

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

Pruebas De Rendimiento Y De Emisión De Gases En Un Motor Monocilíndrico De Ignición Por Chispa Utilizando Mezclas Gasolina-Etanol Anhidro.

Camarillo Montero J.A.¹, Marín Hernández, J.J.¹, Mestizo Cerón J.R.¹, González Macías, U.²

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, campus Xalapa.
Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, Ver. México.
Tel: +52+228+8421757

jcamarillo@uv.mx; jmarin@uv.mx; jmestizo@uv.mx

² Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas N° 152,
San Bartolo Atepehuacan, México DF. 07730, México.

Tel: +52+229+9208171/131

ugonzale@imp.mx

Resumen

En el presente trabajo se analizan los efectos del uso de combustibles mezcla gasolina-etanol anhidro (0-40% v/v) en el rendimiento y las emisiones del escape de un motor monocilíndrico de ignición por chispa marca AVL modelo 5401. Las pruebas de rendimiento fueron elaboradas a un régimen constante de velocidad de 2000 rpm, variando las condiciones de lambda a los valores típicos de funcionamiento de un automotor, donde se analizaron la potencia indicada y el consumo específico de combustible, mientras que los gases analizados fueron monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarburos no quemados (HC) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Los resultados muestran un efecto de empobrecimiento en el combustible al aumentar el contenido de etanol, causando una mínima reducción de la potencia indicada y aumentando considerablemente el consumo de combustible. La mezcla E20 presenta los mejores resultados en el análisis de los gases de escape, reduciendo notablemente las emisiones de CO, HC y NO_x, manteniéndose prácticamente constante la emisión de CO₂.

Palabras clave: Mezclas gasolina-etanol anhidro, motor monocilíndrico, pruebas de rendimiento y emisión de gases de escape

**XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno
Aguascalientes, México, 2013**

**Performance Testing And Exhaust Emissions In A Single Cylinder Spark Ignition Using Gasoline-Anhydrous
Ethanol Blends.**

Camarillo Montero J.A.¹, Marín Hernández, J.J.¹, Mestizo Cerón J.R.¹, González Macías, U.²

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, campus Xalapa.
Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán, s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa, Ver. México.

Tel: +52+228+8421757

jcamarillo@uv.mx; jmarin@uv.mx; jmestizo@uv.mx

² Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas N° 152,
San Bartolo Atepehuacan, México DF. 07730, México.

Tel: +52+229+9208171/131

ugonzale@imp.mx

Abstract

This work investigates the effects of using gasoline-anhydrous ethanol fuel blends (0-40% v / v) on performance and exhaust emissions of a single cylinder engine spark ignition by AVL model 540. Performance tests were developed at a steady speed of 2000 rpm, varying the lambda terms at typical operation values of an automobil, which analyzed the indicated power and specific fuel consumption, while the exhaust emissions were analyzed for carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), unburned hydrocarbons (HC) and oxides of nitrogen (NO_x). The results show an enleanment effect in the fuel to increase the ethanol content, causing a marginal reduction in the indicated power and increasing fuel consumption considerably. E20 present the best performance in the analysis of exhaust emissions, dramatically reducing contents of CO, HC and NO₂, remaining practically constant CO₂ emissions.

Keywords: Gasoline-anhydrous ethanol blends, single cylinder engine, performance testing and exhaust emissions.

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

1. Introducción

En la década de los 70's, a nivel mundial se originó una búsqueda de fuentes alternativas de energía debido a la crisis petrolera ocasionada por la guerra árabe-israelí, donde países como Estados Unidos y Brasil incrementaron su producción de etanol con la finalidad de depender en menor proporción de los hidrocarburos [1].

El etanol es utilizado desde 1989 como aditivo en las gasolinas, debido a que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) inició la supresión progresiva del plomo en la gasolina, ya que tiene efectos nocivos para la salud humana [2].

Recientemente, en Estados Unidos la EPA concedió la autorización de introducir al mercado gasolina que contenga un volumen de hasta 15% de etanol anhidro para ser utilizada en vehículos ligeros modelos 2007 y posteriores. Sin embargo, la adición de etanol en niveles superiores al 15% en volumen requiere de características especiales de los automotores debido a problemas en la inyección y rendimiento del motor [3,4].

En México, se publicó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en febrero de 2008, donde se abre la posibilidad de utilizar etanol anhidro como oxigenante en las gasolinas y sustituir parcialmente el uso del metil tert butil éter (MTBE) debido a la alta contaminación que puede desatar en aguas subterráneas [5].

