

Biodiesel

Una revisión del desempeño mecánico y ambiental

John R. Agudelo S.* , Pedro Benjumea** ,
Edwin Gómez Meneses*** y Juan Fernando Pérez Bayer***

Resumen

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica de investigaciones relevantes relacionadas con el desempeño mecánico y ambiental de motores diesel, utilizando diversos combustibles, entre ellos el diesel convencional y alquilésteres obtenidos de aceites vegetales (biodiesel). Aunque las tendencias observadas dependen fuertemente del tipo de aceite del que provienen los alquilésteres, se puede concluir que a medida que se incrementa el porcentaje de biodiesel en las mezclas biodiesel–diesel disminuye la potencia y aumenta el consumo de combustible. También disminuyen el CO, Hc, material particulado, hollín y la opacidad de humos. De otro lado, los No_x aumentan o disminuyen dependiendo de la afinación del motor.

La potencia disminuye entre 2 y 10% para B30 y B100 respectivamente. El consumo de combustible aumenta entre 10 y 24%, para el biodiesel y sus mezclas, debido al menor poder calorífico del biocombustible comparado con el del diesel convencional. Las emisiones de CO disminuyen de 10 a 50%, Hc 12 a 55%, con B30 y B100 respectivamente. La opacidad de humos disminuye entre 0 y 30% y los So_x entre 20 y 100%, debido al escaso contenido de azufre del biodiesel. La reducción «global» de CO₂ es de 16 a 78,4% para B20 y B100 respectivamente. La ventaja medioambiental de tipo global del biodiesel es el cierre del ciclo de vida del CO₂ (emisión nula), pues las plantas oleaginosas por medio del proceso de fotosíntesis toman este gas y lo transforman en oxígeno.

Palabras clave: Biodiesel, Motores diesel, desempeño mecánico, emisiones contaminantes.

Abstract

In this paper, a review of different investigations about mechanical performance and emissions from diesel engines fuelled by several fuels, such as conventional diesel fuel and alternative fuels derived from vegetable oils, is presented. Although, the observed trends, strongly, depend on the type of vegetable oil used as raw material, it is possible to conclude that an increase in biodiesel percent in the biodiesel – diesel blends, leads to a decrease in power

Fecha de recepción: 21 de agosto de 2002

* Ingeniero Mecánico (Universidad de Antioquia); Doctor en Ciencias Térmicas (Universidad Politécnica de Madrid). Grupo Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía de la Universidad de Antioquia. jragude@udea.edu.co

** Ingeniero de Petróleos (Facultad de Minas); Master en Ingeniería del Gas (Salford). Profesor Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional sede Medellín.

*** Estudiantes de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional sede Medellín.

and an increase in fuel consumption. Smoke opacity and emissions of CO, HC, particulate matter and soot are also reduced. In regard to nox, an increase or a decrease could be expected depending on the tuning of the engine.

Power diminishes between 2 and 10% for B30 and B100 respectively. Fuel consumption increases between 10 and 24% for biodiesel and its blends due to the biodiesel lesser heating value. Emissions of co diminish from 10 to 50%, HC from 12 to 55%, for B30 and B100 respectively. Smoke opacity decreases between 0 and 30% and SO_x emissions also diminish between 20 to 100% due to the lesser content of sulfur in the biodiesel. The global reduction of CO₂ is between 16 and 78,4% for B20 and B100.

The environmental advantage from biodiesel, is the life cycle of CO₂ being closed.

Key words: Biodiesel, diesel engines, mechanical performance, emissions.

INTRODUCCIÓN

La crisis petrolera de los años setenta dio comienzo a la búsqueda de nuevas alternativas energéticas, cuyo fin fue reemplazar los recursos de origen fósil parcial o totalmente; y se incrementaron además los controles estadísticos de la actividad petrolera en el ámbito mundial, lo cual arrojó información que tuvo en alerta a todas las naciones.

Desde el año 1991 hasta el 2001 se observó una tendencia mundial creciente del consumo anual del petróleo en torno al 2%. Varios autores coinciden en que hacia el 2025 el precio del petróleo se hará insostenible debido a que las reservas se calculan hasta el 2040 [1-3].

En Colombia se comienza a visualizar un panorama preocupante, ya que el informe estadístico presentado por la empresa colombiana de petróleos –ECOPETROL– hasta el año 1999 señala que las reservas probadas de crudo y de gas disminuyeron en 7,6% y 4%, respectivamente, con lo que la autosuficiencia del país, según estimados, sería hasta el 2006 en crudo y sus derivados y hasta el 2010 en gas natural [4]. Estos datos los reitera la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, que afirma que de no encontrar nuevas reservas se producirá un fuerte golpe en la balanza de pagos del país a partir del 2005 y tres años después éste perderá su autosuficiencia, lo cual le restará oportunidades de crecimiento, desarrollo y bienestar [5].

