

Emisiones gaseosas y opacidad del humo de un motor operando con bajas concentraciones de biodiesel de palma

John R. Agudelo*, Iván D. Bedoya** y Andrés F. Agudelo***

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de las prestaciones mecánicas y ambientales de un motor diesel de automoción de 2.5 litros de cilindrada, turboalimentado, montado en banco de ensayos, que utiliza diesel corriente y biodiesel de aceite de palma mezclado al 5, 10 y 20% en volumen. Los ensayos se realizaron a igualdad de energía en el cigüeñal para cada combustible, en cinco grados de carga estacionarios, representativos de las condiciones de operación del vehículo en ciudad.

Se obtuvo un incremento en el consumo específico de combustible respecto al diesel corriente en torno a 0.5, 1 y 1.7% al usar B5, B10 y B20 respectivamente. El rendimiento efectivo no sufrió cambios estadísticamente significativos, con lo cual se comprobó que la relación energía suministrada a energía obtenida en el cigüeñal se mantuvo constante independientemente de la mezcla de biodiesel.

Las emisiones específicas de THC (gTHC/kWh) disminuyeron aproximadamente en la misma proporción que el contenido de biodiesel en la mezcla (5, 10 y 20%, para B5, B10 y B20 respectivamente). Las de CO y la opacidad de humos (%) disminuyeron en la misma proporción, correspondiente con la mitad del contenido de biodiesel en la mezcla (2.5, 5 y 10%, para B5, B10 y B20 respectivamente). Las emisiones específicas de NOx incrementaron ligeramente, y alcanzaron un máximo para la mezcla B20 en torno al 3% respecto al diesel corriente. Se presentan los índices de emisión en términos de masa de contaminante por unidad de masa de combustible quemado.

Los resultados permiten concluir que el uso del biodiesel de aceite de palma mezclado en concentraciones inferiores al 20% con diesel convencional tiene ventajas ambientales significativas. Desde el punto de vista mecánico, el consumo adicional de combustible se ve apenas ligeramente incrementado sin afectar el rendimiento efectivo del motor.

Palabras claves: Emisiones gaseosas, opacidad del humo, motores diesel, biodiesel.

Fecha de recepción: 13 de junio de 2005
Fecha de aceptación: 9 de noviembre de 2005

* Ingeniero Mecánico, PhD., Grupo GASURE, Universidad de Antioquia. ragude@udea.edu.co.
Tel (+574) 210 5550

** Ingeniero Mecánico, MsC (c), Grupo GASURE, Universidad de Antioquia. ibedoyac@udea.edu.co

*** Ingeniero Mecánico, MsC (c), Grupo GASURE, Universidad de Antioquia. afagudel@udea.com.co

Abstract

In this paper an experimental comparison of mechanical and environmental performances obtained from a turbocharged, light duty 2.5 liters, automotive diesel engine mounted in a test bench, is presented. The engine used conventional diesel fuel and palm oil biodiesel blended at 5, 10 and 20% by volume. Tests were carried out under the same mean effective pressure for each fuel. Five engine loads in stationary conditions representative from city operation were tested.

Specific fuel consumption increased between 0.5 and 1.7% with B5 and B20 respectively, while the brake efficiency did not experienced any change with the use of biodiesel.

Specific THC emissions decreased approximately in the same proportion of biodiesel content in the blend (5, 10, 20% decrease respect to diesel fuel, for B5, B10 and B20 respectively). Specific CO and smoke opacity decreased by the half of the proportion of biodiesel content in the blend (2.5, 5 y 10%, for B5, B10 y B20 respectively). Specific NOx increased a maximum of around 3% when B20 was used. Emissions index in mass of contaminant per unit mass of burned fuel are presented.

Results show that low concentrations blends of palm oil biodiesel with diesel fuel have environmental advantages. Engine fuel consumption is lightly penalized while engine brake efficiency did not change.

Key words: Gaseous emissions, smoke opacity, diesel engines, biodiesel.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se ha comparado experimentalmente la variación en las prestaciones mecánicas y emisiones contaminantes gaseosas reguladas, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos totales (THC) y óxidos de nitrógeno (NOx), de un motor diesel turboalimentado de trabajo ligero al utilizar como combustible mezclas de diesel corriente y biodiesel. Las concentraciones en volumen (por galón) elegidas han sido 5, 10 y 20% de biodiesel de aceite de palma en diesel corriente (B5, B10 y B20). El 5% es representativo de los valores recomendados por el *World Wide Fuel Charter*, de diciembre de 2002 [1], a los que se han acogido los fabricantes de motores y equipos de inyección diesel en Estados Unidos y Europa [2, 3]. También se han elegido un 10% de mezcla y un 20% para comprobar con mayor claridad la influencia del biodiesel. Este último valor, además, es de uso común en Estados Unidos [4].

La literatura técnica internacional coincide en términos generales en que el uso de biodiesel, independientemente de la materia prima del que se produzca, tiene ventajas ambientales sobre el diesel corriente, excepto en las emisiones de NOx, las cuales tienden a incrementar ligeramente en función de la materia prima [4-13]. A igualdad de potencia en el eje del motor se produce

un incremento de combustible debido al menor poder calorífico del biodiesel. Si se hace la comparación suministrando la misma cantidad de combustible, se obtiene una pérdida de potencia proporcional a su menor poder calorífico. No obstante, el rendimiento efectivo no suele variar [4, 14-20].

El índice de emisión másico de CO_2 , definido como los kilogramos de CO_2 que se libera al quemar un kilogramo de combustible, es menor en el biodiesel que en el diesel debido a su mayor peso molecular; sin embargo, este análisis no es conveniente, en tanto que el biodiesel tiene menor poder calorífico y, por tanto, para igualdad de prestaciones se requiere quemar más masa. El índice de emisión energético de CO_2 , definido como los gramos de CO_2 que se liberan por cada MJ de energía del combustible, es mayor en el biodiesel que en el diesel. No obstante, hay que tener presente que al quemar el diesel, el 100% del CO_2 liberado va a incrementar el ya existente en el aire atmosférico, mientras que al quemar biodiesel, el CO_2 liberado es en parte reabsorbido por la planta de donde proviene [21].

Agudelo *et al.* [22] reportaron disminuciones del 30% en las emisiones de CO, del 80% en la opacidad del humo y un incremento del 5.8% en las emisiones de NOx en ralentí, al usar una mezcla B30 (biodiesel de aceite de palma) en un motor diesel *International DT 466* turboalimentado de trabajo pesado.

