.



Los óxidos de nitrógeno se forman en la atmósfera mediante la reacción del estable óxido nitroso que se origina de transformaciones microbiológicas en los terrenos y por actividades antropogénicas. De otro lado, Harold Jonston⁹ confirmó el poder de los óxidos de nitrógeno para descomponer el ozono y señaló el posible daño que los vuelos supersónicos podrían representar. Estos vehículos serían capaces de desprender los óxidos de nitrógeno justo en la mitad de la capa de ozono a altitudes de 20 km.

En 1974 se presentó otro descubrimiento importante sobre el conocimiento de la capa de ozono. Mario Molina y Sherwood Roland publicaron en la revista Nature un artículo sobre la amenaza a la capa de ozono ocasionada por los clorofluorocarbonos (CFC) o "freones". Los CFC se desarrollaron en los años treinta como reemplazo de los refrigerantes que se utilizaban en ese entonces¹⁰. A diferencia de los anteriores, los CFC son extremadamente estables, no tóxicos e inertes con relación a la maquinaria eléctrica y mecánica en la cual se utilizan. En consecuencia, su uso se difundió rápidamente como refrigerantes y también como impelentes en aerosoles (atomizadores para el cabello, desodorantes,

insecticidas), agentes industriales para elaborar espumas de poliuretano y poliestireno, además de agentes de purificación y disolventes industriales. Otro subgrupo corresponde a los halógenos ampliamente utilizados como extintores de fuego. Molina y Rowland demostraron que los CFC relativamente inertes pueden ser transportados gradualmente a la capa de ozono donde en presencia de radiación UV se separan en sus constituyentes. La desaparición del ozono se vinculó a la acumulación de cloro en la estratosfera⁹.

Por lo general se cree que la reducción del 1% en el ozono estratosférico producirá un incremento entre 2-3% en la radiación ultravioleta que alcanza la superficie del planeta. La investigación actual indica que la incidencia incrementada de cáncer en la piel y enfermedades en los ojos se debe a la radiación UV. Se estima además, que el incremento de la radiación UV aumentará los costos de producción de alimentos debido a los daños físicos que produce en el crecimiento de las plantas¹¹.

La continua evidencia científica del agotamiento del ozono generó acuerdos internacionales¹². Bajo los auspicios de las Naciones Unidas, 24 naciones, entre ellas Colombia, firmaron en 1987 el Protocolo de Montreal sobre las sustancias agotadoras de ozono. Los países que registraban un alto índice de utilización, se comprometieron a reducir en forma gradual los CFC y los halógenos hasta un 50% de acuerdo con los niveles registrados en 1986. A los países con bajos niveles de utilización se les concedió un período de gracia de 10 años. A partir de 1999 reducirían en un 50% los niveles registrados en 1995-1997. Poco después del acuerdo de Montreal se hizo evidente que esta reducción no era suficiente. En 1990 los países del Protocolo de Montreal con otros

países que se anexaron acordaron discontinuar por etapas la producción de CFC completamente para el año 2000, agregar a la lista el tetracloruro de carbono y el cloroformo, e introducir un programa para la eliminación por fases de los hidroclorofluorocarbonos, HCFC, cuya producción debe eliminarse para el año 2030. También se instituyó un fondo con contribuciones de los países desarrollados, para ayudar a financiar los cambios tecnológicos que implican la reducción de los CFC en los países del Tercer Mundo. Debido a que los gases destructores de la capa de ozono migran lentamente a la atmósfera superior es de esperarse que la disminución se empeore en los próximos años. No obstante, si se cumple el acuerdo, la capa de ozono empezará a mejorar al finalizar el siglo y se estima que la recuperación completa tomará alrededor de 100 años⁹.