Otro elemento de juicio al momento de usar combustibles fósiles es su potencial de generación de emisiones contaminantes, entre los cuales se encuentran el dióxido de Carbono (CO₂), principal gas causante del efecto invernadero; monóxido de Carbono (CO), que tiene efectos letales sobre el hombre; óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos inquemados o parcialmente quemados (HC), principales formadores de *smog* fotoquímico en presencia de luz; emisiones sulfurosas (SO_x), causantes de la

lluvia ácida, generador de sulfatos, y material particulado, causante de enfermedades respiratorias y cáncer [6-8].

Además de dicho impacto ambiental es importante destacar la mala calidad del diesel colombiano, el cual se encuentra clasificado actualmente como grado N° 4 por ECOPEL. De acuerdo con la norma STM D975-02, este grado es apto para trabajar en motores diesel estacionarios a bajas y medias velocidades, no obstante en Colombia este combustible es utilizado en las fuentes móviles (tractocamiones, buses y automóviles). En la tabla 1 se encuentran los límites permisibles en cuanto al contenido de azufre para diferentes combustibles diesel. Obsérvese que para la fecha, el diesel corriente colombiano contiene cerca de 13 veces más azufre que el diesel europeo y norteamericano [9]. Adicionalmente, la capacidad de producción de diesel premium sólo permite que éste sea distribuido en la capital del país, en la cual se concentra cerca del 40% de la flota de vehículos con motores diesel del país.

Tabla 1

Límites permisibles para el contenido de azufre de los combustibles diesel

Combustible	EEUU	Europa	Colombia	Premium colombiano	A partir del 2011 Europa y EEUU
Contenido de azufre [ppm]	350	350	4500	1000	10

Fuente: Revista Ingeniería Química.

En la tabla 2 se muestran las inversiones estimadas que requerirían las refinerías europeas para desulfurar el combustible diesel y la gasolina [10].

Tabla 2

Costos de inversión en las refinerías europeas [En gigaeuros]

Nivel de azufre	De 350 a 50 ppm	De 50 a 30 ppm	De 50 a 10 ppm
Gasolina	6,8	1,5	4,8
Diesel	8,4	2,4	6,7
TOTAL	15,3	3,9	11,5

Fuente: Revista Ingeniería Química.

Es importante resaltar que el contenido de azufre en los combustibles, además de causar la lluvia ácida, genera un incremento en el material particulado –sulfatos– e interviene negativamente en la entrada de tecnologías nuevas de motores diesel al país, pues los nuevos motores diesel traen sistemas de postratamiento de gases de escape, que se dañan rápidamente si el combustible no es apropiado.

Una alternativa que ha generado impactos positivos en los países europeos y en Estados Unidos, en cuanto a los motores de encendido por compresión (motores diesel), es el llamado biodiesel, combustible que proviene de cultivos energéticos (plantas oleaginosas) o de grasas animales, lo cual ofrece la característica de energía renovable, biodegradable y no tóxica, es decir que es un recurso que puede generarse naturalmente al derivarse de cultivos energéticos que están sometidos a ciclos, por esto se puede afirmar que este tipo de energía se mantiene más o menos constante en la naturaleza [11].

Como lo expresa Shafer [12], la mejor solución para usar un combustible alternativo es que el motor sea compatible con ambos y que además el nuevo sea ambientalmente más limpio comparado con el combustible convencional. Según esta exigencia, el biodiesel, y especialmente para el país el de aceite de palma, se puede catalogar como una alternativa viable para ser utilizado en motores diesel, ya que por sus características puede ser quemado puro o en mezclas, en cualquier proporción, con el combustible convencional (diesel), sin necesidad de realizar cambios drásticos en el motor, lo cual genera una reducción en los gases de emisión.

Desempeño mecánico

A continuación se presenta una revisión bibliográfica de las investigaciones más destacadas en lo referente al desempeño mecánico de los motores diesel utilizando como combustible biodiesel. Se ha recopilado información de pruebas tanto estacionarias (en banco de ensayos de motor) como en ruta o en banco de chasis dinámico.

Gafar *et al.* [13] presentan la evaluación del desempeño de diferentes mezclas, diesel-biodiesel, en un motor diesel estacionario. Los combustibles evaluados fueron biodiesel puro (B100), 70-30 (70% diesel y 30% biodiesel –B30–) y el diesel de Indonesia. Los parámetros evaluados en el motor en esta investigación fueron el torque, la potencia y el consumo específico de combustible. El torque decrece a medida que aumenta la cantidad de biodiesel en la mezcla, la potencia del motor decrece un 8% cuando se quema B100 y decrece 2% con B30, el consumo aumenta a medida que aumenta la cantidad de biodiesel en la mezcla (aumenta 24% con B100 y 11% con B30). Resultados muy similares a éstos fueron publicados por Tickell [2], quien demostró que el uso del biodiesel en los motores diesel genera en promedio una disminución de un 5% en el torque y en la potencia, y afirmó que el desempeño de los vehículos que usan biocombustibles no se ve afectado notablemente.