Agudelo y Benjumea [23] realizaron comparaciones de parámetros mecánicos y ambientales en un motor diesel de pequeña cilindrada monocilíndrico, un motor diesel de automoción de aspiración natural y un motor diesel de 24 litros de cilindrada para generación eléctrica, utilizando mezclas B5, B30 y B100 (biodiesel de aceite de palma) en los dos primeros y B100 en el último. Reportaron incrementos en el consumo específico de combustible entre 8 y 11% al usar B100 respecto a diesel corriente y diesel bajo azufre (400 ppm) respectivamente. No observaron variaciones en el rendimiento efectivo. La opacidad de humo se redujo en torno a 30%, mientras que el CO disminuyó en torno a 30% y los NOx (en porcentaje en volumen) disminuyeron en torno a 20% al usar B100.

En otro estudio, Agudelo *et al.* [24] estudiaron el efecto del uso de mezclas B20, B40, B60, B80 y B100 (biodiesel de aceite de palma) en un vehículo tipo Van. Los resultados mostraron que la autonomía del vehículo en kilómetros por galón no variaba, la opacidad del humo disminuía entre 50 y 90% para B20 y B100 respectivamente al comparar con diesel corriente y entre 30 y 70% al comparar con diesel bajo azufre (400 ppm).

En este artículo se presenta una comparación de las prestaciones mecánicas y ambientales de un motor diesel de automoción de 2.5 litros de cilindrada, turboalimentado, de trabajo ligero, montado en banco de ensayos, que utiliza diesel corriente y biodiesel de aceite de palma mezclado al 5, 10 y 20% en volumen. A diferencia de los trabajos anteriores, éste se enfoca en bajas concentraciones de mezcla diesel corriente-biodiesel de aceite de palma y profundiza en el tratamiento de las emisiones contaminantes presentándolas en valores de emisión específica e índices de emisión.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. En la figura 1 se muestra esquemáticamente la instalación.

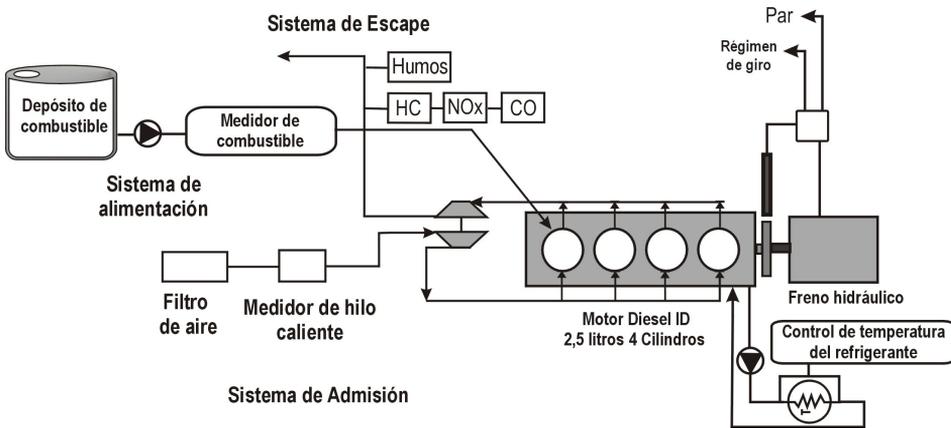


Figura 1. Motor sobre banco de ensayos. Sistemas auxiliares y de medida acoplados. M_e = par al freno, n = régimen de giro

El motor elegido para los ensayos es un Diesel turboalimentado de inyección directa, típico del parque automotor colombiano de trabajo ligero. Las características básicas de dicho motor se presentan en la tabla 1.

Tabla 1
Características técnicas del motor de ensayos

Tipo	Diesel inyección directa
Admisión	Turboalimentado
Desplazamiento	2499 cc
Nº de cilindros	4 en línea
Diámetro x carrera	93 x 92 mm
Potencia nominal	80 HP (59 kW)
Régimen de potencia nominal	4100 rpm
Par máximo	170 Nm
Régimen de par máximo	2300 rpm
Relación compresión	18.4

El banco de ensayos está equipado con termopares y sensores para la medida de temperaturas y presiones medias para caracterizar y monitorizar con precisión el punto de funcionamiento del motor. Los puntos de ubicación de los sensores son: entrada y salida del agua de refrigeración, aceite lubricante, salida del aire del compresor y salida de gases de la turbina, y punto de muestreo de emisiones gaseosas.

Los parámetros de par y régimen necesarios para la determinación de prestaciones se miden y controlan mediante un freno dinamométrico hidráulico GO-POWER Systems D512. El consumo de aire se realiza mediante sensor de hilo caliente debidamente calibrado. El consumo de combustible se realiza mediante un medidor de flujo másico Danfoss del tipo Coriolis .

Las emisiones gaseosas se obtuvieron directamente del sistema de escape a través de un equipo de gases portátil marca Lancom Series II, facilitado para los ensayos por la empresa *Haceb S.A* (tabla 2).

Tabla 2
Características técnicas del equipo de análisis de gases

Especificaciones	Magnitud
Celda electroquímica	NO _x , HC, O ₂ , CO
Precisión para O ₂	1% en Vol.
Precisión para otros gases	4% de la lectura
Base de medición	Seca

3. COMBUSTIBLES DE ENSAYO

El combustible diesel utilizado se adquirió en una estación de servicio de la ciudad, sus especificaciones aparecen en la norma técnica colombiana NTC 1438 [25]. Para el cálculo de los índices de emisión y de las emisiones específicas del CO_2 se requiere conocer el poder calorífico inferior del combustible, la fórmula química del combustible, y a partir de ésta su peso molecular (Apéndice A). Por falta de información, en este trabajo se utilizó para el diesel convencional la composición $\text{C}_{14.7}\text{H}_{28.8}$ sugerida por Villalta [26]. El poder calorífico inferior $PCI = 43 \text{ MJ/kg}$ se tomó de los valores reportados por Agudelo *et al.* [24].

El biodiesel de aceite de palma fue fabricado en *Interquim S.A.* Sus principales propiedades fisicoquímicas se reportan en Agudelo y Benjumea [23]. El poder calorífico inferior es $PCI = 37.05 \text{ MJ/kg}$. La composición del metiléster de aceite de palma (o biodiesel de aceite de palma) $\text{C}_{18.1203}\text{H}_{34.9963}\text{O}_2$ se obtuvo de Ramírez [27].

4. METODOLOGÍA

4.1. Selección de los modos de funcionamiento

En condiciones de conducción típicas de ciudad, los vehículos están sometidos a constantes paradas y arranques. Esto hace que gran parte del ciclo normal de conducción sea en estado transitorio y que pocas veces se alcancen condiciones de plena carga. Por este motivo se han desarrollado los ciclos de conducción para homologación de vehículos. Estos ciclos establecen perfiles de velocidad del vehículo en función del tiempo. En Colombia no existen ciclos de conducción propios. En muchas carreteras y ciudades de nuestro país hay pendientes que invalidan la aplicación de los ciclos de conducción internacionales a nivel local. Por esta razón se debe establecer un criterio para la definición de los modos de funcionamiento, definidos por un valor de par y régimen de giro del motor.

