

ESTUDIO ENERGÉTICO Y DE EMISIONES EN MOTORES OPERANDO CON MEZCLA ETANOL-GASOLINA (E20) A DIFERENTES ALTITUDES

John Agudelo Santamaria¹, Jorge Córdoba Morales^{1*}, Juan Pérez Bayer¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia) Cl 67 # 53-108.

*Tel (57-4)219-8549, Fax (57-4)219-5550, jcordoba@udea.edu.co

RESUMEN

A causa del crecimiento del parque automotor colombiano y con ello los problemas de movilidad y contaminación por emisiones vehiculares, el gobierno colombiano ha venido impulsado la oxigenación de las gasolinas con bioetanol producido en el país. Este trabajo presenta un estudio de caracterización energética y emisiones de dos motores Renault (1.6L, 8V y 1.2L, 16V) montados en banco dinamométrico. El trabajo experimental investiga el efecto de tres factores: El grado de carga (cargas parciales y plena carga), altura sobre el nivel del mar (1500 y 2500 msnm) y el combustible, donde se compara gasolina con la mezcla gasolina-bioetanol (E20). No se realizaron modificaciones sobre el motor para los ensayos (programación de la ECU o componentes mecánicos).

Los resultados muestran que desde la perspectiva mecánica, con el uso de E20 aumenta el consumo específico de combustible con respecto a la gasolina y disminuye con respecto a la altitud, sin afectar la eficiencia del motor, además con una ligera mejora en la potencia a plena carga. En materia de emisiones contaminantes se aprecia una reducción general en los hidrocarburos totales (THC) y el monóxido de carbono (CO) a condiciones típicas de operación. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) no se afectan de manera significativa y el balance global de CO₂ indica un incremento en la emisión másica de este gas de efecto invernadero.

1.- Introducción

Colombia tiene en marcha un proceso de oxigenación de las gasolinas nacionales por medio de la mezcla de la gasolina con etanol anhidro producido localmente, con lo cual se pretende reducir las emisiones contaminantes, diversificar la canasta energética nacional en

el uso de combustibles automotores, permitiendo además que ante un parque automotor creciente se alivie un poco la dependencia del petróleo y se promueva el desarrollo de los sectores asociados a esta parte de la industria nacional.

Ante la masificación del uso de etanol cada vez en mayor proporción respecto a la gasolina, es importante estudiar el efecto del etanol sobre las prestaciones mecánicas y emisiones contaminantes del motor, trabajando con vehículos típicos del parque automotor colombiano y considerando además las condiciones variables del piso térmico colombiano donde los vehículos operan a diferentes altitudes sobre el nivel de mar.

El uso de etanol en motores no es en realidad algo novedoso, Estados Unidos lo utilizó en la segunda guerra mundial y para 1979 se comenzó a utilizar mezcla gasolina etanol [1]. En Europa se promulgó la directiva 2003/30CE que llevó a cuadruplicar la producción de etanol [2]. En cuanto al desempeño del etanol se debe considerar que este tiene una relación aire combustible (AC) diferente y por tanto en vehículos que no tienen control de mezcla en lazo cerrado (sistemas electrónicos con sensor de oxígeno) se reporta que afecta la dosificación de la mezcla [3-9]. A nivel de emisiones en general, se reporta una disminución en las emisiones de CO, HC y NO_x al mezclar la Gasolina con etanol, principalmente para contenidos de etanol mayores al 15% ([10-12]), mientras que para las emisiones de CO₂ se ven poco afectadas, reportándose un ligero incremento con el uso de etanol [10]. Junto con esto se reporta que Al aumentar la concentración de etanol en la mezcla se ha observado un incremento en el consumo específico de combustible, más evidente para concentraciones superiores al 10%, que se explica por su menor poder calorífico inferior [3, 5, 7, 9, 13, 14].

Este trabajo se realizó para aportar claridad sobre el efecto del uso de mezcla etanol-gasolina en proporción de 20% v/v (etanol) con 80% v/v (gasolina), denominada E20, comparados con gasolina como combustible de referencia. Se utilizaron dos motores de encendido provocado Renault (1.6L, y 1.2L) probados bajo condición estacionaria en un banco de ensayos automatizado. Los efectos estudiados fueron: variables de desempeño mecánico y energético así como las emisiones contaminantes, todo esto se estudió a dos alturas sobre el nivel del mar.

2.- Metodología y trabajo experimental

El propósito del trabajo ha sido comparar el efecto de la mezcla E20 respecto a la gasolina, algunas propiedades de los combustibles se presentan en la Tabla 1. Con cada combustible se realizaron mediciones en 20 modos de operación obtenidos de la combinación de 4 niveles de carga y 5 regímenes de giro del motor. Adicionalmente se realizaron replicas para comprobar la reproducibilidad de cada modo de operación. Esta información se detalla en la Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades de los combustibles.

Combustible	Fórmula	Densidad [kg/m ³]	Dosado estequiométrico	Poder calorífico inferior [kJ/kg]
E0	C ₇ H ₁₇	730	0.0652	44510
E20	C _{5.144} H _{12.9168} O _{0.3712}	741	0.0661	40972

Tabla 2. Diseño experimental de las pruebas preliminares

Combustible	% bioetanol	Identificación	Alturas sobre el nivel del mar (msnm)	Pruebas realizadas
Gasolina	0%	E0	2 (1500 y 2500)	3
E20	20%	E20	2 (1500 y 2500)	2

Modos de operación del motor

Regímenes de giro (rpm)	2000, 2900, 3500, 4000, 5500
Grados de carga	25, 50, 75 Nm (cargas parciales) y 100% (carga máxima)

Los principales regímenes de giro elegidos estuvieron entre 2000 y 4000 rpm, que son valores típicos de operación, evitando cargar el motor a bajas revoluciones, lo cual produce funcionamiento inestable, también se midió a 5500 rpm que aunque no es una condición típica de operación del motor, es a la que entrega su máxima potencia según especificaciones del fabricante (Tabla 3). Los grados de carga elegidos fueron determinados

por el par del motor, de manera que se exigió al motor realizar el mismo trabajo, con excepción de las pruebas a plena carga, realizadas con mariposa de aceleración completamente abierta para obtener las máximas prestaciones del motor.

Tabla 3. Características de los motores

Referencia	Renault Logan 1.6L	Renault Twingo 1.2L
Tipo	MPFI	MPFI
Cilindrada	1600 cm ³	1149 cm ³
Configuración	4 cilindros en línea	4 cilindros en línea
Numero de Válvulas	8	16
Relación de compresión	9.7 : 1	9.8 : 1
Potencia nominal	67 kW (90 hp) @ 5500 rpm	56 kW (75 hp) @ 5550 rpm
Par máximo	127 Nm a 2300 rpm	108 Nm a 4300 rpm
Sensor de Knock	Si	Si

Las mediciones se hicieron con el motor, montado en un banco de ensayos automatizado ubicado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Universidad de Antioquia. En la Figura 1 se muestra un esquema de la instalación experimental.

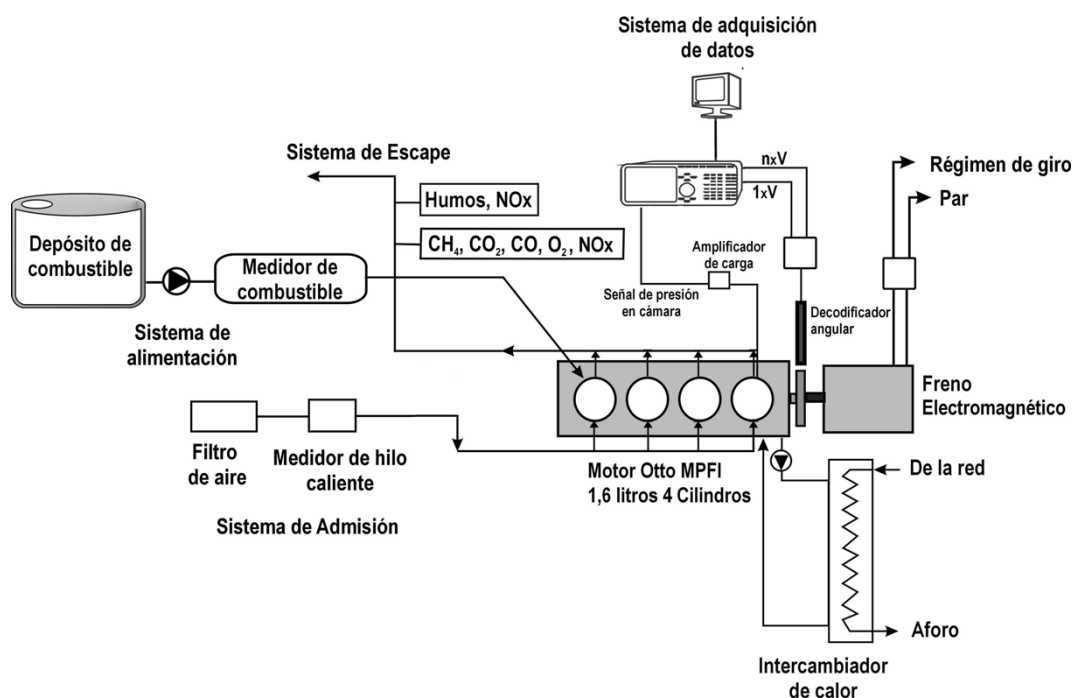


Figura 1. Esquema de la instalación experimental

El banco de ensayos está equipado con termopares y sensores para la medida de temperaturas y presiones medias, equipos para medición de flujo de aire, combustible, analizadores de gases y otros, de tal modo que se pudo monitorear con precisión el modo de funcionamiento del motor. Esta información se presenta en la Tabla 4. Adicionalmente se utilizó un sistema de adquisición de datos de alta velocidad (Modelo PCI-MIO-16E-4 board), el cual se programó usando un paquete informático en Labview.