Pischinger *et al.* [14] reportaron un mayor consumo de combustible al utilizar biodiesel de aceite de soya en ensayos estacionarios a plena carga, donde también se desarrolló una potencia y un torque ligeramente inferiores que con el diesel. Los resultados de Clark *et al.* [15] también mostraron una ligera reducción de la potencia

(2,5%) al usar biodiesel de aceite de soya, igual torque que con el diesel N° 2, y un aumento del consumo de combustible, debido al menor poder calorífico del biodiesel. Concluye que el desempeño del motor es muy similar y no presenta problemas de encendido y disminuye el ruido característico del encendido del motor, esto último confirmado por Choo *et al.* [16], quienes mostraron en sus ensayos realizados en estado estacionario con biodiesel de aceite de palma que el desempeño de los motores es bueno, dado que encienden fácilmente y disminuye el ruido característico del encendido del motor, teniendo en cuenta que no hay que realizar ningún cambio en el motor para poder utilizar el biocombustible.

En una revisión bibliográfica presentada en 1994 Shumacher *et al.* [17], quienes recopilaron resultados de 18 investigaciones publicadas en artículos científicos acerca de las emisiones y el desempeño de varios motores diesel utilizando como combustible esteres de diferentes tipos de aceite, manifiestan que la potencia de los motores disminuye al utilizar biodiesel, debido a la menor energía que contiene el biodiesel por unidad de volumen comparada con la del diesel, razón por la cual también se obtiene un mayor consumo de combustible. Masjuki *et al.* [18] al utilizar mezclas diesel-biodiesel de aceite de palma en un motor diesel multicilíndrico de inyección indirecta, encontraron que la potencia era menor con el biodiesel que con el diesel. Los resultados de potencia obtenidos fueron 9,2; 8,7; 7,9; 7,75 y 7,25 kW para B0, B25, B50, B75 y B100 respectivamente. Al igual que los anteriores investigadores, concluyen que las mezclas de combustible presentan un desempeño en el motor muy similar al del diesel convencional.

En igual forma Romig [19] en sus ensayos dinamométricos (motores estacionarios y en ruta), con mezclas biodiesel de aceite de soya y diesel ARB N° 2, encontró una reducción de potencia inversamente proporcional al porcentaje de biodiesel en la mezcla. Resultados similares fueron reportados por Choo *et al.* [3], quienes destacaron en su revisión que la potencia disminuía ligeramente al utilizar biodiesel, con un pequeño aumento del consumo de combustible.

Algunos investigadores encontraron que la potencia en lugar de disminuir sufría un ligero aumento, tal es el caso de Sapuan *et al.* [20], Masjuki *et al.* [21] y Agudelo *et al.* [26]. En cuanto al consumo específico de combustible, los mismos autores coinciden en que se incrementa en un 10% el del biodiesel debido a que su poder calorífico es menor comparado con el del diesel, 10% en volumen aproximadamente.

Otras investigaciones [22-24], además de coincidir con lo anterior, afirman que la combustión es mucho más completa, debido a la presencia de oxígeno «extra» que aporta la molécula de biodiesel. En términos generales se observa un tiempo de retraso menor con el biodiesel comparado con el diesel.

Los resultados de los ensayos realizados en ruta son también muy prometedores, tal es el caso de Shäfer [12], quien presenta un informe en el que compara el desempeño del metiléster de aceite de palma y del metiléster de aceite de colza con el diesel convencional, en un vehículo. La evaluación en ruta mostró una caída de potencia y un mayor consumo de combustible comparado con el diesel. De igual manera, Staat *et al.* [25] reportan una disminución de potencia del 6 al 7% cuando se utiliza B100. En sus investigaciones en una flota de buses y camiones notaron que los conductores de buses no notaron esta diferencia, mientras que los conductores de camión sí experimentaron el cambio, conduciendo cuesta arriba. Resultados contrarios, en cuanto a potencia, obtuvieron Agudelo *et al.* [26], quienes observaron un aumento en la potencia, en torno a un 10%, de un vehículo en ruta utilizando como combustible la mezcla B30.

En una investigación desarrollada por la Universidad Argentina de la Empresa (UADE) [27] se evaluó el desempeño de dos tractores agrícolas utilizando como combustible biodiesel (B100) y diesel como base de comparación. El tractor uno al utilizar B100 mostró una reducción del 11% en la potencia máxima y un incremento del 8,7% en el consumo específico de combustible. En el tractor dos la potencia disminuyó en un 4,1% y el consumo se incrementó en 15,8%. De la misma forma Serdari *et al.* [28] concluyeron en su investigación realizada en seis vehículos siguiendo un ciclo de conducción, que se presentó un mayor consumo volumétrico de combustible con la mezcla B10, debido al menor poder calorífico de la mezcla, con respecto al diesel; contrario a esto, Wang *et al.* [29] obtuvieron resultados favorables para el biodiesel, ya que las pruebas realizadas en ruta no registraron una diferencia notable en cuanto al desempeño del motor, torque, potencia y consumo de combustible con respecto al diesel común.