Otro problema global importante lo constituye la amenaza del incremento de la temperatura de la superficie de la tierra a largo plazo conocido como "calentamiento global" o "efecto invernadero"¹³. No toda la radiación infrarroja que proviene de la luz solar que ingresa a la tierra se refleja al exterior del planeta debido a la presencia de ciertos gases en la atmósfera denominados "de invernadero". Los gases de invernadero en la atmósfera sirven para incrementar la temperatura de la superficie de la tierra y la hacen habitable. Sin gases de invernadero la temperatura de la superficie terrestre sería 30°C más fría que en la actualidad, lo que haría imposible la vida humana. Por ejemplo, Marte no tiene una atmósfera para retener la radiación solar, ni capa de ozono. Por consiguiente, la temperatura de la superficie de Marte es muy baja y todo el territorio se encuentra bombardeado por radiación ultravioleta. Venus, posee una atmósfera rica

en CO₂ y la temperatura de la superficie alcanza 400°C debido al intenso efecto invernadero⁴⁷. En la tabla 1 se presentan los principales gases de invernadero y las fuentes más importantes de estos gases.

Antes de la industrialización, las cantidades existentes de gases de invernadero en la tierra permitían el equilibrio global. Con la revolución industrial el incremento en la extracción de energía de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural ha generado un incremento en el contenido de CO₂ en la atmósfera de aproximadamente 20%. En los últimos treinta años el CO₂ se aumentó en 8%. Algunos pronósticos indican una duplicación a mediados del próximo siglo¹⁴.

La tasa de calentamiento se calcula en casi un 0.3°C por decenio, la cual es mucho más rápida que la tasa de calentamientos históricos de 0.05°C que produjeron grandes desequilibrios. Se espera que el calentamiento global genere un aumento en el nivel del mar debido a la expansión del agua marina, el derretimiento de los glaciares y eventualmente, el rompimiento de las capas polares. El flujo de las mareas también cambiará y se modificarán ampliamente los patrones meteorológicos

entre las regiones. Quizá los mayores impactos en los seres humanos se evidenciarán mediante los efectos provocados por los cambios climáticos en la agricultura y los bosques. En un estudio reciente comisionado por la EPA (Environmental Protection Agency, USA), se concluye que los impactos agrícolas debidos al calentamiento atmosférico golpearán más fuertemente a los países del Tercer Mundo ya que muchas cosechas se encuentran cerca de los límites de tolerancia frente a las temperaturas más cálidas¹⁴⁻¹⁶.

El efecto invernadero resulta de un incremento en la producción de gases de invernadero con relación a la capacidad de los ecosistemas de la tierra para absorberlos. Por lo tanto, los principales medios para reducir el calentamiento dependen de la reducción en la producción de los gases de invernadero y/o el aumento de la capacidad de absorción de CO₂ por parte del mundo natural. Durante los próximos decenios, será necesario luchar contra el efecto invernadero principalmente con incrementos en la conservación de energía y su eficiencia, desplazamiento hacia combustibles con bajos niveles de carbono y reducción en la utilización de agentes químicos que tengan grandes impactos de invernadero¹⁴.

Tabla 1. Principales Gases de Invernadero y sus fuentes¹³.

Gas	Fuentes Principales
CO ₂	Ignición de combustibles fósiles, deforestación, producción de cemento.
H ₄	Combustión de gas natural, rellenos sanitarios, agricultura.
N ₂ O	Ignición de combustibles fósiles, combustión de biomasa, limpieza de terrenos, fertilizantes.
CO, HC, NO _x	Ignición de combustibles fósiles, combustión de biomasa.
CFC	Refrigeración, aire acondicionado.

3. CATÁLISIS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN

La función de los catalizadores en el control de la contaminación, como su función en los procesos químicos, es incrementar la velocidad de una reacción favorable termodinámicamente. Por ejemplo, una mezcla de hidrocarburos con aire por debajo del límite de inflamabilidad reacciona para formar agua y bióxido de carbono a temperaturas por encima de 750°C y el tiempo de reacción es del orden de segundos. En presencia de un catalizador tal como platino o cobre-cromita la reacción se lleva a cabo a 300°C obteniéndose conversión completa en milisegundos.