Tabla 4. Características de la instrumentación principal.

Instrumento	Marca	Referencia	Lectura
Freno Dinamométrico	Schenck	E90	[N.m]
Medidor de combustibles	Danfoss	MASSFLO 6000	[0 – 800 g/min]
Medidor de aire	Magnetrol	TA2	[0 – 200 Nm/s]
Analizador de Gases	AVL	DIGAS 4000	RPM [0 - 8000 rpm]
			CO [0 – 10% vol]
			CO ₂ [0 – 20% vol]
			HC [0 – 20000 ppm vol]
			O ₂ [0 – 22% vol]
Medidor de NOx	Horiba	EXA 240CL	NO [0 – 9000 ppm vol]
			NOx [0 - 2500 ppm]
Medidor de NOx	Horiba	EXA 240CL	O ₂ [0 – 25% vol]
Medidor de THC	Mess-M & A	Thermo FID	THC [0 a 500 ppm Hex]

Modelo de cálculo de los parámetros de evaluación del desempeño del motor

Las siguientes expresiones fueron utilizadas para obtener los parámetros efectivos de motor y los índices de emisiones contaminantes presentados en la sección de resultados:

$$\text{Consumo específico de combustible:} \quad g_{ef} = \frac{m_f}{Ne} \quad (1)$$

Donde m_f es el flujo másico de combustible, y Ne es la potencia al freno calculada a partir del Par motor y el régimen de giro. [15].

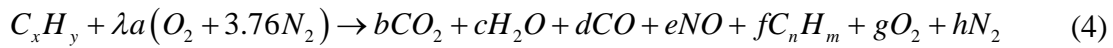
$$\text{Eficiencia Efectiva:} \quad \eta = \frac{Ne}{m_f \cdot PCi} = \frac{1}{g_{ef} \cdot PCi} \quad (2)$$

Donde PCi es el poder calorífico inferior del combustible. [15].

Las propiedades de los productos de combustión se obtienen a partir de la composición de la composición de la mezcla de gases en la corriente de escape. La fracción molar Y_j en base seca es conocido para $j = \text{CO}_2$, CO , THC , NO_x , y O_2 . Estas medidas se obtienen directamente de los respectivos analizadores de gases. La composición completa en base seca se balancea con Nitrógeno que es el principal componente del aire atmosférico.

$$Y_{N_2} = 1 - \left(\sum Y_j \right)_{\text{analizadores}} \quad (3)$$

La composición completa en base húmeda se obtiene a partir del balance de la reacción de combustión para el combustible en cuestión.



Se calcularon los índices de emisión o emisiones específicas, los cuales aportan mayor información que la simple lectura de la concentración molar de las especies en los productos de combustión porque revelan la cantidad másica de cada especie (en particular los contaminantes) que es emitida por cada unidad de combustible consumido, o por unidad de potencia que el motor entrega en el eje de salida.

Por unidad de masa de combustible:

$$I_{m,j} = Y_j \frac{PM_j}{PM_g} \frac{m_g}{m_f} \quad (5)$$

Por unidad de potencia entregada:

$$I_{w,j} = Y_j \frac{PM_j}{PM_g} \frac{m_g}{N_e} \quad (6)$$

Donde el subíndice j representa los gases de escape: CO , THC , NO_x .

Y_j es la fracción molar del gas j en la mezcla de gases de salida del motor, PM_j el peso molecular del gas j , m_g , el flujo másico de gases en el motor, PM_g el peso molecular de la corriente de gases de escape. [16].

3.- Resultados y discusión

3.1 – Motor Logan 1.6

Par Motor

La Figura 2, presenta el par al freno para todos los modos de operación, se aprecia para las cargas parciales que se obtiene la misma condición de carga, comprobando que las pruebas se hicieron a igualdad de entrega energética en el eje de salida del motor. En este caso, la posición de la mariposa de aceleración se ajustaba según fuera necesario para obtener el par y régimen deseados, mientras que a plena carga estaba completamente abierta.

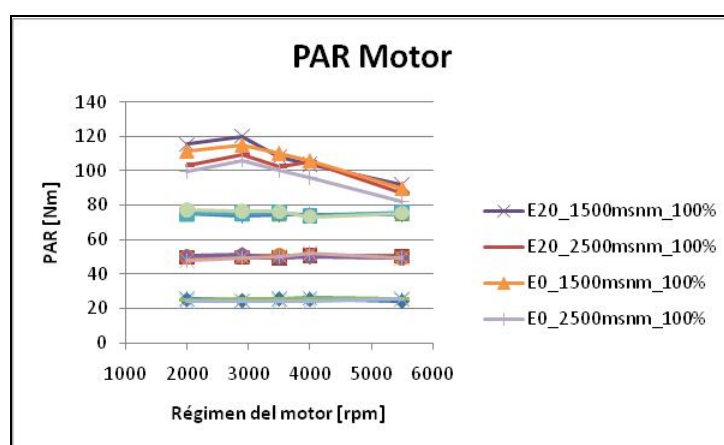


Figura 2. Par al freno para todos los modos de operación. Motor Logan

Se aprecia que el torque (y en consecuencia también la potencia) ha sido un poco mayor con la mezcla E20 para las dos altitudes, comportamiento claro en el rango de bajas y medias rpm, hasta el régimen de par máximo aproximadamente. Para regímenes mayores, el par no puede sostenerse por encima del obtenido con E0, es importante recalcar que no se hizo ningún ajuste en la electrónica del motor, es decir, al usar la mezcla E20, la ECU del motor operaba con los mismos parámetros que para E0. Al tener el bioetanol menor poder calorífico, es necesario inyectar más para alcanzar la misma potencia, altos valores de carga y régimen demandan las mayores cantidades de flujo de combustible y se requieran ajustar los parámetros de inyección para poder proveer el flujo adicional. Lo interesante está en el hecho de que trabajando a mayor altitud, el motor con E20 ha sido más potente que en gasolina en todo el rango de operación, de hecho se ve aún menos perjudicado a altos regímenes donde la demanda de aire es alta pero la disponibilidad

menor, se considera que es debido al contenido de oxígeno molecular del combustible. Las mayor potencia alcanzada con E20 puede también deberse al incremento del octanaje del combustible al incluir etanol, lo cual permitiría al motor usar mayores avances de encendido, centrando la combustión para obtener mayor par al freno.

Consumo específico de combustible

El consumo específico de combustible indica la cantidad de combustible que el motor requiere para su entrega de potencia. Considerando nuevamente que el E20 tiene menor poder calorífico, el motor debe consumir un poco más de combustible para poder entregar el mismo par al freno que su contraparte de E0, en efecto esto es lo que ocurre en todos los casos. Al considerar el cambio en la altitud desde 1500 msnm a 2500 msnm se aprecia que mientras el consumo con E0 cae bastante, debido a que no se dispone de suficiente aire, el consumo con E20 se mantiene más mucho más cercano a los valores de consumo a 1500 msnm ayudado por el contenido de oxígeno del combustible (ver Figura 3).