Tinaut *et al.* [30] evaluaron el desempeño de dos vehículos en ruta utilizando 6 mezclas biodiesel de aceite de girasol-diesel en las proporciones 0% de biodiesel (combustible de referencia), 5%, 10%, 20%, 50% y 100% de biodiesel, donde el poder calorífico de la mezcla B100 es 7% menor que el diesel, pero para las mezclas inferiores a B20 el poder calorífico se mantiene dentro de los límites del diesel comercial. Encontraron que la potencia del vehículo no se ve afectada después de los 20.000 Km de evaluación y que el consumo de combustible no presenta ninguna tendencia durante dicho período; por esto, los investigadores concluyen que es factible y positivo el uso del metiléster de girasol como combustible en los motores diesel, en especial en proporciones del 20% o inferiores.

¿Afecta el biodiesel al aceite lubricante?

Algunos autores enfocan sus ensayos en la medición del desgaste del motor al utilizar biodiesel, como también la influencia de éste sobre el aceite lubricante. Entre éstos se destacan los ensayos realizados por Clark *et al.* [15], quienes monitorearon

el desgaste de un motor estacionario mediante el análisis del contenido de metales del aceite lubricante que arrojó niveles de desgaste normales. Pischinger *et al.* [14] midieron el desgaste del motor en sus ensayos con biodiesel, con una frecuencia de un día. Al desarmar el motor y medir el desgaste en cada una de sus partes, anillos, cilindro, etc., encontraron que el desgaste del motor estaba en condiciones normales.

Shäfer [12] enfocó su atención en el aceite lubricante, y afirmó que los productos de la combustión incompleta entran al aceite por medio de los anillos del pistón, se diluyen en éste y generan una disminución en su viscosidad; hecho evidenciado también por Choo *et al.* [3], quienes reportaron igualmente una pequeña dilución del biodiesel en el aceite lubricante. La pérdida de viscosidad del aceite lubricante puede llegar hasta el 5% [31].

Se ha comprobado que el uso de diesel bajo en azufre presenta problemas de lubricidad en el sistema de suministro de combustible [2]; dichos problemas desaparecen al utilizar biodiesel, debido a la lubricidad de éste, lo cual incrementa la vida de los motores. Según Staat *et al.* [25], en los motores de inyección directa se presenta una reducción en la viscosidad del aceite lubricante cuando se utiliza como combustible mezclas B50 o superiores, lo cual no genera cambios en el desgaste del motor ni en las otras propiedades del lubricante, mientras que en motores de inyección indirecta no se presenta la reducción de viscosidad.

Shumacher *et al.* [31] presentan un informe del seguimiento a 12 vehículos con motores diesel de inyección directa, en ruta durante un período de 8 años; empleando combustible diesel como referencia y mezclas B1, B2, B20, B50 y B100 de metilésteres y etilésteres de aceite de colza, soya y canola. En este estudio se analizó el aceite lubricante, para establecer el ritmo de desgaste de cada motor al utilizar los diferentes combustibles. Las muestras del aceite lubricante se tomaron en cada cambio para ser analizadas por espectrometría y registrar la cantidad en partes por millón de los metales presentes en el aceite, tales como hierro, cobre, cromo, silicio, plomo y aluminio. Del análisis estadístico se concluyó que el uso del biodiesel reduce la cantidad de aluminio, hierro, cromo y plomo presentes en el aceite lubricante de los motores diesel. Al comparar la información arrojada por el biodiesel de colza y el del soya se estableció que no hay diferencia estadística apreciable entre la cantidad de metales encontrados en los aceites lubricantes, por lo cual los autores afirman que el uso del biodiesel no genera un mayor desgaste que el uso del diesel. Resultados similares había obtenido Romig en 1995 [19].

Masjuki *et al.* [18] y Serdari *et al.* [28] mostraron que los niveles de partículas metálicas (Cu, Al, Fe, Pb, Cr) fueron normales para todas las mezclas diesel-biodiesel, incluyendo el B100, lo que les permitió concluir que el biodiesel probado no afecta la vida útil del motor.

Tinaut *et al.* [30], en sus ensayos de duración, realizados con B10 en un vehículo, durante 22.500 Km, obtuvieron un comportamiento adecuado del motor, pues la calidad del aceite resultó correcta en todas las muestras, incluso se pudo aumentar el período de cambio de aceite.

Desventajas en el motor al usar biodiesel

Diversos autores [2, 3, 12, 16, 25 y 27] exponen las desventajas de utilizar el biodiesel como combustible en los motores diesel, resaltan aspectos como el ataque a las mangueras (caucho) de conducción del combustible y a los sellos. Destacan también el ataque a las pinturas del motor [27], la mala fluidez de biodiesel a bajas temperaturas [30], y la tendencia a formar depósitos y obstrucciones, aunque otros autores cuestionan dicha tendencia al mostrar la capacidad detergente de los ésteres [32].

Un análisis efectuado a los biocombustibles arrojó que impurezas como glicéridos, glicerol, ácidos grasos libres y residuos de catalizador traen consecuencias desfavorables para el desempeño del motor, por ejemplo, depósitos de carbonilla –hollín– en los inyectores [12].