Lapuerta *et al.* [28] utilizaron este procedimiento para sus ensayos partiendo de los puntos representativos de funcionamiento de un vehículo ligero en el ciclo de conducción europeo. Convirtieron las condiciones del vehículo a régimen y par del motor a través de las ecuaciones que vinculan la dinámica del vehículo con las características del motor. Finalmente, por criterio de mayor peso específico de emisiones contaminantes seleccionaron una nube de puntos ubicados en la zona de bajo par. En este trabajo se ha optado por seleccionar cinco modos de funcionamiento en la zona de bajo par tomando como valores orientativos los obtenidos en dicha referencia (tabla 3).

Tabla 3
Modos de funcionamiento

Modo	M_e (Nm)	n (rpm)	pme (bar)	N_e (kW)
1	15	1.000	0.851	1.57
2	25	1.800	1.42	4.71
3	35	2.250	1.99	8.25
4	50	2.750	2.84	14.4
5	80	3.000	4.55	25.1

donde pme es la presión media efectiva y N_e la potencia efectiva del motor.

4.2. Repetitividad de los resultados

El estudio de las prestaciones mecánicas y emisiones contaminantes obtenidas con cada combustible, en los diferentes modos de operación del motor se realizó con un diseño experimental factorial, en el cual los factores que se iban a variar fueron la composición del combustible y el modo de funcionamiento y los niveles fueron Dc (diesel corriente), B5, B10 y B20 y los cinco grados de carga. En la tabla 4 se muestra la ficha técnica del experimento. El modelo se hizo siguiendo la metodología sugerida por Montgomery [29].

Tabla 4
Ficha técnica del experimento

Modelo	Modelo estadístico de comparación simple con dos factores a dos niveles
Variable de referencia	Consumo de combustible [g/s]
Factor 1	Tipo de combustible
Factor 2	Modo de funcionamiento
Varianza	$1,515 \times 10^{-5} \text{ g}^2/\text{s}^2$
Error de experimentación	0,0065 g/s
Intervalo de confianza	95%
Potencia de la prueba	96%
Grados de libertad	3
Número de réplicas	3

El tratamiento estadístico de los resultados experimentales mostró que el intervalo de confianza del 95% se traslapaba para los diferentes combustibles en cada modo de funcionamiento, tanto en el análisis de parámetros mecánicos como ambientales, con excepción en algunos casos de las mezclas B20; debido probablemente a errores experimentales o a que las diferencias de las mediciones

estaban dentro del rango de precisión de los equipos de medida, por lo que los autores optaron por representar los valores promedio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables de funcionamiento mecánico se presentan en función del grado de carga (pme). A cada modo de funcionamiento del diseño experimental le corresponde una pme . Se han representado sólo los valores medios de las 3 réplicas para cada tipo de combustible.

Las emisiones contaminantes se presentan en emisiones específicas (masa de contaminante/ unidad de energía desarrollada en el cigüeñal) y como índices de emisión (masa de contaminante/ unidad de masa de combustible quemado), cada valor representado en la gráfica para cada grado de carga y cada combustible corresponde a la media de 3 valores provenientes de cada una de las réplicas.

5.1. Prestaciones

En la figura 2 se muestran los modos de funcionamiento ubicados sobre el mapa del motor. Cada punto corresponde a un grado de carga o pme determinado.

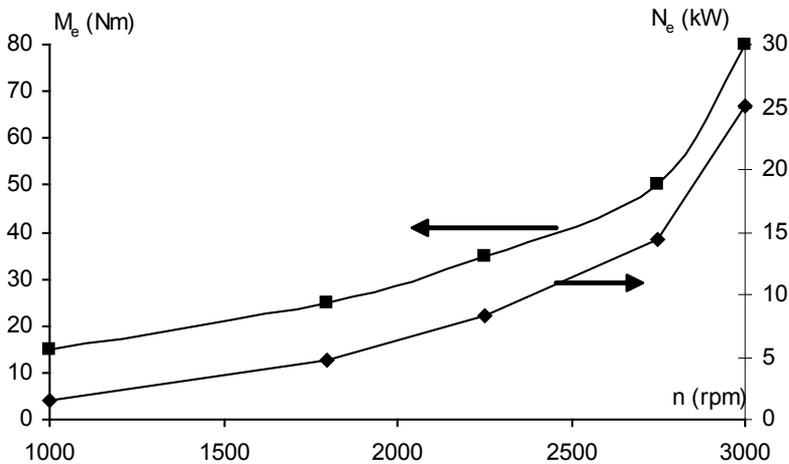


Figura 2. Puntos de ensayo sobre la curva de par y potencia del motor

El consumo específico de combustible tiende a disminuir a medida que incrementa el grado de carga del motor (figura 3). El efecto del biodiesel sobre el consumo de combustible es directamente proporcional a su menor

poder calorífico. El consumo específico de combustible incrementó en torno a 0.5, 1 y 1.7% para las mezclas B5, B10 y B20 respectivamente, por esta razón no se observan diferencias entre los combustibles para cada punto de funcionamiento.

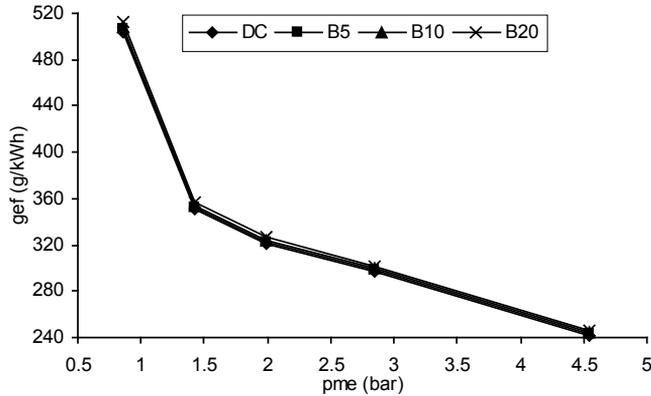


Figura 3. Consumo específico de combustible –gef– en función del grado de carga

En la figura 4 se muestra el rendimiento efectivo en función del grado de carga para cada combustible. El biodiesel, no obstante tener menor poder calorífico y necesitar, por tanto, consumir más combustible para generar la misma potencia que el diesel, no afecta el rendimiento efectivo del motor; por el contrario, los resultados muestran un ligero incremento del rendimiento del motor al usar B20, que podría justificarse con el aporte extra de oxígeno molecular.