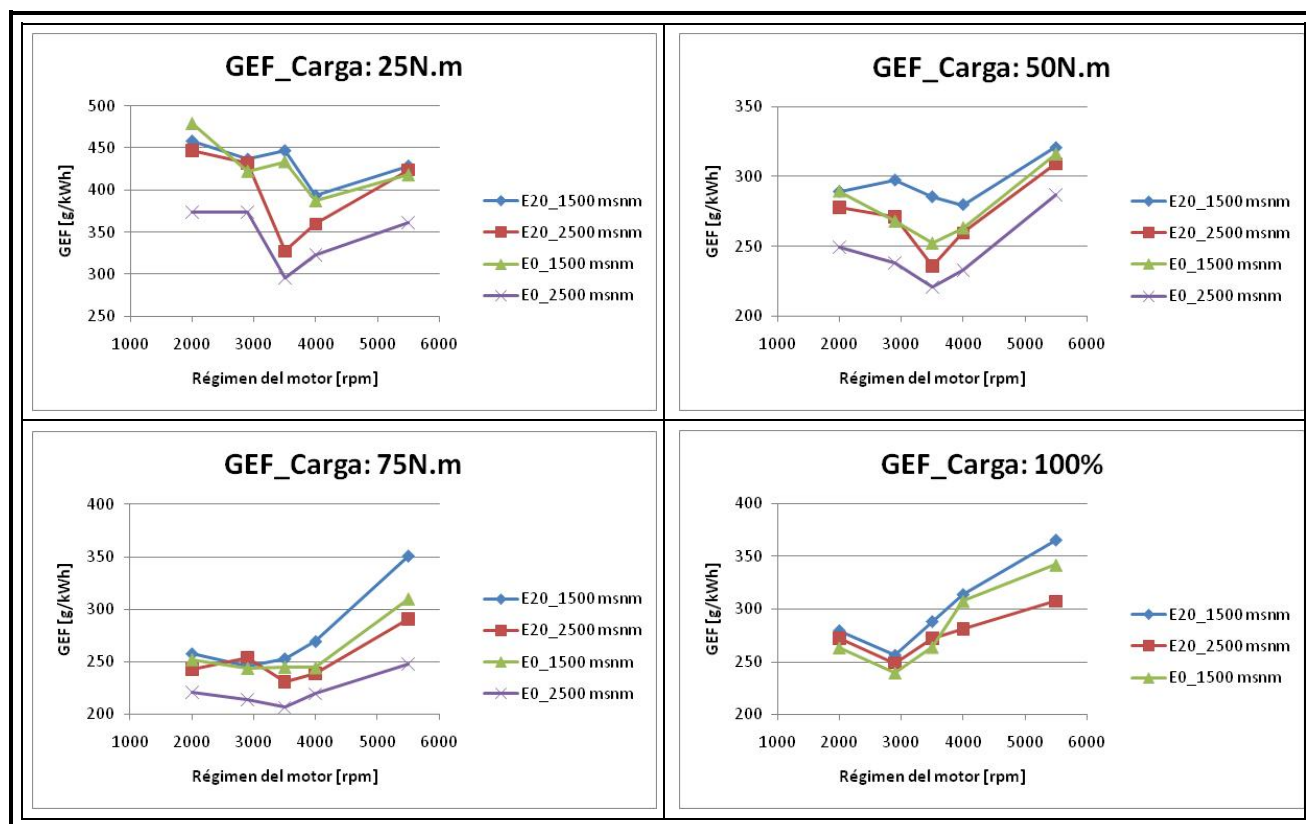


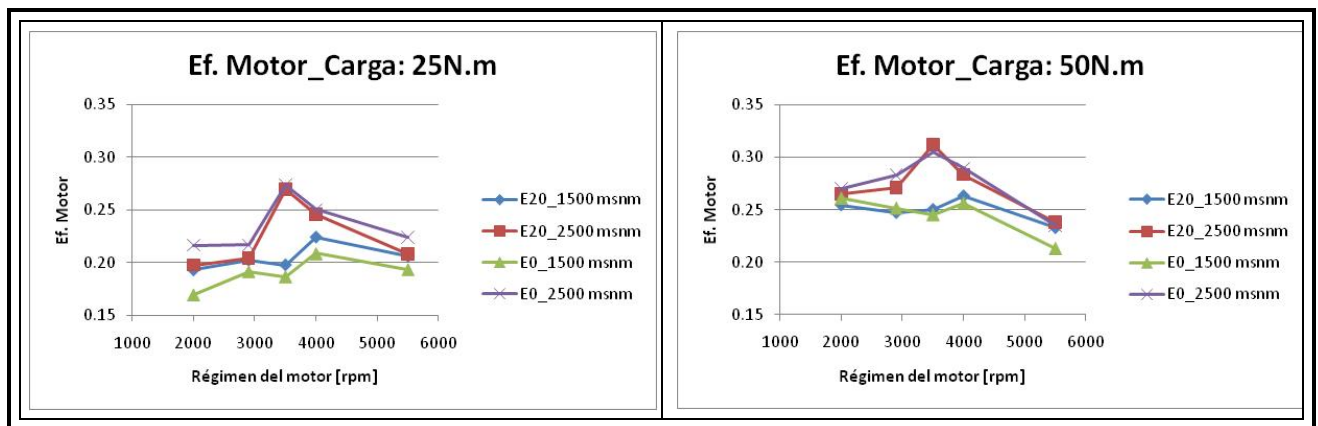
Figura 3. η_{ef} a diferentes grados de carga. Motor Logan

Se remarca el hecho entonces de que la altitud con la consecuente deficiencia de aire que perjudica el desempeño mecánico de los motores afecta en menor medida al motor cuando incluye un contenido de combustible oxigenado, el resultado ha sido similar para todas las condiciones de carga parcial. Sin embargo, a plena carga y altos regímenes la inyección de combustible está determinada por la cartografía del motor que ignora el hecho de que se está trabajando con E20 y el consumo de combustible aumenta a una tasa menor que la encontrada para E0.

Eficiencia efectiva

Los resultados de la eficiencia del motor para convertir el contenido energético de combustible no solo ratifican lo observado en prestaciones y consumo, sino que revela además que hay una mejora en este aprovechamiento energético del motor al usar el contenido de E20 (ver

Figura 4).



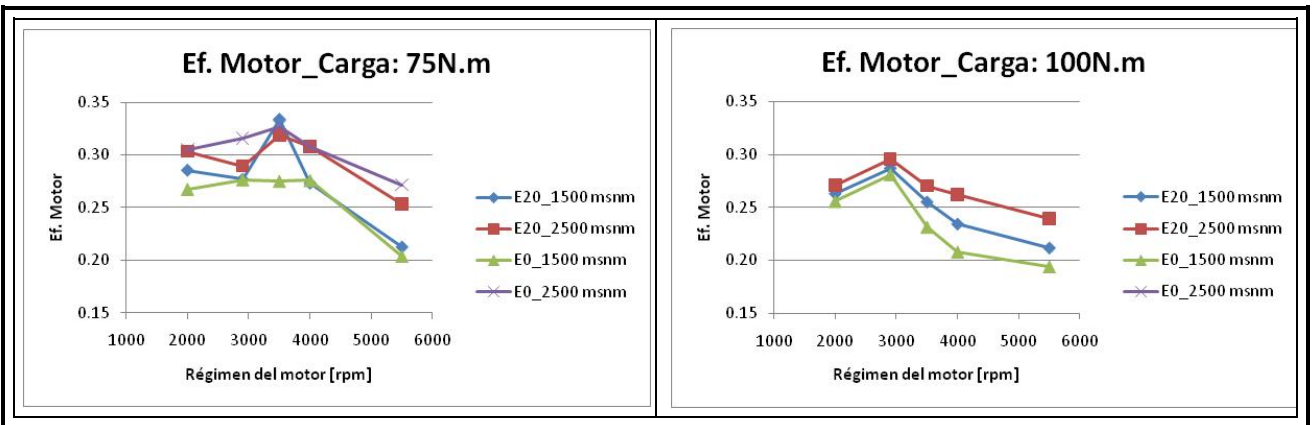


Figura 4. Eficiencia efectiva a diferentes grados de carga. Motor Logan

Para las pruebas a carga parcial se tiene prácticamente la misma eficiencia, sin embargo en las pruebas a plena carga se aprecia que es mayor la eficiencia con el uso de E20. Un aspecto interesante común a todas las pruebas es que la eficiencia del motor ha sido siempre igual o mayor en las pruebas realizadas a mayor altitud sobre el nivel del mar. Se considera que esto se debe al hecho de que para lograr que el motor entregue la misma potencia en la altura donde la presión atmosférica y la disponibilidad de oxígeno también decrece, es necesario abrir más la mariposa de aceleración del motor, lo cual mejora la eficiencia volumétrica del motor, el aire fluye a mayor velocidad, y se facilitan los procesos como el llenado del cilindro y homogenización de la mezcla, también el contenido de oxígeno del combustible se hace más importante para suplir parcialmente la menor disponibilidad de oxígeno del aire y el más alto octanaje del E20 para centrar la combustión.

Se pueden relacionar estos resultados con los de consumo específico de combustible, para concluir que aunque el consumo específico de combustible debe incrementarse para compensar el menor poder calorífico del etanol, en general el motor mantiene su eficiencia energética y de hecho se incrementa respecto a la gasolina cuando el motor es exigido.

Emisión de hidrocarburos totales (THC)

La emisión de hidrocarburos totales se mantuvo baja y controlada en la mayor parte del rango de operación de motor (

Figura 5), esto es, para las pruebas a carga parcial en los regímenes bajos a medio altos, con emisiones por debajo de 0.4 g/kWh aproximadamente, un acercamiento a la zona permite observar que aún en valores tan pequeños se tiene una tendencia a emisiones ligeramente mayores con E0 y a mayor altitud, como era de esperarse para el combustible con mayor proporción de carbono.

La emisión de THC se incrementa de manera importante cuando se alcanzan regímenes de giro altos, cercanos al de máxima potencia del motor y cuando se aplica plena carga con valores entre 2 y 3 g/kWh, justo en condiciones como esta en las cuales se suele enriquecer la mezcla que se aprecia una reducción notable de las emisiones de THC con E20.