El poder calorífico del biodiesel es del orden del 13% en masa más bajo que el del diesel y cerca de 8% por unidad de volumen, sin embargo, no se refleja exactamente en la pérdida de potencia, debido a que el biodiesel tiene una densidad ligeramente más alta que el diesel.

Impacto ambiental

A escala mundial se han desarrollado diversas investigaciones con el propósito de establecer las diferencias entre las emisiones generadas por la combustión del biodiesel y del diesel convencional.

En términos generales se ha encontrado que los óxidos de nitrógeno (NO_x) incrementan proporcionalmente con el aumento de la concentración de biodiesel en las mezclas biodiesel-diesel, no obstante han sido reportados exitosos esfuerzos para reducir las emisiones de éstos. Por el contrario, la opacidad de humos, los hidrocarburos inquemados o parcialmente quemados (HC) y el CO decrecen a medida que se incrementa la concentración del biodiesel en las mezclas.

En los resultados reportados por Tickell [2] se aprecian reducciones «netas» de CO_2 del 100%, debido a que este gas es transformado por las plantas en oxígeno por medio del proceso de fotosíntesis; además reducciones de SO_2 cercanas al 100% debido a la ausencia de azufre en el biodiesel, de hollín entre 40-60%; de CO entre 10-50%; de HC entre 10-50%; y de aldehídos y compuestos poliaromáticos en torno a 13%. Igualmente afirma que puede haber reducción o incremento de las emisiones

de NO_x entre 5-10%, dependiendo del modelo del automóvil y de la afinación del motor. El olor de los gases de emisión del biodiesel reemplaza el olor típico de los gases del diesel por un olor a papas fritas. Shumacher *et al.* [31] y Lapuerta *et al.* [32] afirman que la ventaja medioambiental de tipo global, derivada del uso de los ésteres como combustibles para motores diesel, es el cierre del ciclo de vida del CO_2 (*emisión nula de CO_2*), debido a que este gas es absorbido por fotosíntesis desde las plantaciones donde se extrae el aceite; y en cuanto a las ventajas de tipo local, pero no menos importantes, se resaltan la reducción de emisiones de óxidos de azufre y de sulfatos, debido al escaso contenido de azufre de los ésteres; reducciones de las emisiones de CO , HC y hollín, lo cual genera menor opacidad de humos y menores emisiones de partículas. Las emisiones de NO_x no se pueden precisar, ya que se encuentran experiencias donde éstas se incrementan y otras donde disminuyen. Conclusiones similares exponen Choo *et al.* [3].

La contribución de CO_2 generada por las emisiones de los aceites vegetales y sus ésteres es reducida y no necesariamente nula, pues dichas emisiones globales dependen del tipo de energía utilizada en la elaboración del biodiesel, al igual que el origen del metanol o etanol [34].

Mittelbach *et al.* [35] reportan los resultados logrados con metiléster de aceite de fritura obtenido de casas y restaurantes, recolectado durante un año. Obtuvieron resultados similares al metiléster de aceites vegetales: bajas emisiones de HC , CO y aumento de NO_x con una buena reducción de material particulado en comparación con el diesel N° 2.

Choo *et al.* [16] evalúan el biodiesel como combustible en motores estacionarios y ensayos de campo (*taxis, buses y camiones*), donde se observa reducción de HC , NO_x , CO , CO_2 y SO_2 . En una investigación similar con aceite de colza, llevada a cabo durante tres años, Staat *et al.* [25] estudiaron el desempeño de buses de servicio público, flotas de camiones y vehículos ligeros con B30, B50, B100 y diesel; en cuanto a los gases de emisión arrojados, se detectó un ligero incremento de los NO_x , reducción en los niveles de opacidad del humo y emisiones neutras de CO_2 . El uso de la mezcla B30 generaba una notable reducción de HC y material particulado, mientras que las emisiones de aldehídos, cetonas y NO_2 permanecen invariables; mientras que la mezcla B50 produce un ligero aumento en las emisiones de aldehídos y cetonas. Resultados similares en cuanto al aumento de las emisiones de aldehídos (25 – 35%) con biodiesel puro de aceite de colza obtuvo Hansen *et al.* [36], lo cual contradice los resultados obtenidos por Tickell [2].

Clark *et al.* [15] comparan las emisiones del metil y etiléster de aceite de soya con el diesel convencional. Las emisiones de HC y NO_x generadas por los ésteres son más bajas que las del diesel, mientras las emisiones de CO arrojan pocas diferencias entre los combustibles evaluados.

Masjuki *et al.* [21] presentan los resultados de emisiones al utilizar como combustible metiléster de aceite de palma precalentado a diferentes temperaturas, tomando como base de comparación el diesel ordinario. El estudio se llevó a cabo en un motor diesel de inyección indirecta, variando la temperatura del biodiesel y del aire de admisión. Las emisiones de CO₂ y HC son mayores al utilizar el diesel ordinario, excepto las de CO, que aumentan a medida que se incrementa la temperatura del metiléster.