Como se mencionó anteriormente, los vehículos automotores se han identificado como la mayor fuente de emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono, y óxidos de nitrógeno. La introducción de las enmiendas a la legislación del acta de aire limpio ("Clean Air Act" CAA) de los Estados Unidos en 1970, en particular las relacionadas con las emisiones de los vehículos automotores forma la base de lo que es hoy la mayor aplicación de la tecnología catalítica y la principal contribución al control de la contaminación ambiental¹⁷⁻¹⁸. La CAA exigía una reducción del 90% en las emisiones para 1976. Este enfoque denominado "cambio tecnológico forzado" obligó a las compañías automotrices a invertir más dinero en investigación a pesar de que las exigencias tuvieron que postergarse y finalmente no se ejecutaron sino desde comienzos de los años 80¹⁹. La mayoría de los vehículos a gasolina vendidos en los Estados Unidos a finales de 1974 estaban equipados con un catalizador de oxidación. Posteriormente en 1980 se introdujeron los convertidores catalíticos de tres vías controlados por computador para

reducir tanto las emisiones de NO_x como de CO e hidrocarburos²⁰⁻²². El convertidor catalítico consiste de un panel cerámico (algunas veces metálico) recubierto con alúmina estabilizada y cerio sobre el cual se han impregnado los metales nobles Pt, Pd y Rh²¹. Las emisiones de los vehículos automotores se redujeron dramáticamente con el transcurso del tiempo, principalmente debido al uso del convertidor catalítico.

Legislaciones similares se han introducido o se están introduciendo en otros países. Por ejemplo, recientemente el Ministerio del Medio Ambiente en Colombia reglamentó⁶ el nivel de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles de gasolina o diesel para los vehículos importados a partir de 1997 y ensamblados en el país a partir de 1998 (Tabla 2). Adicionalmente a la legislación para el control de las emisiones de los vehículos automotores, en algunos países ya existe legislación para el control de las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos de fuentes estacionarias: industria química, petroquímica y plantas eléctricas.

El éxito de la tecnología de los convertidores catalíticos ha permitido mayor confianza para emplear catalizadores en otras aplicaciones que contribuyen a un ambiente más limpio. En la actualidad se usan catalizadores para disminuir las emisiones²³⁻³¹ de motores diesel y otros motores operados con combustibles alternativos como gas natural, en la manufactura de productos químicos, en plantas eléctricas, en restaurantes e industrias donde se procesan alimentos, en aviones comerciales, en la conversión de desechos tóxicos a productos benignos y en motores pequeños. La tabla 3 presenta el desarrollo cronológico de las aplicaciones de catalizadores que han contribuido a limpiar el medio ambiente³².

Sin embargo, la catálisis no está restringida a la eliminación de los contaminantes después de formados. Por ejemplo, en la industria del petróleo, los catalizadores de hidrotratamiento se usan para reducir el contenido de azufre y nitrógeno de las fracciones de crudo antes de la producción de gasolina, diesel y "fuel oil". De esta manera se minimizan las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno a la atmósfera cuando los combustibles se queman. Para sustituir el plomo se requiere incrementar el número de

octano de la gasolina mediante el reformado catalítico y la síntesis de mejoradores de octano tales como MTBE (metil terbutil éter)³³.

Las resinas ácidas son los catalizadores más utilizados para la síntesis de MTBE a partir de isobuteno y metanol. No obstante, sólo toleran temperaturas moderadas y por lo tanto no pueden regenerarse mediante oxidación. Otros catalizadores ácidos sólidos incluyendo los basados en zeolitas se encuentran en varias etapas de desarrollo³³.

Tabla 2. Normas de emisiones permisibles en Colombia para fuentes móviles con motor a gasolina o diesel en condición de marcha mínima o ralenti[†].

Categoría de vehículo	Emisiones permisibles (g/Km)		
	CO	HC	NO _x
Vehículo liviano	2.10	0.25	0.62
Vehículo mediano	11.2	1.05	1.43
Vehículo pesado*	25.0	10.0**	

* Emisión en gramos/caballos fuerza-hora

** Emisión correspondiente a NO_x + HC

El isooctano, un componente de alto octano en la gasolina se produce por alquilación de butano. Los catalizadores actualmente utilizados para la producción de isooctano son HF y H₂SO₄ los cuales presentan varios problemas de seguridad en el manejo, transporte, almacenamiento y desecho del lodo ácido producido³³⁻³⁴. Varias compañías han reportado progresos recientes en el desarrollo de catalizadores sólidos ácidos y es posible que la comercialización de estos materiales ocurra en los próximos años³³.