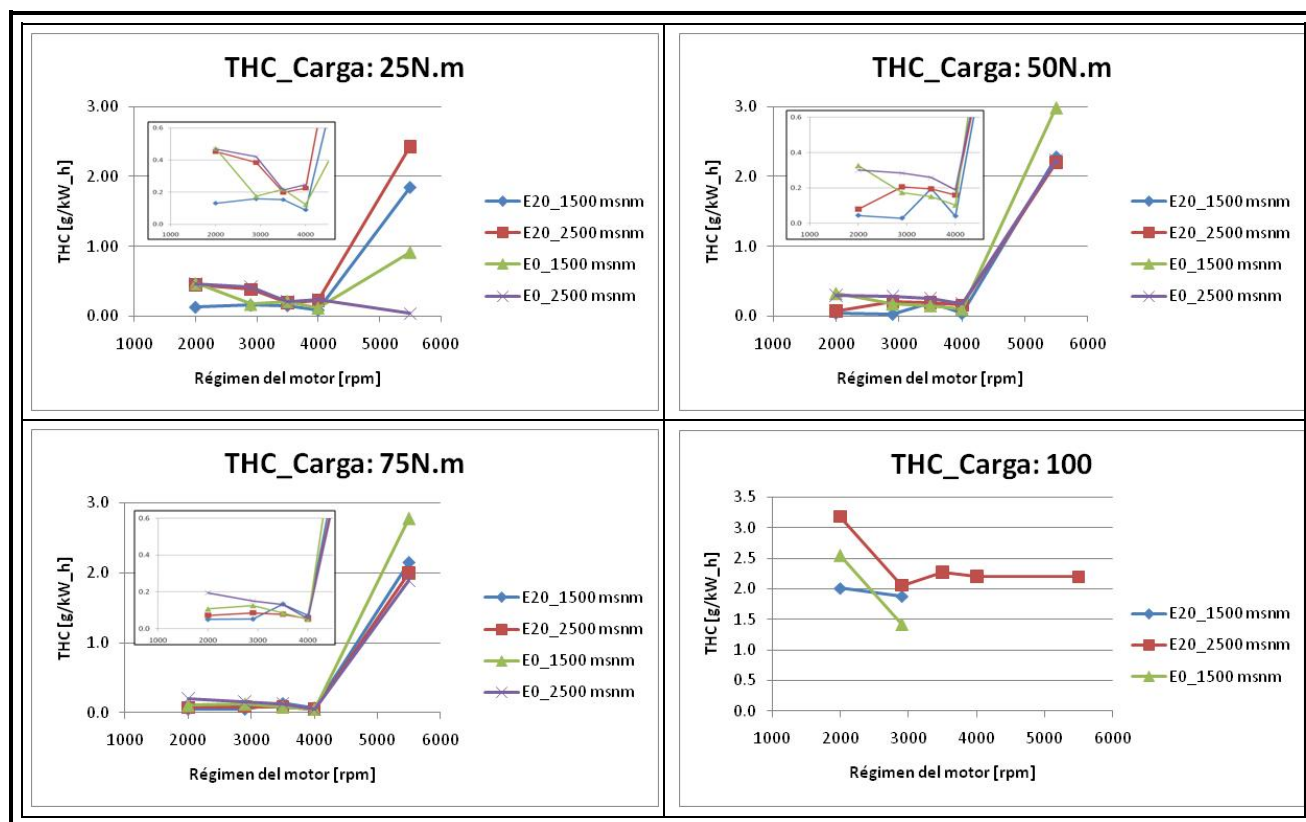


Figura 5. Emisión de THC a diferentes grados de carga. Motor Logan

Las emisiones se expresan como la cantidad emitida en gramos por unidad de potencia entregada para comparar a igualdad de condiciones e incluyendo el hecho de que hay variaciones en dosificación, flujos y la concentración misma de hidrocarburos, salvo para el caso particular de máxima carga donde las condiciones de muy alta temperatura de

muestreo no permitieron registrar los parámetros necesarios para obtener este índice al altos regímenes, en los que solo quedo el registro individual de THC en base volumétrica.

Emisión de CO

En un motor las emisiones de CO están comúnmente asociadas en tendencia a las emisiones de hidrocarburos puesto que ambos son básicamente resultado de la combustión incompleta que ocurre en el interior del motor, sobre todo cuando la mezcla es rica. De esta manera se aprecia que las emisiones de CO siguen tendencias similares a las obtenidas para THC (Figura 6). Los niveles son mínimos para regímenes bajos a medios altos para todas las cargas parciales y se incrementan al igual que los THC's cuando se alcanzan los máximos regímenes y a plena carga, donde la mezcla se enriquece para proporcionar mayor potencia. También aquí, un acercamiento a la zona de bajas emisiones revela que el motor se ve beneficiado por el combustible oxigenado para realizar una combustión más completa.

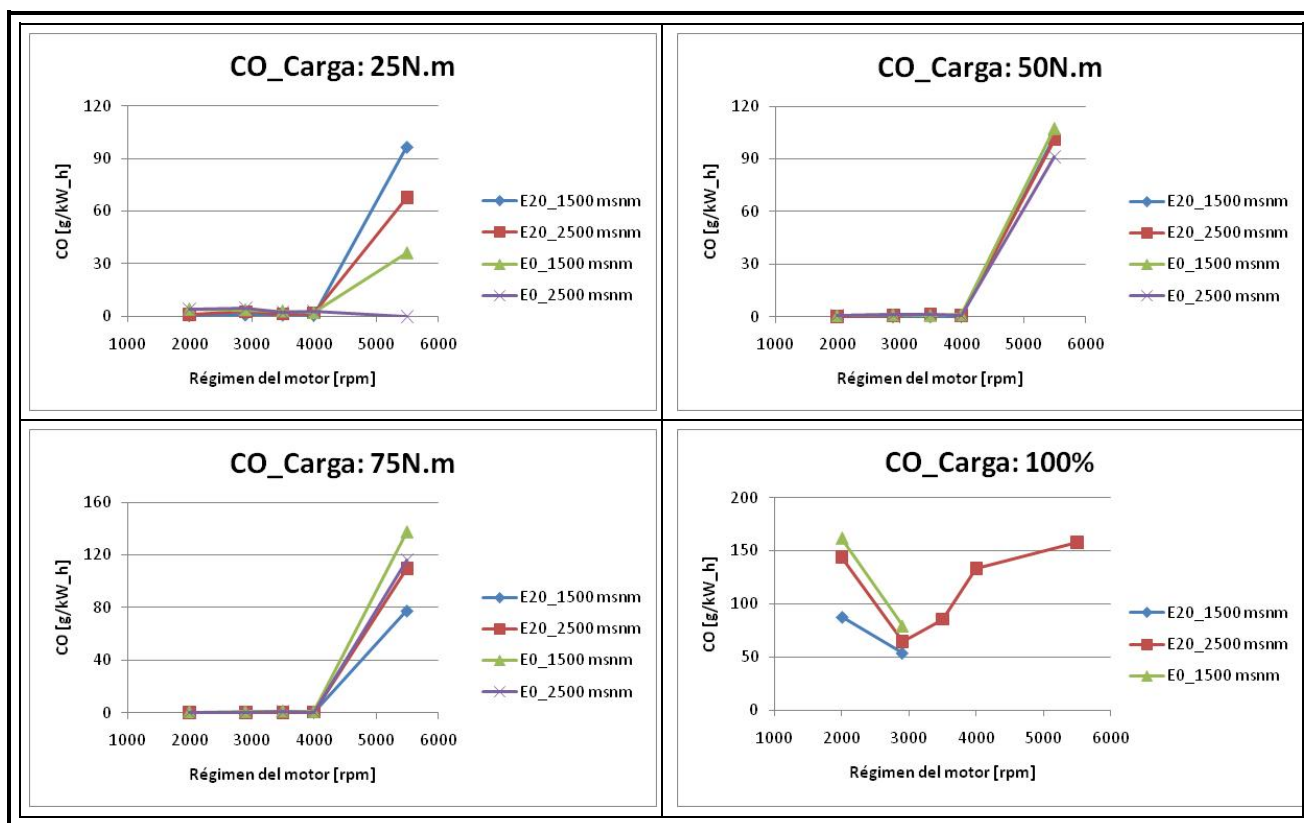


Figura 6. Emisión de CO a diferentes grados de carga. Motor Logan

Emisiones de óxido nítrico (NO)

Los compuestos NOx se producen durante la combustión por reacción entre oxígeno y nitrógeno, siendo altamente dependientes de la temperatura.

La emisión de NOx ha sido muy bajas también, lo que habla de un buen funcionamiento del convertidor catalítico del motor (ver

Figura 7). En las figura se aprecia que el orden de los valores está por debajo de las 10 ppm, que no hubo un incremento al incluir etanol en el combustible para producir la mezcla E20, las diferencias obtenidas entre uno y otro fluctúan para diversos regímenes y niveles de carga, pero era de esperarse puesto que los valores obtenidos están muy cerca del límite de resolución del equipo utilizado.