Gafar *et al.* [13] evaluaron biodiesel de aceite de palma, B30 y diesel en un motor estacionario. Sus resultados muestran que a medida que se aumenta la cantidad de biodiesel disminuye el grado de opacidad y también disminuyen los niveles de gases de emisión. Resultados similares en cuanto a emisiones de motores en ruta obtuvieron [20, 26, 30 y 34].

Shäfer [12] observó en la evaluación de un motor monocilíndrico que las emisiones de NO_x del biodiesel de aceite de palma son similares o poco mayores que las del diesel, mientras que las del aceite de colza son considerablemente mayores; esto puede deberse a que el primero contiene más masa de oxígeno molecular y menos enlaces dobles. Las emisiones de HC del biodiesel de aceite de palma son más bajas que las del diesel. La evaluación en ruta se realizó con biodiesel de aceite de colza, y se resalta el olor de los gases de emisión similar al de «aceite de fritura». Resultados similares en cuanto a las emisiones sin modificar el motor obtuvo Romig [19] en evaluaciones en ruta.

Wang *et al.* [29] presentaron el análisis de emisiones basados en mediciones instantáneas realizadas a 9 camiones, mientras seguían un ciclo de conducción. El estudio de las emisiones en estado transitorio de la mezcla B35 comparadas con las del diesel, arrojó reducciones de las emisiones de CO y HC en torno a un 12%, las emisiones de NO_x fueron ligeramente mayores y se obtuvo una reducción del material particulado del 25%.

Hansen *et al.* [36] compararon las emisiones de un diesel bajo en azufre (500 ppm) con las del biodiesel de aceite de colza y obtuvieron con el último una reducción en un 42% de HC, la disminución en un 13% de CO, las emisiones de NO_x se incrementaron en un 23%, así como el material particulado.

Kumar *et al.* [37] evaluaron el desempeño mecánico, termodinámico y ambiental de un motor diesel monocilíndrico utilizando como combustibles aceite de *Jatropha*, metiléster de aceite de *Jatropha* y diesel. Los ensayos dinamométricos se hicieron a velocidad constante (1.500 rpm) utilizando los 3 combustibles de forma separada. Las emisiones de HC fueron mayores para el aceite crudo, con un incremento del 25%, mientras que las del éster aumentaron 15% comparadas con las del diesel, una tendencia similar exhiben las emisiones de CO, los niveles de humo fueron igualmen-

te mayores para el aceite crudo, con un incremento del 22%, no obstante los niveles de humo del éster aumentaron un 5,5% al compararlos con los niveles del diesel, una tendencia similar se observa en las emisiones de material particulado; también hay disminución en las emisiones de NO_x del aceite de *Jatropha* y del éster comparadas con las emisiones del diesel.

Dobiasch *et al.* [38] evaluaron una pequeña planta de cogeneración utilizando diferentes clases de aceites vegetales (colza, girasol, cardo, soya y euforbia), metilésteres (euforbia y residuos de grasa) y el diesel como base de comparación. Las mediciones se realizaron a un 85% de la potencia máxima desarrollada por el generador. Los resultados de la investigación mostraron mayores emisiones de NO_x comparadas con las del diesel, se observaron reducciones de CO, HC, material particulado y SO₂ al utilizar los combustibles alternativos; adicionalmente se evaluaron las emisiones de hidrocarburos poliaromáticos, y se obtuvo una reducción comparada con las emisiones del diesel. Los autores resaltan como una de las principales ventajas de los combustibles alternativos el cierre del ciclo del dióxido de carbono (CO₂).

En cuanto a emisiones de CO₂, el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos [39] afirma que el uso de B100 en buses urbanos reduce las emisiones de CO₂ en un 78,45%, y en mezcla B20 las reduce un 15,66%; por tanto, concluye el estudio que cambiar el diesel por biodiesel en los buses urbanos es una estrategia efectiva para reducir las emisiones de CO₂ y así mejorar la calidad del aire de las áreas urbanas.

Entre otros aspectos ambientales, cabe resaltar que el biodiesel es 100% biodegradable y no es tóxico, y su biodegradación alcanza a ser cuatro veces más rápida al compararla con la del diesel [2, 12 y 25], además es fácil y seguro de transportar, debido a su alto punto de ignición comparado con el del diesel [2, 16], lo cual reafirma su gran potencial como energía renovable.

El biodiesel y la salud humana

En cuanto al impacto que generan las emisiones del biodiesel en la salud, Hansen *et al.* [36] concluyen que la distribución del diámetro medio de las partículas del biodiesel es 10 veces mayor que las del diesel, lo cual las hace más difícil de ser inhaladas por el ser humano y que se depositen en los pulmones; además el análisis biológico del biodiesel presenta un impacto favorable para el aspecto de salubridad al compararlo con el análisis del diesel. Sin embargo, Lapuerta *et al.* [33] exponen en su investigación que la presencia de ésteres de aceites vegetales en el diesel convencional produce una drástica disminución del número de partículas, con un leve incremento en el tamaño medio de las mismas.