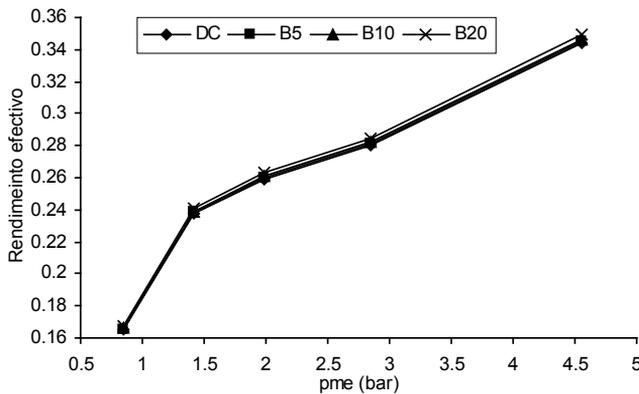


Figura 4. Rendimiento efectivo

En la figura 5 se muestra la relación combustible/aire de funcionamiento, la cual incrementa con el grado de carga del motor. En cada modo de funcionamiento se aprecia una tendencia a incrementar el dosado de funcionamiento a medida que aumenta la concentración de biodiesel en la mezcla. Sin embargo, en la figura 6 se observa que el dosado relativo o relación combustible/aire respecto de la estequiométrica tiende a permanecer aproximadamente constante, esto se debe a que el dosado estequiométrico del biodiesel es mayor.

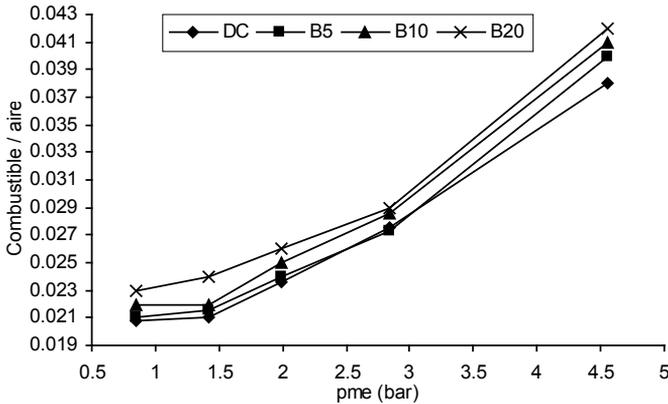


Figura 5. Relación combustible/aire de funcionamiento

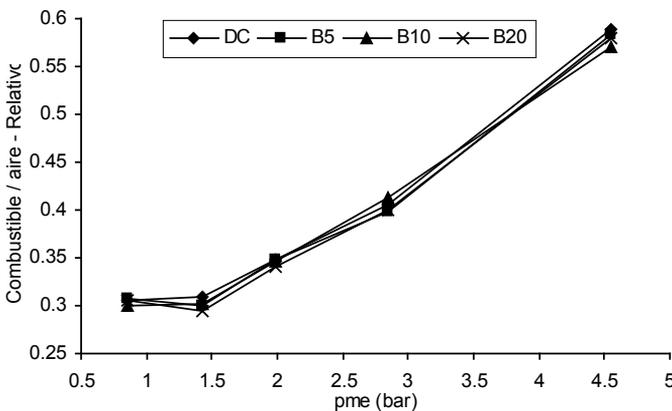


Figura 6. Dosado relativo

5.2. Emisiones gaseosas y opacidad del humo

5.2.1. Emisiones de CO_2

El índice de emisión másico cuantifica la masa de CO_2 emitida al quemar una unidad de masa de combustible, se ha expresado en $kgCO_2/kg_{comb}$ y se estimó directamente de la fórmula química del combustible a partir del número de moles de CO_2 (Apéndice A). La validez de este método radica en que el rendimiento de la combustión de los motores diesel es cercano a la unidad y las emisiones de CO y HC son muy pequeñas frente a las de CO_2 . Este índice se reduce en 0.6, 1.4 y 2.7% con B5, B10 y B20 respectivamente. Mientras que el diesel convencional emite $3.13 kgCO_2/kg_{comb}$, las mezclas B5, B10 y B20 emiten 3.1, 3.01 y $3.06 kgCO_2/kg_{comb}$ respectivamente (figura 7, eje de la izquierda).

El índice de emisión energético cuantifica la masa de CO_2 emitida por cada unidad de energía química del combustible, por lo que es más representativo de cara al motor, se ha expresado en gCO_2/MJ_{comb} . Éste incrementa entre 0.01 y 0.1% con biodiesel. Lo anterior se debe a su menor poder calorífico. Mientras que el diesel emite $72.7 gCO_2/MJ$, las mezclas B5, B10 y B20 emiten 72.83, 72.95 y $73.21 gCO_2/MJ$ respectivamente (figura 7, eje de la derecha).

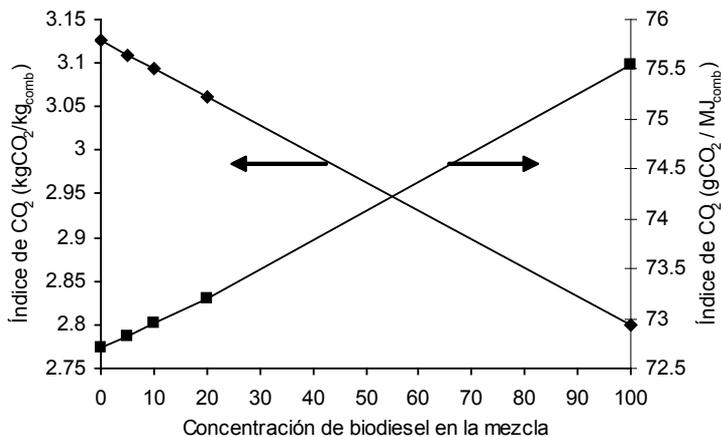


Figura 7. Efecto de la mezcla de biodiesel sobre los índices de emisión másico y energético de CO_2

Las emisiones específicas cuantifican la masa de CO_2 emitida por unidad de energía en el eje del motor, se han expresado en $gCO_2/kWh_{cigüenal}$ y disminuyen con el incremento del grado de carga debido a que crece más rápido la potencia

del motor que la masa de contaminante emitida. En la figura 8 se muestra un aumento de las emisiones específicas de CO_2 al usar biodiesel inferior al 1%, independientemente del grado de carga. No obstante hay que tener presente que al quemar el diesel, el 100% del CO_2 liberado va a incrementar el ya existente en el aire atmosférico, mientras que al quemar biodiesel, el CO_2 liberado es en parte reabsorbido por la planta de donde proviene.