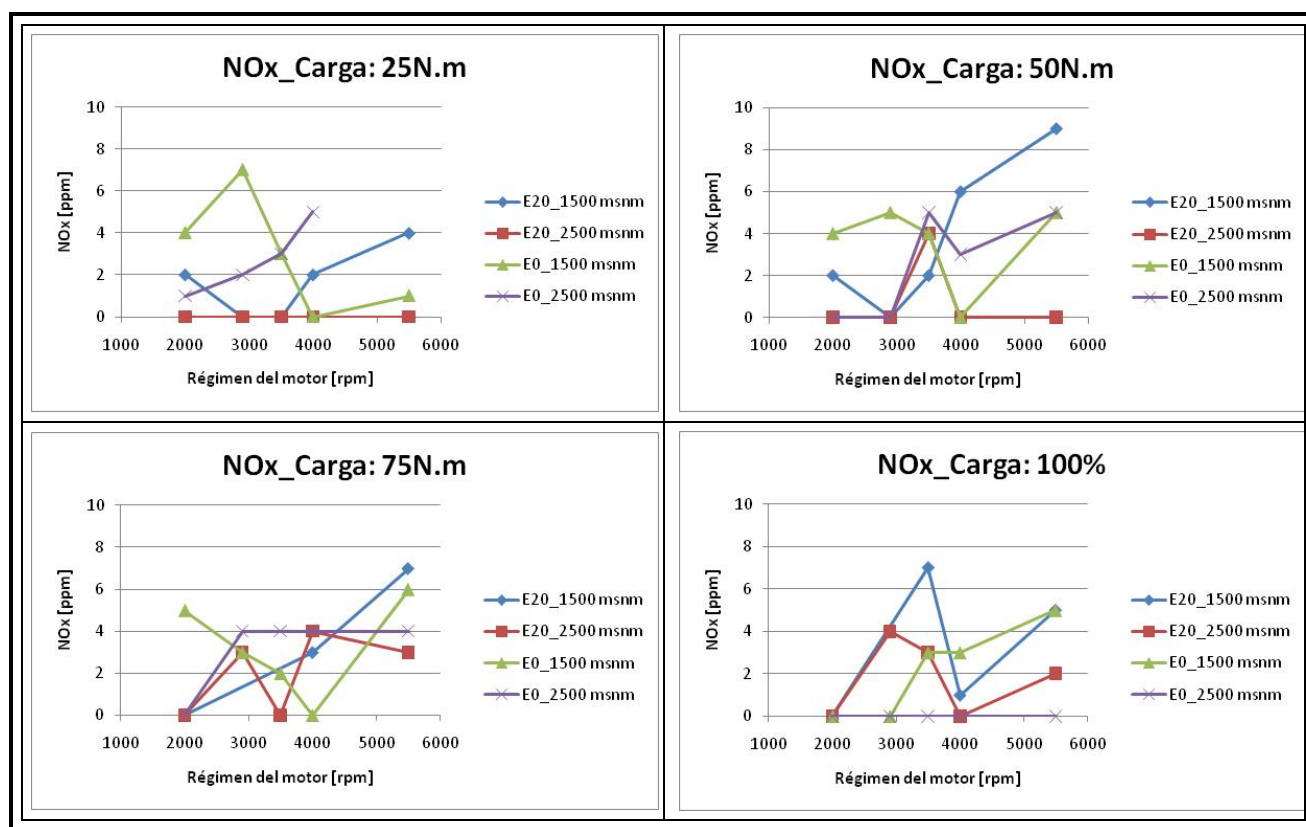


Figura 7. Emisión de NOx a diferentes grados de carga. Motor Logan

Emisión de CO₂

La emisión de CO₂ suele presentarse en concentración volumétrica, es la forma en que comúnmente reporta un analizador de gases y como lo hacen en la mayoría de centros de

servicio automotor. Sin embargo como la concentración volumétrica habla de la proporción y no de cantidades netas, y como además un motor de encendido provocado trabaja generalmente con mezclas cercanas a la estequiométrica salvo a plena carga, es de esperarse que estas lecturas no presenten mayores variaciones en un motor de ciclo Otto.

La

Figura 8 presenta la emisión específica de CO₂ que es la cantidad de este gas producido para que el motor entregue una unidad de potencia, este resultado es más valioso que la sola concentración volumétrica puesto que revela que debido al incremento en el consumo de combustible necesario para obtener la misma potencia con la mezcla E20, se producirá mayor cantidad de este gas de efecto invernadero en el motor al demandarle al motor realizar el mismo trabajo.

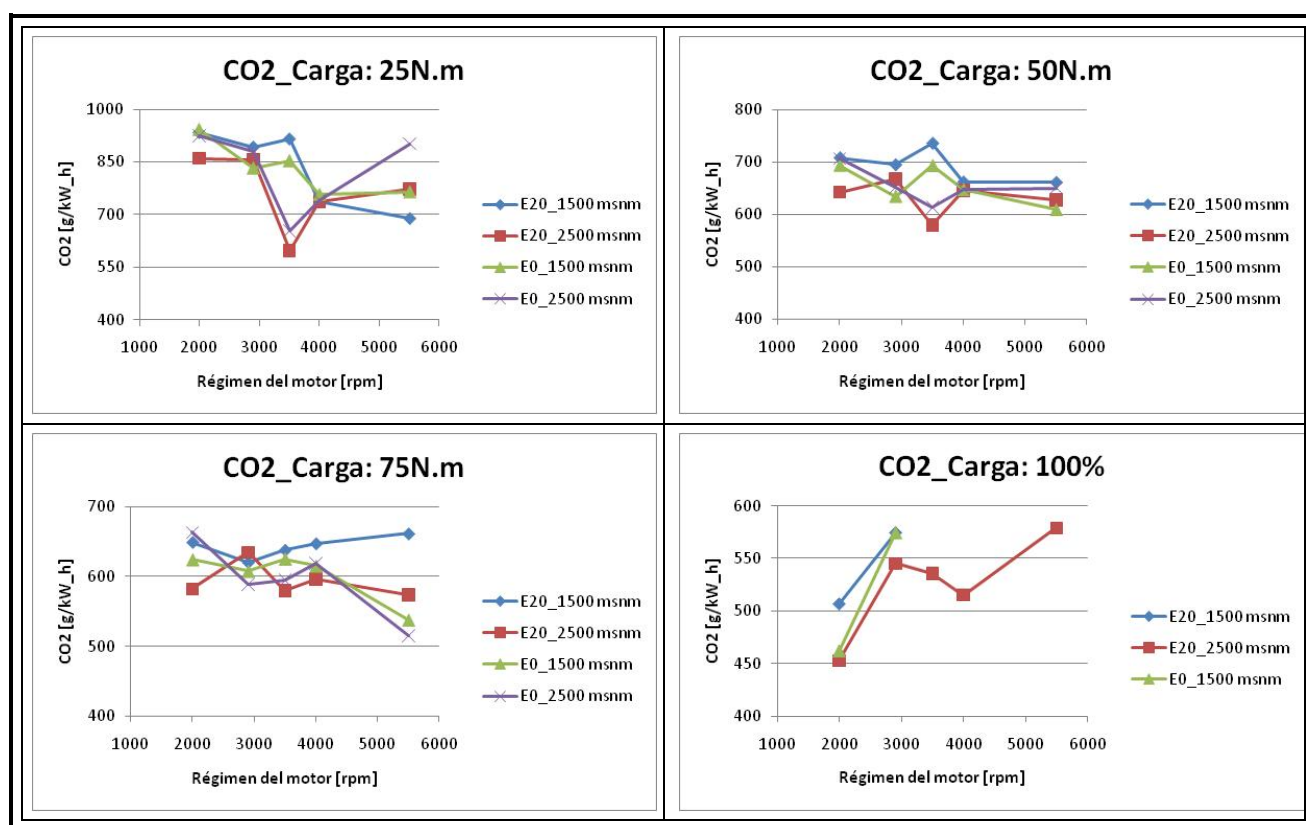


Figura 8. Emisión específica de CO₂ a diferentes grados de carga. Motor Logan

3.2 – Motor Twingo 1.2

Par Motor

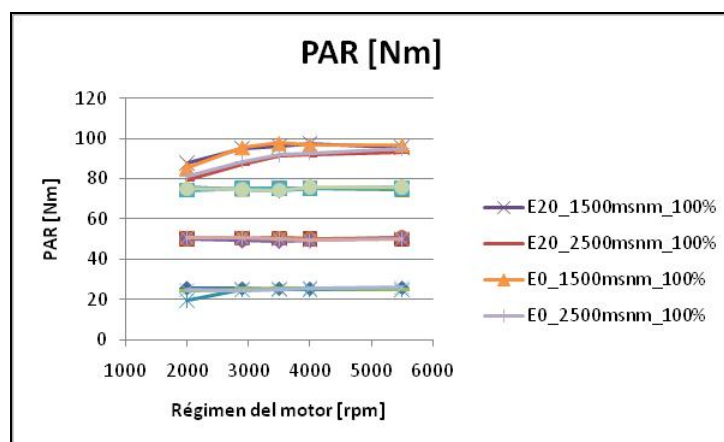


Figura 9. Par al freno para todos los modos de operación. Motor Twingo

La

Figura 9 presenta el par al freno para el motor Twingo, se comprueba también con este motor que las pruebas se hicieron a igualdad de entrega energética en el eje de salida del motor, con excepción de las pruebas a plena carga por la naturaleza de estas.

Se obtuvo prácticamente el mismo par al freno usando E0 comparado con E20, dicho comportamiento se presenta a todos los regímenes probados, así mismo las pruebas a 2500 msnm presentaron un comportamiento similar, es decir, no se encontró variación significativa en las prestaciones mecánicas del motor al usar la mezcla E20, se considera que es debido al incremento del octanaje del combustible al incluir etanol, lo cual permitiría al motor usar mayores avances de encendido, centrando la combustión para obtener mayor par al freno, así como al hecho de ser un motor de 4 válvulas por cilindro lo cual favorece el flujo de mezcla a los cilindros.