En un estudio realizado sobre un grupo de ratas sometidas durante 90 días a los gases de emisión, tales como NO_x , CO , CO_2 , HC , O_2 y material particulado, generados por la combustión del biodiesel, no se observaron resultados nocivos en su salud. Bajo ninguna concentración de los gases de emisión se determinó toxicidad en las ratas; no se observaron muertes anormales que se atribuyan a la exposición de las emisiones; tampoco hubo respuestas oculares adversas, no se afectó su consumo de alimento. Sólo cuando fueron sometidas a un alto nivel de emisiones, las ratas fueron negativamente afectadas, ya que se presentaron dos tipos de lesiones pulmonares, mientras que a concentraciones intermedias no se presentó ningún tipo de efectos adversos [40].

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Ingeniera Ambiental Lizeth Andrea Vahos Ceferino de la Universidad de Medellín (Colombia) por su colaboración en la elaboración de este artículo; y al grupo UREMA de la Universidad del Norte (Barranquilla-Colombia) por el suministro de información y su posterior discusión.

Bibliografía

- [1] BRITISH PETROLEUM COMPANY, «The BP Statistical Review Of World Energy». 2002. <http://bp.com>.
- [2] TICKELL JOSHUA, «From the fryer to the fuel tank, The complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel». Published by Tickell Energy Consulting. United States of America. 2000.
- [3] CHOO, Y., MA, AH-NGAN, «Plant Power». *Chemistry & Industry*, N° 16, 2000. p. 530.
- [4] <http://ecopetrol.com.co>
- [5] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, «Aspectos regulatorios de la distribución de combustibles en Colombia». Memorias del seminario *Biocombustibles: Soluciones ambientales totales*. Barranquilla (Colombia), Universidad del Norte, marzo de 2002.
- [6] AZNAR, P., CLIMENT, M., *Conocer la química del medio ambiente*. Parte I: *La Atmósfera*. Universidad Politécnica de Valencia, 1992.
- [7] OSTRO, B., ESKELAND, G., SÁNCHEZ, J., FEYZIOGLU, T., «La contaminación del aire y sus efectos en la salud: Un estudio de visitas médicas entre la población de niños en Santiago, Chile». *Noticias de seguridad*, Vol. 62, N° 10. Octubre, 2000.
- [8] BALLESTER, F., TENÍAS, J., PÉREZ, S., «Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: Una introducción». *Rev. Esp. Salud Pública*, Vol. 73, N° 2, 1999.
- [9] VAN ZEEBROECK, R. AGA, «La gasolina y el gasóleo diesel a partir del 2005. La propuesta de directiva de la Unión Europea». *Ingeniería Química*, N° 381. Julio-Agosto, 2001. p 215-218.
- [10] VAN ZEEBROECK, R. AGA, «Los combustibles de automoción a partir del año 2005. Un nuevo reto para las refinerías». *Ingeniería Química*, N° 375, enero de 2001, p 273-275.
- [11] TINAUT, F., CASTAÑO, V., LAPUERTA, M., *Bioenergía*. Vigo (España), Gamesal, 1999, capítulos 4 y 5.
- [12] SCHÄFER, ANSGAR, «The use of biofuel in modern diesel engines». *Proceedings of PORIM BIOFUEL '95*. PORIM International Biofuel Conference, 1995, p. 61.
- [13] GAFAR, A., WIDODO, J.S., SIDJABAT, O., LEGOWO, E.H., RAHMAN, M., HARIMURTI, K., SUTARDJO. & ISKANDAR, N.R., «Preparation of palm oil esters-diesel fuel mix and its performance test