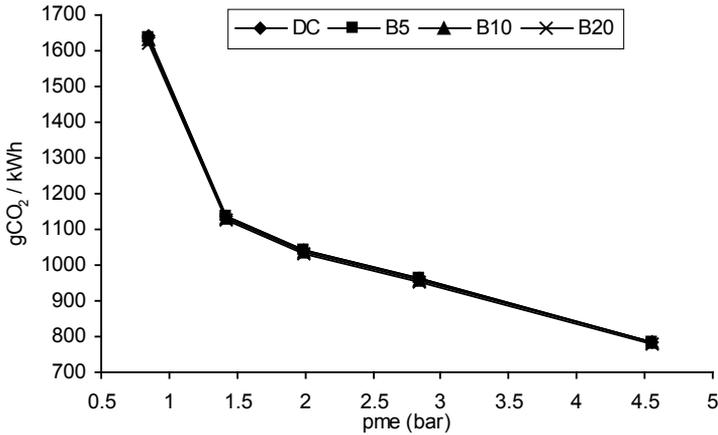


Figura 8. Emisiones específicas de CO_2 en función del grado de carga

5.2.2 Emisiones de co

En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes combustibles en función del grado de carga. Tanto las emisiones específicas como el índice de emisión de CO tienden a disminuir con el uso de biodiesel. Las emisiones específicas de CO disminuyen entre 3 y 14% al usar B5 y B20 respectivamente en el modo de funcionamiento 1 (pme = 0.85 bar); esta diferencia se atenúa a medida que incrementa el grado de carga del motor debido a que mejoran las condiciones de operación.

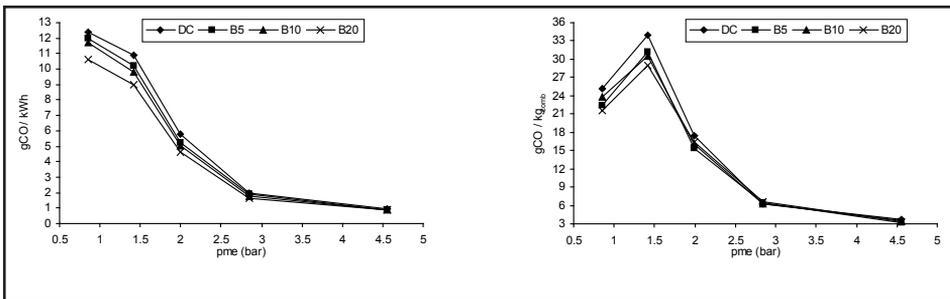


Figura 9. Índice de emisión (Der.) y emisiones específicas (Izq.) de CO en función del grado de carga

5.2.3 Emisiones de THC

Aunque es de esperarse una reducción en las emisiones de HC, debido al oxígeno molecular y al menor punto final de ebullición del biodiesel, se debe tener cuidado en la interpretación de las mediciones con los equipos comúnmente empleados para su determinación. En este trabajo se utilizó un sensor de celda electroquímica, que no es el más idóneo para hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (THC). El equipo más aceptado para su determinación es el denominado FID o detector de ionización de llama, que cuenta con una línea calorifugada que se calienta a 190°C con el fin de evitar que los hidrocarburos presentes en los gases de escape se condensen y sean absorbidos en el material particulado. Sin embargo, los metilésteres suelen tener puntos de ebullición muy elevados, por lo que pueden condensarse en la línea antes de alcanzar el detector. Otro factor que puede afectar su medición es el contenido de oxígeno molecular del biodiesel; es sabido que este parámetro afecta la sensibilidad de estos equipos de medición [8].

En la figura 10 se muestran los resultados de las emisiones específicas de THC medidas en base a propano, es decir, asumiendo que todos los hidrocarburos detectados por la celda electroquímica son propano. Al igual que con el CO₂ y con el CO, las emisiones específicas tienden a disminuir por la misma razón expuesta en dichos casos.

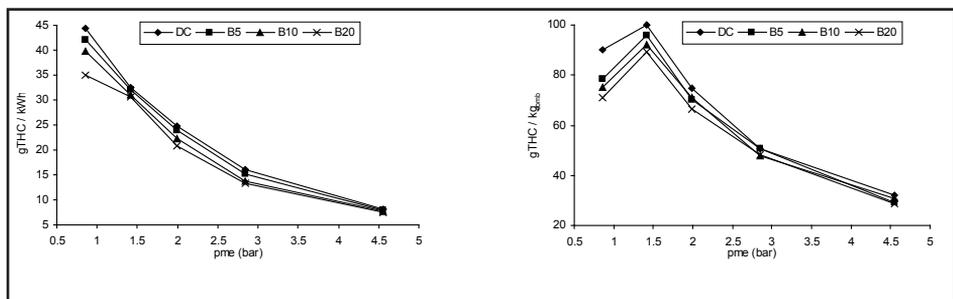


Figura 10. Índice de emisión (Der.) y emisiones específicas (Izq.) de THC en función del grado de carga

5.2.4 Emisiones de NOx

Existe consenso en la literatura técnica en que se produce un incremento en las emisiones de NOx al usar biodiesel, y que además este incremento depende del tipo de biodiesel, obteniéndose menores emisiones entre más compuestos saturados tenga. Sus argumentos para explicar esta tendencia se

basan en que el biodiesel, por su mayor avance de la inyección y más rápido inicio de la combustión, produce una temperatura pico más elevada durante la fase de combustión por difusión. Otro argumento se basa en que hay mayor disponibilidad de oxígeno en la cámara de combustión para combinarse con el nitrógeno del aire y formar los NOx. Este par de efectos parece sobreponerse al mayor número de cetano del biodiesel. Quienes han obtenido reducciones en las emisiones de NOx argumentan que el contenido de oxígeno extra del biodiesel permite que el motor trabaje con dosados globales más pobres, lo cual genera menores temperaturas en la cámara de combustión. Adicionalmente, la combustión se produce en aquellas zonas con dosado cercano al estequiométrico, y éste es inferior en el biodiesel.

En este trabajo se obtuvieron ligeros incrementos en las emisiones específicas de NOx al usar biodiesel. Las mayores diferencias (en torno a un 3% para B20) se produjeron a elevados grados de carga, en los que las condiciones de temperatura en el motor son mayores (figura 11).