Con relación a los clorofluorocarbonos la industria ha respondido rápidamente y me-

dante el uso de catalizadores está desarrollando y comercializando productos más seguros³⁴⁻³⁶. En la Tabla 4 se presentan algunos ejemplos de productos que son potenciales sustitutos de los CFC en refrigeración y aire acondicionado³⁶. Estos nuevos productos contienen átomos de hidrógeno. Como resultado, el tiempo de vida en la atmósfera es más corto debido a que son más inestables. Sin embargo, esto crea problemas en la síntesis, ya que al descomponerse rápidamente desactivan el catalizador. Por lo tanto, se han desarrollado catalizadores más resistentes. Adicionalmente, se ha reportado una amplia variedad de nuevas reaccio-

nes catalíticas para reemplazar los CFC. El desarrollo de procesos ha sido rápido y en

la actualidad los CFC se pueden reemplazar en los equipos tradicionales.

Tabla 3. Aplicaciones derivadas de la tecnología de convertidores catalíticos³².

AÑO	APLICACIÓN
1960's	Catalizadores de Pt para oxidación de HC y CO en maquinaria agrícola, minera y de trabajo pesado.
1968	Catalizadores de Pt para oxidar solventes, oxigenados y petroquímicos.
1975	Catalizadores de Pt y Pd para la oxidación de HC y CO de automóviles a gasolina.
1979	Catalizadores de Pt, Rh con óxidos de metales básicos para el control simultáneo de HC, CO y NO _x .
1980	Se comercializa V ₂ O ₅ para la reducción selectiva de NO _x con NH ₂ para plantas eléctricas.
1981	Catalizadores de Pd para reducir el O ₃ del sistema de entrada de aire en aviones comerciales de alto vuelo.
1982	Catalizadores de Pt para fogones.
1983	Catalizadores de Pt, Rh para la reducción no selectiva de NO _x de motores que operan con exceso de combustible.
1985	Catalizadores de Pt para reducción de HC y CO de plantas de cogeneración con turbinas a gas.
1988	Pt y óxidos de metales básicos para la oxidación catalítica de hidrocarburos halogenados de plantas químicas.
1992	Zeolitas para la reducción a alta temperatura de NO _x con NH ₃ de plantas eléctricas.
1994	Catalizadores a base de CeO ₂ para el control de los particulados líquidos de camionetas operadas con diesel.
1995	Co-zeolitas para la descomposición de N ₂ O en industrias químicas.
1995	Disminución de las emisiones de aceite vegetal y emisiones gaseosas en restaurantes.
1995	Convertidores de tres vías con alto contenido de Pd.
1996	Convertidores de tres vías que sólo contienen Pd.
1996	Catalizadores de Pt, Pd para motores pequeños.
1996	Catalizadores con recubrimientos de CeO ₂ y ZrO ₂ en componentes de motores para buses de dos ciclos.
1996	Pt-zeolitas para el control de emisiones de vehículos livianos con motor diesel.

Tabla 4. Refrigerantes potenciales para reemplazar los CFC³⁶.

CFC	SUSTITUTO
CFC-12 (CF ₂ Cl ₂)	HFC-134a (CF ₃ CFH ₂) HFC-22 (CHF ₂ Cl) HFC-32 (CH ₂ F ₂) HFC-125 (CF ₃ CF ₂ H) HFC-152a (CH ₃ CHF ₂)

4. RETOS FUTUROS

- *Control de emisiones en motores de gasolina con convertidores catalíticos durante el arranque en frío del motor*

Los datos de inspección sobre las emisiones de los vehículos equipados con convertidores catalíticos de tres vías revelan que alrededor del 80% de las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono ocurren en los dos primeros minutos del arranque en frío del motor. Esto sucede porque los catalizadores no funcionan por debajo de cierta temperatura. Aunque varios intentos de solución se han estudiado, el objetivo de algunos trabajos recientes importantes³⁷⁻³⁸ es la elaboración de soportes catalíticos hechos de acero inoxidable de alto grado, recubiertos con una película de alúmina estabilizada e impregnada con metales nobles activos (platino, paladio y rodio). Se hace pasar una corriente eléctrica a través de este aparato, el cual calienta las superficies del catalizador donde la reacción toma lugar. La demanda de corriente eléctrica del aparato es similar a la requerida para el arranque del motor. Por lo tanto, se cree que está dentro de la tecnología de las baterías modernas. El convertidor calentado eléctricamente se encuentra en evaluación por algunas compañías de automóviles. Sin embargo, la durabilidad, los requerimientos de energía y los costos del sustrato metálico