- on stationary engine». *Proceedings of PORIM BIOFUEL '95*. PORIM International Biofuel Conference, 1995, p. 52.
- [14] PISCHINGER, G., SIEKMAN, R., FALCON, A., FERNÁNDEZ, F., «Methylesters of plant oils as diesel fuels, either straight or in blends». «Vegetable oil fuels». *Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*. August, 1982, Holiday Inn Fargo, North Dakota. American Society of Agricultural Engineers (ASAE publication 4-82). p198-208.
- [15] CLARK, S.J., WAGNER, L., SCHROCK, M.D. & PIENNAR, P.G., «Methyl and ethyl soybean esters as renewable fuels for diesel engines". *JAACS*, Vol. 61, N° 10 (October, 1984), p. 16.32. Presentado en la reunión anual de la American Oil Chemists Society (AOCS), Chicago, mayo de 1983.
- [16] CHOO, Y., MA, AH-NGAN, BARISON, YUSOF, «Production and evaluation of palm oil methyl ester as diesel substitute». *Proceedings of PORIM BIOFUEL '95*. PORIM International Biofuel Conference (1995), p. 15.
- [17] SCHUMACHER, L.G., KOLB, T.S. & BORGELT, S.C., *Biodiesel: World Status*. University of Missouri, 1994.
- [18] MASJUKI, H., ZAKI, A.M. & SAPUAN, S.M., «A rapid test to measure performance, emissions and wear of a diesel engine fueled with palm oil diesel». *JAACS*, Vol. 70, N° 10. October, 1993, p 1021.
- [19] ROMING, CLAUDE, «Exhaust emissions and engine performance from the use of soya metilester blended with ARB#2 diesel in a 6V92TA MUI engine». *Proceedings of PORIM BIOFUEL '95*. PORIM International Biofuel Conference. 1995, p 121-135.
- [20] SAPUAN, S.M., MASJUKI, H. & AZLAN, A., «The use of palm oil as diesel substitute», *Proceedings of ImechE*, Vol. 210 (1996), p. 47.
- [21] MASJUKI, H., ABDULMUIN, M.Z. & MIASTED, SII, H., «Investigations on preheated palm oil methyl esters in the diesel engine». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (IMechE)*, 1996, p 131-138.
- [22] CHOI, C.Y., BOWER, G.R. & RERTZ, R.D., «Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on DI diesel engines». University of Wisconsin- Madison. SAE technical paper series 970218.
- [23] CHANG, D., GERPEN, JON, INMOK, L., LAWRENCE, J., HAMMOND, E. & STEPHEN, M., «Fuel properties and emissions of soybean oil esters as diesel fuel». *JAACS*, Vol. 73, Nov., 1996.
- [24] SWAIN, E. & SHAEED, A., «An experimental study to evaluate the use of coconut based fuels as alternatives to diesel oil». *Journal of the institute of Energy*, V. 73, N° 495. January, 2000, p. 100.
- [25] STAAT, FREDERIC, GATAU & PAUL, «The effects of rapeseed oil methyl ester on diesel engine performance, exhaust emissions and long-term behavior - a summary of three years of experimentation». SAE paper N° 950053, 1995.
- [26] AGUDELO, J.R., PEÑA, D. & MEJÍA, R., «Pruebas de desempeño del ester metílico de aceite de palma en un motor diesel». *Revista Energética*, N° 26. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Diciembre de 2001.
- [27] Memorias seminario sobre biocombustibles. Universidad Argentina de la Empresa. Secretaría de Agricultura, ganadería, pesca y alimentación. Monsanto. (Argentina), 2001.
- [28] SERDARI, A., FRAGROUDIKIS, K., TEAS, C., SAKELLAROPOULOS, F., ZANNIKOS, F., STOURNAS, S. & LOIS, E., «Adding biodiesel corn oil and sunflower oil to diesel fuel: The impact on the performance of conventional road vehicles». *Journal of the Institute of Energy*, Vol. 71, N° 488, 1998, p. 126.
- [29] WANG, W., LYONS, D., CLARK, N., GAUTAM, M. & NORTON, P., «Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification». *Environmental Science and Technology*, Vol. 34, N° 6, 2000, p. 933.

- [30] TINAUT, F., MELGAR, A., BRICEÑO, YOLANDA & CASTAÑO, V., «Comportamiento del éster metílico de girasol como combustible en motores diesel». Universidad de Valladolid. Parque Tecnológico de Boecillo, 1998.
- [31] SCHUMACHER, L.G., PETERSON, C. & GERPEN, J., «Engine oil analysis of diesel engines fueled with biodiesel blends». *Annual International Meeting Sponsored by ASAE*. ASAE paper N° 01-6053. 2001.
- [32] LAPUERTA, M., ARMAS, O., HERNÁNDEZ, J. & BALLESTEROS, R., «Biocombustibles para motores diesel». *Laboreo*, N° 388, tomo 1, p. 53-59, 2002.
- [33] LAPUERTA, M., ARMAS, O. & BALLESTEROS, R., «Diesel particulate emissions from biofuels derived from spanish vegetable oils». SAE paper 2002-01-1657. 2002.
- [34] GARCÍA, CALVO, CUNILL, ANTONIO, TEJENO & JAVIER, «Los aceites vegetales y sus ésteres metílicos como combustibles». *Ingeniería Química*, Vol. 27, N° 313. Mayo, 1995, p. 151-157.
- [35] MITTELBACH, M. & TRITTHART, P., «Diesel fuel derived from vegetable oils, III. Emissions tests using methyl esters of used frying oil». *JAACS*, Vol. 65, N° 7, July, 1988.
- [36] HANSEN, DEN FRIIS, JENSEN, MICHAEL GROULEFF, «Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a DI diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (RME)», SAE paper N° 971689, 1997, p. 215.
- [37] KUMAR, M., ARMES A. & NAGALINGAM, B., «Investigations on the use of jatropha oil and its methyl ester as a fuel in a compression ignition engine». *Journal of the institute of Energy*, Vol. 74, N° 498. March, 2001, p. 24-28.
- [38] DOBIASCH, A. & MEYER, R., «Emission situation of regenerative fuel powered diesel engine». 1998.
- [39] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE), U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA), «An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycles». Paper under task N° BF886002. May, 1998.
- [40] LAVELACE RESPIRATORY RESEARCH INSTITUTE (LRRI), NATIONAL BIODIESEL BOARD (NBB), «Tier 2 testing of biodiesel exhaust emissions». Study report N° FY98-056. May, 2000.