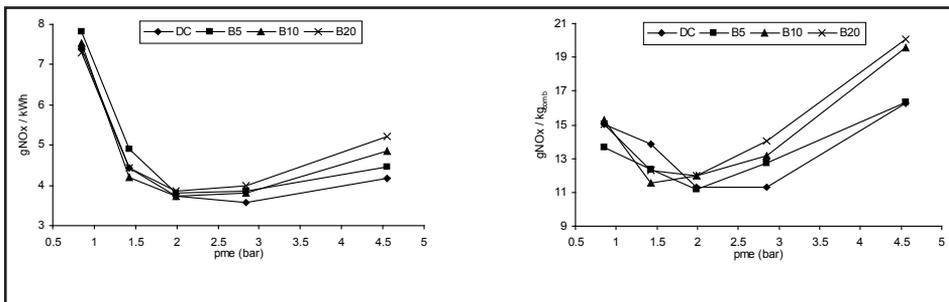


Figura 11. Índice de emisión (Der.) y emisiones específicas (Izq.) de NOx en función del grado de carga

5.2.5 Opacidad del humo

La opacidad del humo es una medida indirecta del contenido de hollín que tienen las partículas diesel. El hollín tiende a oxidarse con la presencia del oxígeno en el cilindro, por lo que es de esperarse una disminución del porcentaje de la opacidad del humo en la medida que incrementa el porcentaje de biodiesel en la mezcla. En la figura 12 se muestran los resultados de la opacidad del humo para los distintos combustibles en los cinco modos de funcionamiento del motor.

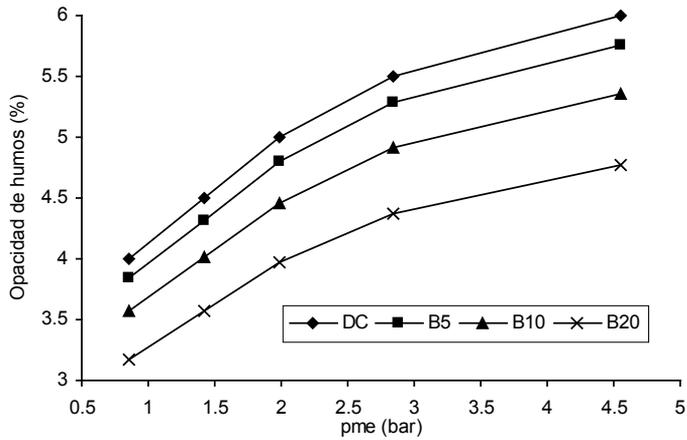


Figura 12. Opacidad del humo en función del grado de carga

A manera de resumen, en la figura 13 se presentan de las variaciones porcentuales de las emisiones gaseosas de CO, THC y NOx y de la opacidad del humo, en función de la concentración de biodiesel de aceite de palma, para el modo de funcionamiento 1. En términos generales, disminuyeron el CO, los THC y la opacidad del humo, y se produjo un ligero incremento en los NOx. Resultados similares se obtuvieron para los otros modos de funcionamiento.

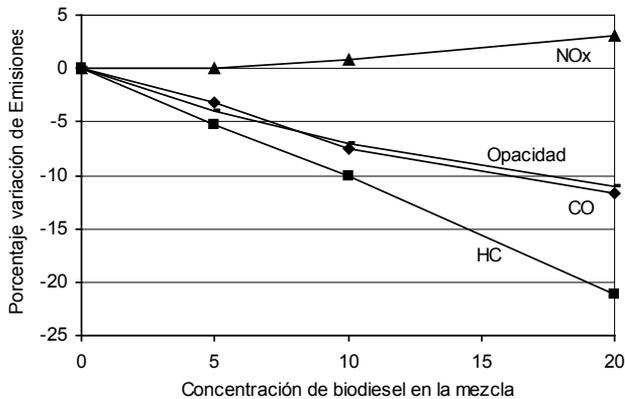


Figura 13. Resumen del efecto de la concentración de biodiesel sobre las emisiones gaseosas y la opacidad del humo a igualdad de potencia en el eje (pme = 0.85 bar)

La importancia que tiene el cálculo de los índices de emisión en masa de contaminante por unidad de masa de combustible quemado (parte derecha de las figuras 9-11), radica en que permite obtener los toneladas de contaminante por unidad de tiempo y por región, en tanto se conozca la tasa de consumo de combustible de dicha región o país. A manera de ejemplo, Colombia consume cerca de 65.000 BPD (barriles/día) de diesel; si se asumiera que todo ese combustible se destina al sector automotor y que los índices de emisión obtenidos en este estudio son representativos del valor medio de todos los motores diesel del país, se tendrían los siguientes valores acumulados en toneladas de contaminante por día:

$$65.000 \frac{B}{\text{día}} \cdot \frac{52 \text{ gal}}{B} \cdot \frac{3.785 \text{ l}}{\text{gal}} \cdot \frac{0.83 \text{ kg}}{\text{l}} \cdot \frac{1 \text{ t}}{1.000 \text{ kg}} = 10.618 \frac{\text{toneladas}}{\text{día}}$$

Con este dato y tomando los valores máximos en los índices de emisión másicos se obtienen los valores más críticos de emisiones representados en la tabla 5. En la figura 14 se muestran los índices másicos acumulados en toneladas de contaminante por día en forma gráfica calculados para el ejemplo hipotético mencionado antes. No se ha incluido el CO_2 , no obstante haberlo calculado en la tabla anterior, porque es más representativo para el caso de los motores hacer el cálculo de este contaminante en términos energéticos y no másicos.

Tabla 5
Emisiones acumuladas para el ejercicio hipotético

Emisión	Combustible				Observación
	Dc	B5	B10	B20	
Ensayo (gCO ₂ /kg _{comb})	3126	3110	3093	3060	Indep. del modo
Acumulada (tonCO ₂ /día)	33192	33022	32841	32684	
Ensayo(gCO/kg _{comb})	34.02	31.17	30.5	29	Modo 2
Acumulada (tonCO/día)	361	331	324	308	
Ensayo(gTHC/kg _{comb})	100	95.94	92	89.31	Modo 2
Acumulada (tonTHC/día)	1062	1018	977	948	
Ensayo(gNO _x /kg _{comb})	15.22	15.19	17.94	18.29	Modo 5
Acumulada (tonNO _x /día)	161	161	190	194	

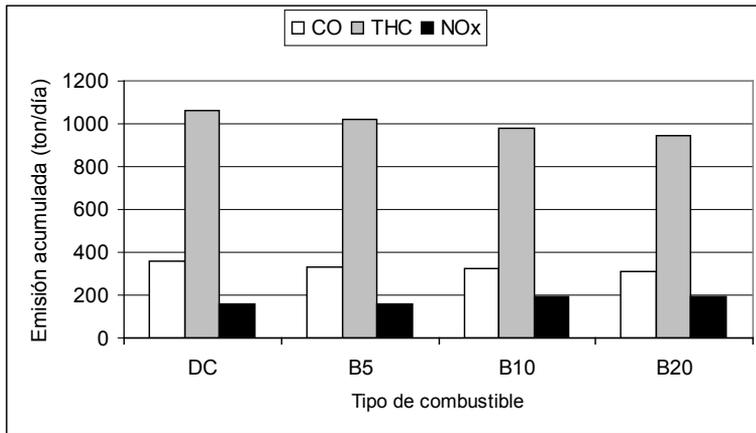


Figura 14. Comportamiento de las emisiones acumuladas para un ejemplo hipotético

CONCLUSIONES

El tratamiento estadístico de los datos experimentales mostró que el intervalo de confianza del 95% se traslapaba para los diferentes combustibles en cada modo de funcionamiento, tanto en el análisis de parámetros mecánicos como ambientales, con excepción en algunos casos de las mezclas B20; debido probablemente a inexactitudes en la experimentación o a que las diferencias de las mediciones estaban dentro del rango de precisión de los equipos de medida, por lo que para poder obtener las conclusiones siguientes los autores se han basado únicamente en los valores medios.