y del sistema de control hacen esta alternativa poco favorable en relación con otras soluciones, por ejemplo: la instalación de un catalizador cerca a la salida del motor³². En este caso, los gases de salida calientes permiten alcanzar las temperaturas adecuadas en aproximadamente 10 seg. La función primaria de este catalizador es oxidar los hidrocarburos durante los primeros dos minutos. Un catalizador adicional de tres vías se ubica más abajo para funcionar en los ciclos siguientes. No obstante, este diseño expone el catalizador a temperaturas más altas incrementando las posibilidades de sinterización del metal o del sustrato³².

- *Reducción de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV)*

Una mayor reducción en las emisiones de COV de los vehículos operados con motores de gasolina se lograría produciendo combustibles de menor contenido de azufre y gasolina de menor presión de vapor. Para ello se requiere de nuevas tecnologías catalíticas de procesamiento para desulfurización más profunda y la producción de nuevos aditivos a la gasolina con menor presión de vapor³³. En Colombia, la resolución 898 de agosto 23/95 del Ministerio del Medio Ambiente establece los criterios ambientales de calidad de los combustibles utilizados en los motores de combustión interna. En la tabla 5 se indican

las especificaciones que debe cumplir la gasolina distribuida en el país y cuya calidad deberá mejorarse gradualmente hasta el año 2006⁶. La regulación también contempla la disminución del contenido de S de los combustibles diesel, combustóleo, carbón, y emulsiones o suspensiones de crudos pesados en agua o en cualquier otro líquido, o los de carbón mineral en agua⁶.

El control de las emisiones de COV de fuentes estacionarias puede lograrse usando incineradores catalíticos y adsorbentes regenerables³⁹⁻⁴⁰. Mientras que los alcanos con más de dos carbonos se pueden quemar fácilmente sobre catalizadores a base de metales nobles, la combustión catalítica de hidrocarburos refractarios, tal como el metano, es todavía un reto.

La combustión catalítica de hidrocarburos halogenados también es un reto, debido a los requerimientos en la estabilidad térmica e hidrotérmica del catalizador. En general, los metales nobles no son tolerantes a los halógenos a altas temperaturas, ya que bajo estas condiciones se forman compuestos orgánicos volátiles y algunos soportes, tal como alúmina, no funcionan bien en su pre-

sencia. Aunque se ha reportado progreso en esta dirección usando catalizadores soportados en fase líquida (sales fundidas), catalizadores metálicos básicos especialmente formulados y cromo soportado en zeolitas, estos resultados investigativos aun no se han validado comercialmente⁴¹⁻⁴².

- Motores de gasolina con exceso de oxígeno

Varias compañías, entre ellas Toyota, Honda y Mazda, están estudiando intensivamente la posibilidad de implementar nueva tecnología de motores con economía mejorada de combustible y menor generación de CO₂⁴³. Los vehículos con motores de gasolina que operan con relaciones aire/combustible por encima de la relación estequiométrica de 14.7 proporcionan un 25% de ahorro de combustible en comparación con los motores que operan estequiométricamente. Los convertidores catalíticos de tres vías solo operan eficientemente bajo condiciones estequiométricas. Por lo tanto, un catalizador capaz de eliminar los NO_x en presencia de cantidades excesivas de oxígeno continúa siendo una tecnología limitante.

Tabla 5. Requisitos de Calidad de las Gasolinas Colombianas⁶.