Consumo específico de combustible

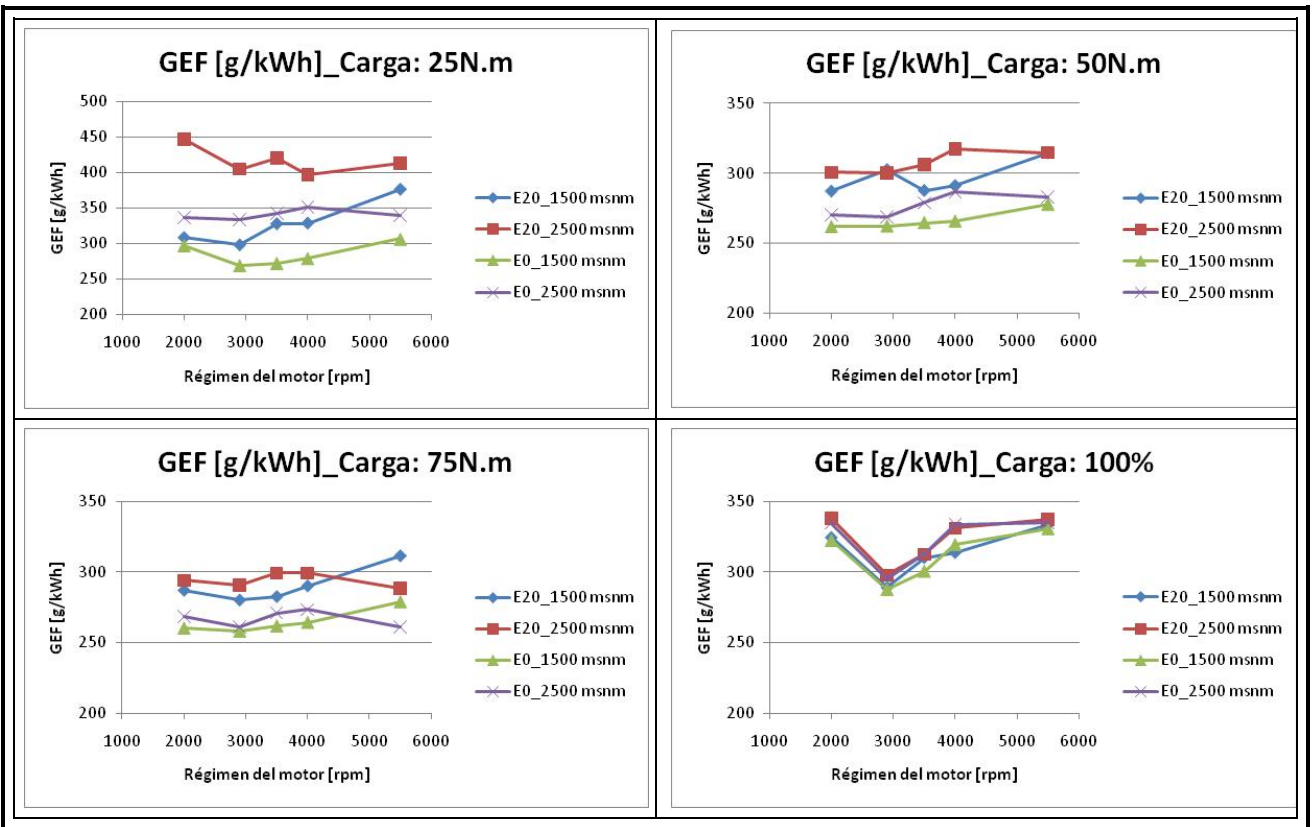


Figura 10. gef a diferentes grados de carga. Motor Twingo

El motor Twingo, al igual de lo encontrado con el Logan debe consumir más combustible para poder entregar el mismo par al freno cuando usa E20 comparado con E0, esto ha sucedido en todos los modos de operación como se aprecia en la

Figura 10. En las pruebas a 2500 msnm se obtuvo también un mayor consumo específico de combustible con E20 para todas las pruebas a carga parcial, en las pruebas a plena carga el consumo fue prácticamente el mismo en las dos pruebas con E20 y las dos con E0, puesto que el consumo de nuevo es determinado por los parámetros de inyección del motor.

Eficiencia efectiva

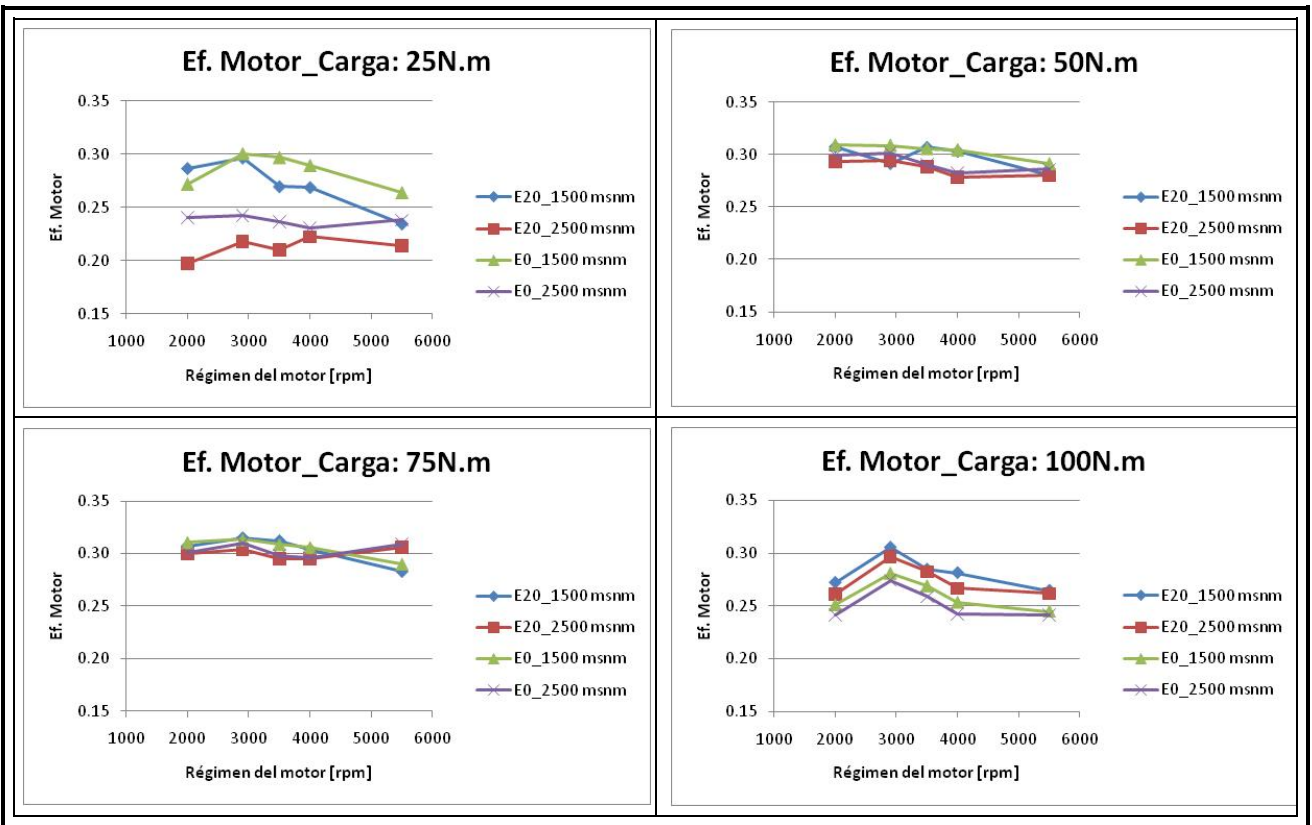


Figura 11. Eficiencia efectiva a diferentes grados de carga. Motor Twingo

Los resultados de la eficiencia para convertir el contenido energético de combustible para el motor Twingo presenta algunas diferencias importantes respecto al motor Logan. Siendo el Twingo un motor de 4 válvulas por cilindro, presenta mejor desempeño a altos niveles de carga y régimen donde el proceso de renovación de la carga del cilindro se realiza de mejor manera con el flujo a mayor velocidad, por esto la eficiencia es menor a las pruebas a 25 Nm donde se requiere un alto consumo de combustible para obtener la respuesta deseada y le cuesta más con E20 lo cual se presenta también a mayor altitud. En las pruebas a 50 y 75 Nm la eficiencia es básicamente igual independientemente de la altitud, mientras que en las pruebas a plena carga donde el motor se comporta mejor para sus características de diseño la eficiencia es mayor con E20 aunque ligeramente menor a mayor altitud. Se considera entonces que en general el motor mantiene su eficiencia al usar E20 comparado con E0, y bajo las condiciones mayor exigencia se obtiene una ligera mejora en eficiencia gracias al contenido de oxígeno del combustible y su mayor octanaje que permite centrar la

combustión como se mencionaba anteriormente, aunque también disminuye ligeramente a mayor altitud (

Figura 11).

Emisión de hidrocarburos totales (THC)