- A igualdad de energía (o potencia) en el eje, el consumo específico de combustible incrementa de forma lineal en relación a su menor poder calorífico, con la proporción de biodiesel de aceite de palma. Las diferencias más grandes se consiguen con B20 (1.7%) y las menores con B5 (0.5%) cuando el motor operaba con una $pme = 0.85$ bar.
- El rendimiento efectivo del motor no se vio afectado con el uso de biodiesel, por el contrario, se apreció un ligero incremento (1%) con el uso de B20, probablemente debido a la aportación de oxígeno molecular.
- El índice másico de CO_2 se redujo en 0.6, 1.4 y 2.7% al usar B5, B10 y B20 respectivamente. Mientras que el diesel convencional emite $3.13 \text{ kgCO}_2/\text{kg}_{\text{comb}}$, las mezclas B5, B10 y B20 emiten 3.1, 3.01 y $3.06 \text{ kgCO}_2/\text{kg}_{\text{comb}}$ respectivamente.

- A igualdad de potencia en el eje, el índice energético de emisión de CO_2 incrementa al usar biodiesel en proporción a su menor poder calorífico en la mezcla. Mientras que el diesel emite $72.7 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$, al usar B5, B10 y B20 se emiten 72.83 , 72.95 y $73.21 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$ respectivamente.
- Las emisiones específicas de CO disminuyen entre 3 y 14% al usar B5 y B20 respectivamente respecto al diesel corriente, a bajos grados de carga ($p_{\text{me}} = 0.85 \text{ bar}$); esta diferencia se hace menor a medida que incrementa el grado de carga del motor, debido a que mejoran las condiciones de operación.
- En este trabajo se obtuvieron ligeros incrementos en las emisiones específicas de NO_x al usar biodiesel. Las mayores diferencias (en torno a un 3% para B20) se produjeron a elevados grados de carga, en los que las condiciones de temperatura en el motor son mayores.
- las variaciones porcentuales de las emisiones gaseosas de CO , THC y de la opacidad del humo, en función de la concentración de biodiesel de aceite de palma en términos generales tiende a disminuir, mientras que los NO_x tendieron a incrementar ligeramente.
- Los resultados de este proyecto permiten concluir que el uso del biodiesel de aceite de palma mezclado en concentraciones inferiores al 20% con diesel convencional tiene ventajas ambientales significativas. Desde el punto de vista mecánico del motor, el consumo adicional de combustible apenas se ve ligeramente incrementado. Estos resultados son válidos para el motor de ensayos utilizado y para una altitud sobre el nivel del mar de 1500m (Medellín).
- Si bien los resultados en banco de ensayos y en ruta realizados hasta ahora han mostrado las ventajas ambientales del uso del biodiesel, independientemente del porcentaje de mezcla de sustitución del diesel corriente, estos resultados han sido en pruebas de corta duración. Se desconoce el efecto que pueda tener el uso del biodiesel de aceite de palma colombiano en pruebas de larga duración.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia por la financiación de este proyecto, realizado mediante el convenio interadministrativo especial de cooperación científica, tecnológica y financiera N° 8703-001-2004. A la empresa Interquim S.A. por facilitar el biodiesel de aceite de palma, y a la empresa Haceb S.A. por el analizador de gases de escape.

Así mismo, agradecemos las aportaciones del Dr. Magín Lapuerta Amigo de la Universidad de Castilla-La Mancha, especialmente en lo referente al cálculo de los índices de emisión y las emisiones específicas.

REFERENCIAS

- [1] *World-Wide Fuel Charter* (2002). World-Wide Fuel Harmonisation. http://www.oica.net/htdocs/fuel%20quality/WWFC_Dec2002_Brochure.pdf.
- [2] ENGINE MANUFACTURER ASSOCIATION –EMA– (2003). Technical statement on the use of biodiesel fuel in compression ignition engines. www.enginemanufacturers.org
- [3] DIESEL FUEL INJECTION EQUIPMENT MANUFACTURERS –FIEM– (2004). Fatty acid methyl ester fuels as a replacement or extender for diesel fuels.
- [4] SHAINÉ, T. National Renewable Energy Laboratory (2004). Biodiesel handling and use guidelines. <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/npbj/pdfs/tp36182.pdf>. US. Department of energy.
- [5] AGARWAL, A.K. & DAS, L.M. (2001). Biodiesel development and characterization for use as a fuel in compression ignition engines. *Transactions of the ASME. Journal of Engineering For Gas Turbine and Power*, 123, 440-447.
- [6] ARMAS, O., RODRÍGUEZ, J., CÁRDENAS M.D. & AGUDELO, A.F. (2004). Efecto del biodiesel procedente de aceites vegetales usados sobre las emisiones y prestaciones de un motor diesel. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 15 (3), 1739-1748 (in spanish).
- [7] CHANG, D.Y. & VAN GERPEN, J.H. (1997). Fuel properties and engine performance for biodiesel prepared from modified feedstocks. *SAE paper* 971684.
- [8] SCHMIDT, K. & VAN GERPEN, J. (1996). The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions. *SAE paper* 961086.
- [9] GRABOSKI, M.S. & MCCORMICK, R.L. (1998). Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, 125-164.
- [10] HANSEN, K.F. & JENSEN M.G. (1997). Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a ,DI diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (RME), *SAE paper* 971689.
- [11] LAPUERTA, M., ARMAS, O., BALLESTEROS, R. & FERNÁNDEZ, J. (2005). Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel* 84, 773-780.
- [12] MARSHALL, W., SCHUMACHER, L.G. & HOWELL, S. (1995). Engine exhaust emissions evaluation of a Cummins L10E when fuelled with a biodiesel blend. *SAE paper* 952363.
- [13] PAYRI, F., MACIÁN, V., ARREGLE, J. & TORMOS, B. (2004). Heavy-duty diesel engine performance and emission measurements for biodiesel (from cooking oil) blends used in the ECOBUS Projet. *SAE paper* 05-01-2005
- [14] LAPUERTA, M., RODRÍGUEZ, J. & AGUDELO, J.R., “Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel”. Sometido a *Bioresource Technology* en abril de 2005.
- [15] SCHOLL, K.W. & SONRENSEN, S.C. (1993). Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection Diesel engine. *SAE paper* 930934.
- [16] STAAT, F. & GATEAU, P. (1995). 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* 950053.