Parámetro	Unidad	Fecha de Vigencia		
		Enero 1/96	Enero 1/2001	Enero 1/2006
1. Octanaje mínimo				
1.1 Gasolina corr. (RON)	(RON+MON)/2	81	81	81
1.2 Gasolina Extra (RON)	(RON+MON)/2	86	86	86
2. RVP, máx	psia	8.5	8.1	8.1
3. Azufre, máx	% peso	0.1	0.05	0.03
4. Oxígeno, mín	% peso	—	2.0	2.0
5. Aromáticos, máx	% volumen	28.0	25.0	25.0
6. Benceno, máx	% volumen	1.1	1.0	1.0

- Catalizadores para motores parcialmente ricos en oxígeno

Toyota ha sido pionera en el desarrollo de un sistema motor/catalizador que opera bajo condiciones de exceso de oxígeno durante condiciones de cruce con un resultado de 5-6% de ahorro de combustible⁴⁴. Los NO_x generados se almacenan en un óxido de tierra alcalina, BaO por ejemplo, incorporado en un convertidor catalítico de tres vías. El motor opera periódicamente bajo condiciones de exceso de combustible por un corto tiempo en el cual los NO_x almacenados se reducen. Este sistema está disponible en Japón donde se usan combustibles bajos en azufre. En otras regiones como Estados Unidos y Europa, la mayor concentración de los óxidos de azufre presentes en los gases de salida compiten con los NO_x por los mismos sitios. Algunos óxidos de azufre adsorbidos se desadsorben durante el pulso rico en combustible pero a una tasa menor que los NO_x resultando en desactivación permanente de la función almacenadora de NO_x . Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos materiales o alternativas de solución a este problema.

- Catalizadores para reducir las emisiones de NO_x de vehículos diesel

Dada la tendencia actual por mejorar la economía de combustible y disminuir las emisiones de gases de invernadero como el CO_2 , se proyecta que la demanda mundial de motores diesel se incrementará en los próximos años. Por lo tanto, es de gran importancia desarrollar tecnologías catalíticas que permitan la eliminación de los NO_x ya sea por descomposición directa a N_2 y O_2 o por reducción usando hidrocarburos a bordo como el combustible diesel.

Debido a la dificultad de desarrollar catalizadores para la descomposición de los NO_x , la alternativa de reducir los NO_x usando combustible diesel se encuentra bajo investigación por varias empresas que fabrican motores, compañías de catalizadores y universidades en todo el mundo. El catalizador por desarrollar para la reducción de NO_x en motores diesel debe tener actividad a baja temperatura y selectividad para la reducción de NO_x , pero baja actividad para la oxidación de SO_2 a SO_3 a altas temperaturas. El S proviene del combustible y del aceite del motor⁴⁵. La tolerancia del catalizador a la presencia de azufre es sumamente importante. El desarrollo de catalizadores con los que se obtengan conversiones de NO_x superiores a 80% es el mayor objetivo de las compañías de vehículos y catalizadores. Esto continúa siendo un desafío y la solución representará un descubrimiento importante en la tecnología catalítica.

- Vehículos operados con gas natural bajo condiciones de exceso de oxígeno

La industria del transporte está experimentando un crecimiento continuo en el uso de motores que operan con gas natural comprimido. Debido a que las emisiones de material particulado son bajas, estos motores se consideran viables para sustituir los motores diesel de buses y otros vehículos en ambientes urbanos. No obstante, se instalan catalizadores en muchos de estos vehículos para quemar los hidrocarburos diferentes al metano, CO y el material particulado. El metano, que comprende el mayor componente de las emisiones de hidrocarburos no contribuye al "smog" fotoquímico pero es un poderoso gas de invernadero. Hasta la fecha, el único catalizador capaz de oxidar metano a una velocidad considerable es el Pd, pero sólo

cuando la temperatura de los gases excede 300-350°C. Un estudio reciente identificó que las trazas de S (< 1ppm) presentes en el combustible o en el aceite se adsorben selectivamente en el catalizador disminuyendo significativamente la actividad para la combustión de metano⁴⁶. El descubrimiento de un catalizador para quemar metano que opere a baja temperatura y que sea tolerante a los SO_x representa un importante desafío para el futuro.