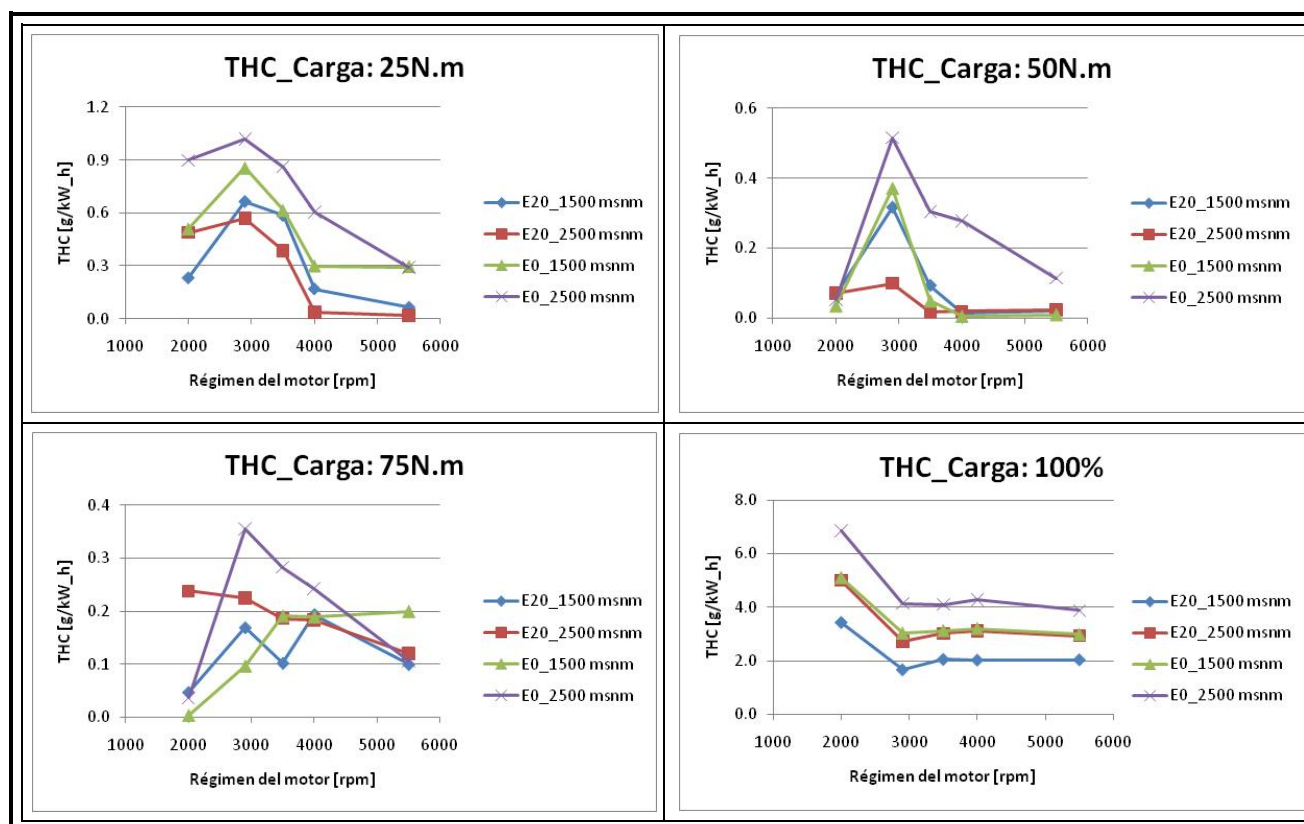


Figura 12. Emisión de THCs a diferentes grados de carga. Motor Twingo

La tendencia ha sido similar que en el caso del primer motor para las pruebas a carga parcial, es decir, bajas emisiones, esta vez por debajo de 1 g/kWh, sin embargo, la emisión del Twingo comparada con la emisión del motor Logan es aproximadamente el doble (Figura 12). La emisión de THC se incrementa de forma importante cuando se aplica plena carga, condición en la cual se suele enriquecer la mezcla, llegando hasta 7 g/kWh, en esta condición se aprecia una reducción significativa de las emisiones de THC con E20, que están del orden del 25%, atribuible al contenido de oxígeno en la molécula del combustible.

Se aprecia también que la emisión del motor Twingo de 16 válvulas es mayor que la del motor Logan 8 válvulas, lo cual puede explicarse porque los motores de 4 válvulas por cilindro manejan un mayor flujo relativo al tamaño del cilindro que los de 2 válvulas.

Emisión de CO

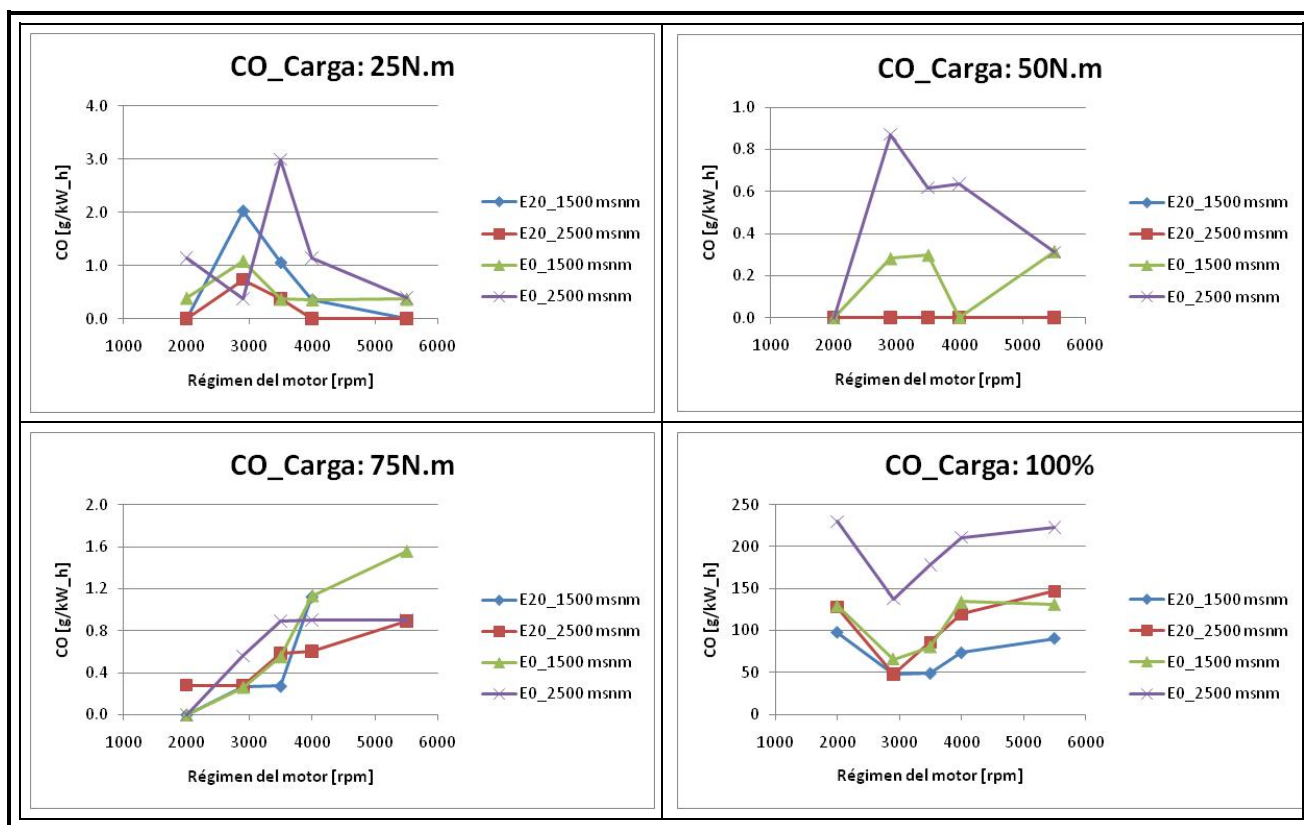


Figura 13. Emisión de CO a diferentes grados de carga. Motor Twingo

Se aprecia que las emisiones de CO siguen tendencias similares a las obtenidas para THC (Figura 13). Los niveles son mínimos para cargas parciales y solo aumentan considerablemente justo como ocurrió con los THC cuando se aplica plena carga, donde la mezcla se enriquece para proporcionar mayor potencia. También son congruentes los resultados de THC y CO al observar que se presentan mayores emisiones con E0 y con la altura, ratificando que el motor se ve beneficiado por el combustible oxigenado para realizar una combustión más completa. Una diferencia de la emisión de THC del Twingo respecto a la tendencia encontrada en el motor Logan, surge al observar que las emisiones

en el Twingo no se incrementan cuando se alcanzan altos regímenes de giro, sino únicamente a plena carga, situación que se atribuye a la programación de la ECU.

Emisiones de óxido nítrico (NO)

Las emisiones de NOx obtenidas han sido muy bajas al igual que en el caso del motor Logan, lo que habla de un buen funcionamiento del convertidor catalítico del motor. Se omite la gráfica que no aporta nada diferente a lo presentado para el motor Logan.

Emisión de CO₂

De manera similar a los resultados anteriormente para el motor Logan, también el motor Twingo evidenció que en realidad las emisiones de CO₂ presentan un incremento (Figura 14) que indican que el motor producirá más CO₂ para realizar el mismo trabajo cuando opera con E20 comparado a su operación con gasolina.

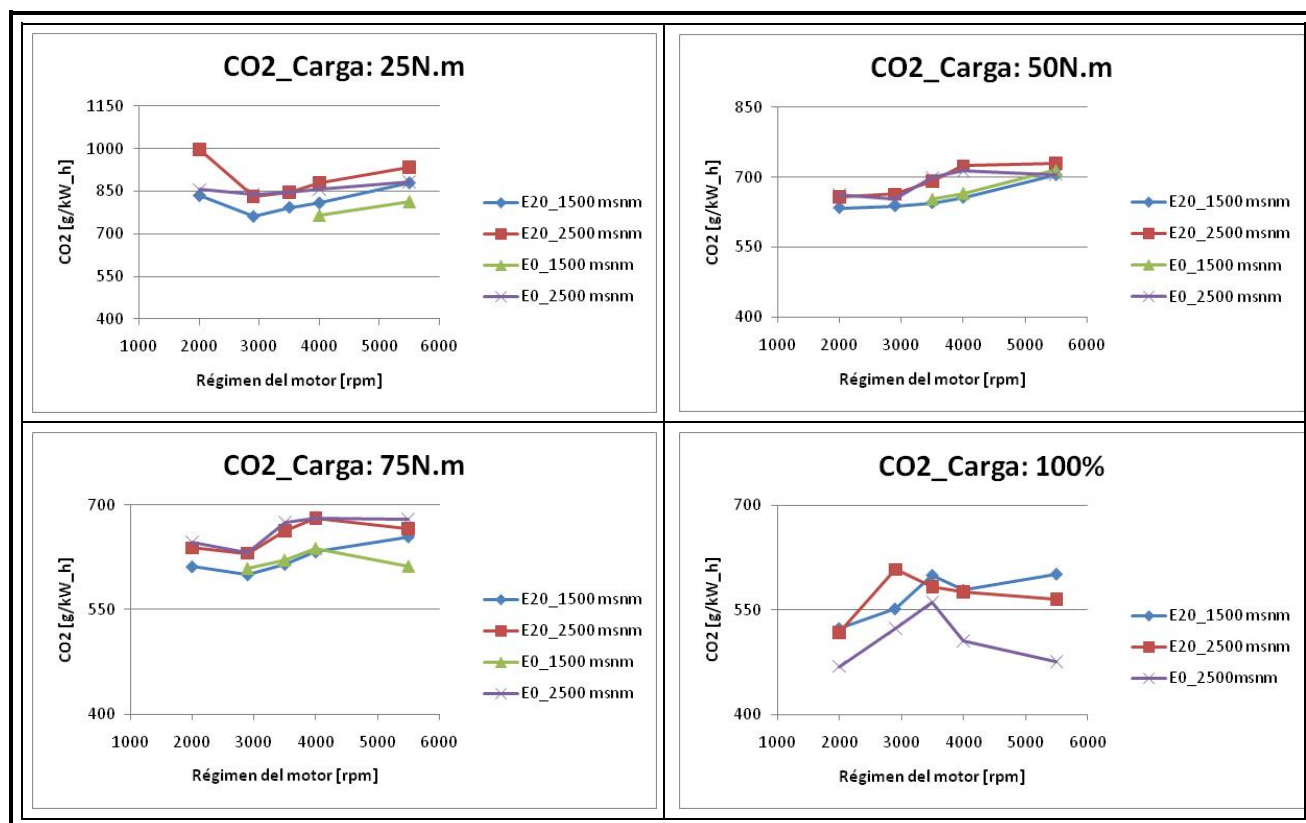


Figura 14. Emisión específica de CO₂ a diferentes grados de carga. Motor Twingo

4.- Conclusiones

Los resultados de par motor medidos revelan que se midió a las mismas condiciones de exigencia con los dos combustibles lo cual da validez a los análisis comparativos de los cuales se resaltan los siguientes:

Parte 1. Desempeño mecánico y energético.

- Para obtener la misma potencia, independientemente de la altitud sobre el nivel del mar, es necesario incrementar el consumo de combustible debido al menor poder calorífico del bioetanol. El consumo de combustible es menor a grandes altitudes (para la misma potencia), independientemente del combustible, debido a que mejora el rendimiento volumétrico del motor al operar con mayor apertura de la válvula de mariposa.
- La mezcla E20 mejora ligeramente la eficiencia térmica del motor, siendo notorio a mayor exigencia del motor (plena carga). Esto ocurre debido a que el contenido de oxígeno de la mezcla mejora el proceso de combustión, que conjugado con su mayor resistencia a la detonación (mayor octanaje), permite a la ECU avanzar más el encendido de la chispa, centrando la combustión y mejorando el aprovechamiento del contenido energético del combustible. La eficiencia a diferentes altitudes está fuertemente influenciado por el diseño del sistema de admisión, de modo que el motor 4 válvulas por cilindro es de mayores prestaciones aunque menos eficiente.
- Se ha comprobado que pese al menor poder calorífico del bioetanol que conlleva a que la mezcla E20 tenga un menor poder calorífico que la gasolina convencional, el motor no se ve afectado en sus prestaciones mecánicas, lo cual se comprueba con los resultados de par y potencia a plena carga, donde se ha encontrado que se tiene incluso un ligero incremento en las prestaciones del motor. Este resultado se atribuye tanto a la mejora en la combustión con el combustible oxigenado, como al mayor octanaje del E20, lo cual permite al motor (que incorpora la electrónica necesaria) avanzar el encendido y centrar la combustión para obtener mayor potencia.

Parte 2. Emisiones contaminantes:

Se han medido las emisiones reguladas por normatividad ambiental (THC, CO, NO_x) así como CO₂. Se combinaron con otras mediciones como las de potencia, consumo de combustible, etc., para obtener las emisiones específicas de cada contaminante. Los resultados permiten concluir que:

- Se tiene una reducción importante en la emisión de inquemados de la combustión del motor, tanto de THC como de CO al usar la mezcla E20 y este comportamiento se mantiene al cambiar la altitud sobre el nivel del mar, y de hecho es consistente tanto cuando el motor emite bajas cantidades (regímenes de crucero) como cuando se emite mucho (plena carga cuando se enriquece la mezcla). Se resalta sin embargo el hecho de que las emisiones que son bajas en regímenes y cargas medias, se pueden incrementar más de 10 veces cuando el motor es exigido.
- Las emisiones de NO_x no han presentado variaciones significativas, además de ser similares fueron bastante bajas, y se considera que estas emisiones no se ven afectadas por la mezcla E20 mientras el motor opere dentro de sus rangos normales (temperatura normal de operación y buen estado del convertidor catalítico). Este comportamiento se observó en ambos motores.
- El análisis de los resultados de la emisión específica de CO₂, demuestran que para que el motor realice el mismo trabajo se emitirá una mayor cantidad de CO₂, debido a que el motor necesita consumir más combustible usando E20. Dentro del motor, el uso de etanol de origen vegetal no es un alivio para las emisiones de este gas de efecto invernadero, y se requiere un análisis de ciclo de vida para verificar si el crecimiento de la planta absorbe tanto CO₂ como el que se produce durante el proceso de obtención del etanol y de su uso en motores de combustión interna.

5.- Agradecimientos

Los autores externan su gratitud al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), a la Sociedad de Fabricación de Automotores (SOFASA S.A.), al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia por la confianza depositada, así como por su colaboración continua durante la ejecución del proyecto 2007D3608-67-07

que llegó a feliz término dentro de los tiempo proyectados. Nuestro agradecimiento igualmente para la Fundación Social de Uniban FUNDAUNIBAN por su excelente labor de interlocución frente al Ministerio de Agricultura.

Así mismo agradecimientos a todo el grupo humano que colaboró en el exitoso cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto.

6.- Glosario

E20.	Mezcla de combustibles conformada por 20% de etanol y 80% de gasolina en volumen.
E0.	Denominación para la gasolina cuando se trata como si fuera una mezcla gasolina - etanol con 0% de etanol.
MPFI.	Denominación para los motores de inyección multipunto.
g_{ef}	Consumo específico de combustible [g/kWh] conocido en inglés como <i>sfc</i> (<i>specific fuel consumption</i>)
η_e	Eficiencia efectiva del motor, o rendimiento de conversión de energía del combustible en potencia efectiva en el eje [%].
\dot{m}_g	Flujo másico de gases en el motor, corresponde a la suma de los flujos de aire y combustible
Y_j	Fracción molar del gas j en la corriente de gases.
I_j	Índice de emisión, expresa la cantidad másica emitida del gas j por unidad de potencia entregada [g_j/kWh] o por unidad de combustible consumido [g_j/g_{comb}].
ECU	Computador a bordo que controla el funcionamiento del motor.
Numero de Octano.	Cantidad que indica la capacidad antidetonante de un combustible, propiedad importante para los motores de encendido provocado.
Dosado	Relación combustible-aire (<i>FA</i>), es decir, inverso de la relación aire-combustible (<i>AF</i>).
Poder Calorífico Inferior	(<i>PCi</i>) Medida del contenido energético de un combustible, conocido en inglés como <i>LHV</i> (<i>Lower Heating Value</i>).

7.- Referencias

- [1] Novozymes & BBI International, Fuel ethanol: A Technological Evolution, Junio de 2005. Disponible en:
http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/FuelEthanol-Ir-05.pdf.
- [2] F. O. Litch, "World Ethanol Markets - The Outlook to 2020," Nov, 2008.
- [3] A. B. Taylor, Moran, D.P., Bell, A.J., "Gasoline/alcohol blends: exhaust emissions, performance and burn-rate in a multi-valve production engine," SAE paper 961988, pp. pp. 143–160., 1996.
- [4] F. Kremer, Fachetti, A., "Alcohol as automotive fuel – Brazilian experience.," State of alternative fuel technologies 2000 (SP-1545): Society of Automotive Engineers, Inc., vol. SAE 2000-01-1965, 2000.
- [5] W.-D. Hsieh, R.-H. Chen, T.-L. Wu et al., "Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels," Atmospheric Environment, vol. 36, no. 3, pp. 403-410, 2002.
- [6] C.-W. Wu, R.-H. Chen, J.-Y. Pu et al., "The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline-blended fuels," Atmospheric Environment, vol. 38, no. 40, pp. 7093-7100, 2004.
- [7] F. Yüksel, and B. Yüksel, "The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine," Renewable Energy, vol. 29, no. 7, pp. 1181-1191, 2004.
- [8] M. A. Ceviz, and F. Yüksel, "Effects of ethanol-unleaded gasoline blends on cyclic variability and emissions in an SI engine," Applied Thermal Engineering, vol. 25, no. 5-6, pp. 917-925, 2005.
- [9] H. Bayraktar, "Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines," Renewable Energy, vol. 30, no. 11, pp. 1733-1747, 2005.
- [10] M. Al-Hasan, "Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission," Energy Conversion and Management, vol. 44, no. 9, pp. 1547-1561, 2003.

- [11] B.-Q. He, W. Jian-Xin, J.-M. Hao et al., "A study on emission characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels," *Atmospheric Environment*, vol. 37, no. 7, pp. 949-957, 2003.
- [12] T. Beer, and T. Grant, "Life-cycle analysis of emissions from fuel ethanol and blends in Australian heavy and light vehicles," *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, no. 8-9, pp. 833-837, 2007.
- [13] H. S. Yücesu, T. Topgül, C. Çinar et al., "Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 17-18, pp. 2272-2278, 2006.
- [14] H. S. Yücesu, A. Sozen, T. Topgül et al., "Comparative study of mathematical and experimental analysis of spark ignition engine performance used ethanol-gasoline blend fuel," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 2-3, pp. 358-368, 2007.
- [15] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Nueva York: Editorial McGraw Hill, Julio de 1989.
- [16] A. Agudelo, J. Agudelo, and P. Benjumea, *Diagnostico de la combustión de biocombustibles en motores.*, Medellin: Universidad de Antioquia., 2007.