- [17] CHOI, C.Y., BOWER, G.R. & Reitz, R.D. (1997). Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on D.I. diesel engines. *SAE paper* 970218.
- [18] MONYEM, A. & VAN GERPEN, J.H. (2001). The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. *Biomass & Bioenergy*, 20, 317-325.
- [19] CHOO, Y.M., MA, A.N. & YUSOF, B. (1995, Nov.). Production and evaluation of palm oil methyl esters as diesel substitute. *Proc. Of 1995 PORIM International Biofuel Conference*, p. 15-25. *Elaeis Special Issue*. Malaysia.
- [20] SOULIGNY, M., GRAHAM, L. & RIDEOUT, G. (2004). Heavy-duty Diesel engine performance and comparative emission measurements for different biodiesel blends used in the Montreal BIOBUS Project. *SAE paper* 2004-01-1861.
- [21] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL: Estudio del desempeño ambiental de motores que funcionan con biodiesel. *Informe final*, convenio interadministrativo especial de cooperación científica, tecnológica y financiera N° 8703-001-2004.
- [22] AGUDELO, J.R., PEÑA, D. & MEJÍA, R. (2001, diciembre). "Pruebas de desempeño del éster metílico de aceite de palma en un motor diesel". En *Revista Energética*, N° 26, 107-115. Universidad Nacional de Colombia (Colombia).
- [23] AGUDELO, J. R. & BENJUMEA, P.N. (2004, octubre). *Biodiesel de aceite crudo de palma colombiano: Aspectos de su obtención y utilización*. Universidad de Antioquia. Medellín (Colombia).
- [24] AGUDELO, J.R., BENJUMEA, P.N. & PÉREZ, J. F. (2004). "Pruebas cortas en ruta en un vehículo tipo microbús con biodiesel de aceite de palma colombiano". En *Revista Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, N° 24, 162-168.
- [25] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). Norma técnica colombiana NTC 1438. Petróleo y sus derivados. Combustibles para motores diesel.
- [26] VILLALTA, J. (2004). Implementación de un modelo termodinámico de diagnóstico de una zona para motores diesel ID y propuesta de aplicación a dos zonas. Universidad de Castilla-La Mancha.
- [27] RAMÍREZ, F., P. (2004). *Caracterización de biocombustibles para motores diesel*. Proyecto fin de carrera N° 04-10-200605. Universidad de Castilla La-Mancha, Ciudad Real.
- [28] LAPUERTA, M., ARMAS, O., HERNÁNDEZ, J.J. & BALLESTEROS, R. (2000). Fuel formulation effects on passenger car diesel engine particulate emissions and Composition, *SAE paper* N° 2000-01-1850.
- [29] MONTGOMERY, D. (2003). *Diseño y análisis de experimentos*, 2ª ed., México, Limusa Wiley.
- [30] HEYWOOD, J.B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*, Nueva York, McGraw-Hill.

APÉNDICE A

En este apéndice se presentan el método empleado para el cálculo de las emisiones específicas y los índices de emisión, según Heywood [30]. Para el CO_2 se ha seguido el procedimiento presentado en [21].

A.1. Emisiones de CO_2

Combustible	Reacción de combustión estequiométrica
	$C_n H_m O_p + \left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} \right) O_2 \rightarrow n CO_2 + \frac{m}{2} H_2O$
Diesel	$C_{14.7} H_{28.8} + 21.9 O_2 \rightarrow 14.7 CO_2 + 14.4 H_2O$
Biodiesel	$C_{18.1203} H_{34.9963} O_2 + 25.869 O_2 \rightarrow 18.1203 CO_2 + 17.49 H_2O$

Procedimiento de cálculo de los índices de emisión másico y energético:

$$I_{CO_2} \left(\frac{kg CO_2}{kg_{comb}} \right) = \frac{m_{CO_2}}{m_{comb}} = \frac{n \cdot PM_{CO_2}}{PM_{com}}$$

$$IE_{CO_2} \left(\frac{g CO_2}{MJ} \right) = \frac{m_{CO_2}}{m_{comb} \cdot PCI} = \frac{I_{CO_2}}{PCI}$$

A.2. Emisiones específicas

$$sCO_2 = I_{CO_2} \cdot gef$$

$$sCO = \frac{m_{CO}}{N_e} = \frac{Y_{CO} \cdot m_{gases}}{N_e} = \frac{X_{CO} \cdot \frac{PM_{CO}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{N_e}$$

$$sTHC = \frac{m_{C_3H_8}}{N_e} = \frac{Y_{C_3H_8} \cdot m_{gases}}{N_e} = \frac{C_{C_3H_8} \cdot \frac{PM_{C_3H_8}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{N_e}$$

$$sNO_x = sNO + sNO_2$$

$$sNO_2 = \frac{m_{NO_2}}{N_e} = \frac{Y_{NO_2} \cdot m_{gases}}{N_e} = \frac{X_{NO_2} \cdot \frac{PM_{NO_2}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{N_e}$$

$$sNO = \frac{m_{NO}}{N_e} = \frac{Y_{NO} \cdot m_{gases}}{N_e} = \frac{X_{NO} \cdot \frac{PM_{NO}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{N_e}$$

A.3. Índices de emisión de contaminante

$$I_{CO} = \frac{m_{CO}}{m_f} = \frac{X_{CO} \cdot \frac{PM_{CO}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{N_f}$$

$$I_{THC} = \frac{m_{C_3H_8}}{m_f} = \frac{Y_{C_3H_8} \cdot m_{gases}}{m_f} \cdot \frac{X_{C_3H_8} \cdot \frac{PM_{C_3H_8}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{m_f}$$

$$I_{NO_x} = \frac{m_{NO_x}}{m_f} = \frac{Y_{NO_x} \cdot m_{gases}}{m_f} \cdot \frac{X_{NO_x} \cdot \frac{PM_{NO_x}}{PM_{gases}} \cdot (m_a + m_f)}{m_f}$$

Las fracciones molares de cada contaminante se obtuvieron de las mediciones del analizador de gases de escape multiplicando por 10^{-6} si se trataba de ppmv o por 10^{-2} si se trataba de porcentaje.