5. CONCLUSIÓN

Ultimamente se ha observado un aumento de problemas ambientales verdaderamente globales. El agotamiento de la capa de ozono es el resultado del consumo de combustibles fósiles y de la amplia utilización de clorofluorocarbonos CFC. Además, la ignición de combustibles fósiles ha incrementado el contenido de CO₂ de la atmósfera lo que ha venido generando un incremento de las temperaturas globales. Puesto que casi

todos los países dependen en mayor o menor grado de los combustibles fósiles para activar sus economías, se debe mejorar la eficiencia en el consumo de energía y utilizar combustibles que emitan menos CO₂. La tecnología catalítica ha jugado un papel decisivo en la reducción de las emisiones provenientes de sistemas de combustión y en el desarrollo de sustitutos para los CFC. Los motores que trabajan con gasolina o diesel bajo condiciones de exceso de oxígeno presentan mejoras en el consumo de combustible. No obstante, se requiere investigación adicional para el desarrollo catalizadores activos y selectivos que eliminen los óxidos de nitrógeno y que sean tolerantes a concentraciones moderadas de óxidos de azufre.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece los aportes de Colciencias y la Universidad de Antioquia al proyecto "Catalizadores para el Control de la Contaminación Ambiental- Fase II"

REFERENCIAS

1. FIELD, B.C. *Economía y Ambiente*, traducido por L. Cano, McGraw-Hill Co, Santafé de Bogotá, 1996, p. XII.
2. SARMIENTO, L. "Desarrollo, Sociedad, Cultura y Medio Ambiente", en: El Entorno Natural y Construido del Hombre Colombiano, Colciencias, Tercer Mundo Editores, Santafé de Bogotá, 1993, p. 54.
3. DAVID, L. G. "El Ministerio entra en Ambiente", en: Ozono, Revista Ecológica, Grupo Editorial Andino, Marzo 1995, p. 24.
4. *Unidad de Planeación Minero Energética*, Ministerio de Minas y Energía, Plan Energético Nacional, Tercer Mundo Editores, Santafé de Bogotá, 1994, pp. 240-260.
5. El Tiempo, "Medio Ambiente", Junio 23, 1997, p. 1D.
6. Ministerio del Medio Ambiente, *Normas para la Protección y el Control de la Calidad del Aire*, Imprenta Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 1996, p 162.

7. ACRES, G.J. "The application of catalyst technology to pollution control", Johnson Matthey plc, 78 Hatton Garden, London EC1N 8JP.
8. WAYNE, R.P., "Chemistry of Atmospheres", Oxford University Press, 1985, pp. 113-173.
9. <http://www.nobel.se/announcement-95/announcement95-chemistry-html>.
10. FORZIDI, Alphonse "The Chlorofluorocarbon Problem" en John H. Cumberland, James R. Hibbs and Irving Hoch, (eds), The economics of Managing Chlorofluorocarbons, Resources for the future, Washington, D.C., 1982, p.54.
11. WATSON, Robert "Atmospheric Ozone", en James G. Titus (ed.), Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate, Vol 1, Overview. Environmental Protection Agency, Washington D.C., 1986, p. 69.
12. MORRISSETTE, Peter M. "The evolution of Policy Responses to Stratospheric Ozone Depletion", Natural Resources Journal, 29(3), Summer 1989, pp. 793-80.
13. HOUGHTON, J.T., JENKINS, G.J., and EPHROUMS, J.J. (eds), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, 1990.
14. TITUS, James G. and Stephen R. SEIDEL, "Overview of the Effects of Changing the Atmosphere", en James G. Titus (ed.) Effect of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate, Vol 1, Overview, U.S., Environmental Protection Agency, 1986, pp 3-19.
15. Office of Technology Assessment, *Changing by Degrees, Steps to reduce Greenhouse Gases*, Washington, D.C., 1991.
16. LEMONICK, Michael D. "Heading for Apocalypse?", Time Magazine, Vol 146, 14, 1995.
17. KENZY Tamaru, G. Alezander MILLS, "Catalysts for control of exhaust emissions", Catalysis Today 22, 1994, pp. 349-360.
18. HARRISON, David Jr. "Who pays for Clean air: The Cost and Benefit Distribution of Federal Automobile Emissions Standards, Ballinger, Cambridge, Mass., 1975.
19. HARRIFIELD John: "A Critical Review of the Evolutionary Approach to Air Pollution Abatement Policy", Journal of Policy Analysis and Management, 9(3), 1990, pp. 367-380.
20. HECK, R. and R. FARRAUTO, *Catalytic Air Pollution Control. Commercial Technology*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1995.
21. WIEDEMAN, H., L. RAFF and R. NOODS, SAE 840141, 1984.
22. TAYLOR, K. *Catalysis Reviews*, 35, No. 4, 1993, p. 457.
23. JOCHHEIM, J., D. HESSE, T. DUESTERDIEK, W. ENGELER, D. NEYER, J. WARREN, J. WILKINS and M. Twigg, SAE 962042, 1996.
24. HOKE, J.; D. ANDERSON, R. HECK, T. POLES and J. STEGER, SAE 960800, 1996.
25. FARRAUTO, R. and R. HECK, "Precious Metal Catalysis", in Encyclopedia of Chemical Processing and Design, de John McKetta, Marcel-Dekker, New York, 1992, 218.
26. HOKE, J.; M. LARKIN, R. FARRAUTO, K. VOSS, R. WHITELY and L. QUICK, U.S. Patent 5,580535.

27. PFEFFERLE, W. U.S. Patent 3, 928,961.
28. FARRAUTO, R.; M. LARKIN, J. FU and J. FEELEY, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 344, 1994, p.101.
29. Chambers, J. *Materials Research Society Symposium Proceedings* 344, 1994, 1.
30. DALLA Betta, R., F. RIBEIRO, T. SHOJOI, K. TSURUMI, N. ESAWA and S. NICHOLAS, U.S. Patent 5,250,489.
31. J. MOONEY, J., H. HWANG, K. DABY and J. WINBERG, SAE 941087, 1994.
32. FARRAUTO, R. and R. HECK, " *Catalytic Converters: State of the art and Perspectives*", private communication, June 25, 1997.
33. BELL, A.T., L. E. MANZER, N.Y. CHEN, V.W. WEEKMAN, L. L. HEGEDUS, C. J. PEREIRA, " *Protecting the environment through Catalysis*", Chem Eng. Prog., February 1995, pp. 26-34.
34. RABO, J. A. " *Catalysis: Past, Present and Future*", in Guzzi, I. (eds), *New Frontiers in Catalysis*, Proceeding of the 10th International Congress in Catalysis, 19-24 July, 1992, Budapest, Hungary, 1993, Elsevier Science Publishers, pp. 1-30.
35. MANZER, L. E., " *The CFC-Ozone Issue: Progress on the Development of Alternative CFCs*", Science, 1990, pp. 31-35.
36. MANZER, L. E., and V.N.M. Rao, " *The Catalytic Synthesis of Chlorofluorocarbons (CFC) Alternatives*", *Advances in Catalysis*, 39, 1993, p. 329.
37. WITTENBERGER, W. A., and J. E. Kubsh, " *Electrically Heated Metal Substrate Durability*", SAE 910613, 1991.
38. Y. SHIMASAKI, H. KATO, F. ABE, S. HASHIMOTO AND T. KANEKO, SAE 971031, 1997.
39. JENNINGS, M.C., et al., " *Catalytic Incineration for Control of Volatile Organic Compound Emissions*", Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1985.
40. SPIVEY, J. J., " *Recovery of Volatile Organics from Small Industrial Sources*", *Env. Progress*, 7, 1, 1988, pp. 31-40.
41. KITTRELL, J. R., et al., " *Direct Catalytic Oxidation of Halogenated Hydrocarbons*", *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 41, 8, 1991, p. 1129.
42. CHATERJEE, S., and H. L. GREENE, " *Oxidative Catalysis of Chlorinated Hydrocarbons by Metal-Loaded Acid Catalysts*", *J. Catalysis*, 130, 1991, p.76.
43. M. IWAMOTO and H. HAMADA, *Catalysis Today* 10, 1991.
44. MIYOSHI, M., S. MATSUMOTO, K. KATOH, T. TANAKA, J. HARADA, N. TAKAJASHI, K. YOKOTAS, M. SIGIURA and K. KASHARA, SAE 950809, 1995.
45. ZELENKA, P., W. CARTELLIERI and P. HERZOG, *Applied Catalysis B: Environmental* 10: 1-3, 1996, 3.
46. J. LAMPERT, J., S. KAZI and R. FARRAUTO, SAE 961971, 1996.
47. DEGOBERT, P. *Automobiles and Pollution*, Instituto Francés del Petróleo, Ed. Tecnip, Paris 1995 p. 10.