En el tercer cuatrimestre del año 2010, entró en vigor una prueba piloto del uso de mezclas gasolina-etanol anhidro en 6% de volumen en la zona conurbada de la ciudad de Guadalajara, donde se invirtieron por parte de PEMEX entre 150 y 320 millones de pesos, con una demanda estimada de 200 millones de litros de etanol por año [6].

Debido a que el etanol se produce por la fermentación de productos naturales como la caña de azúcar y el maíz, contribuye a la reducción de CO₂ por efecto de la fotosíntesis de las plantaciones; contiene hasta un 35% más de oxígeno en su composición, lo que puede provocar una combustión más completa en el automotor, resultando en menores emisiones contaminantes hacia el medio ambiente [7,8].

2. Sección Experimental

Los combustibles utilizados fueron obtenidos de diferentes fuentes suministradoras: el etanol anhidro se obtuvo del ingenio La Gloria, ubicado en Ciudad Galván, Veracruz, mientras que la gasolina referida como “base” se obtuvo por el Instituto Mexicano del Petróleo. El etanol tiene una pureza del 99.94% y cumple con las especificaciones ASTM D-4806-08, excepto que no está desnaturalizado; la gasolina base no cuenta con ningún aditivo oxigenante con la finalidad de evitar alteraciones en los resultados.

Ambos combustibles fueron almacenados y mantenidos por separado a una temperatura de 9°C, evitando pérdidas por evaporación. Las mezclas se llevaron a cabo el mismo día en que se realizaron las pruebas, a una temperatura de 36 ° C para evitar que ocurriera una separación de fases debido al contenido de agua en el etanol.

La tabla 1 muestra las principales características de los combustibles utilizados para la elaboración de las mezclas.

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles utilizados

Parámetro	Método	Etanol	Gasolina base
Temp. destilación (°C)	ASTM D 86	-	206.3
Densidad relativa	ASTM D 1298	0.79	0.7454
Poder calorífico (kJ/kg)	ASTM D 240	29670	42540
Octanaje (RON/MON)	ASTM D 2699-2700	109/98	91.3/84
Relación estequiométrica A/F	-	8.96	14.61

El motor utilizado para el desarrollo de este estudio es monocilíndrico de ignición por chispa, con inyección electrónica. El motor está acoplado a un dinamómetro asíncrono que controla su velocidad a una precisión de +/- 1 rpm; tiene un codificador de la posición angular del cigüeñal así como un sensor de presión dentro de la cámara. Cuenta con un equipo analizador de gases de escape, así como diversos medidores de temperatura y presión en los puntos principales del motor.

A todo el equipo se le da mantenimiento constantemente y su calibración se lleva a cabo bajo lo establecido por las especificaciones ISO 9001.

La tabla 2 muestra las características principales del motor utilizado en este trabajo.

Tabla 2. Características principales del motor

Parámetro	Descripción
Tipo de motor	Monocilíndrico de ignición por chispa
Diámetro cilindro	86 mm
Carrera	86 mm
Volumen desplazamiento	0.5 L
Relación de compresión	10.5:1
Sistema de ignición	CoilVW6NO905104
Potencia máxima	25 HP a 6000 rpm
Válvulas por cilindro	4

Para el control electrónico de la inyección y la ignición, el equipo cuenta con el software GEMS (General Engine Management Systems), donde se pueden variar la duración del pulso de inyección, la carga de arrastre del dinamómetro y monitorear la temperatura de la admisión de aire.

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

La presión interna en la cámara de combustión se mide con un transductor piezoeléctrico que emite una señal, la cual es adquirida y procesada por el equipo AVL-INDIMETER 619. El sistema utiliza un modelo para calcular el área bajo la curva y determinar la energía contenida en el cilindro en cada instante de tiempo, tomando en cuenta la cantidad de trabajo que se transfiere hacia el pistón, la energía generada por la combustión y la pérdida de calor hacia las paredes del cilindro. El mismo equipo puede medir el torque indicado generado en la cámara de combustión y por lo tanto, conocer la potencia indicada generada.

Se utilizó la ecuación de lambda de Brettschneider (λ) para calcular el valor adimensional de la razón de aire real admitido con el aire que se debería admitir; una vez conociendo dicho valor, se pudo calcular la relación real de aire/combustible de cada mezcla utilizada y por lo tanto, se calculó el consumo de combustible en kg/h.

La ecuación de Brettschneider se calcula basándose en las emisiones del escape y la composición química del combustible, incluyendo la cantidad de oxígeno presente [14].

Cuando $\lambda=1$, se trata de condiciones de operación estequiométricas, mientras que si $\lambda=1.1$, se tiene un valor de 10% de exceso de combustible (mezcla rica), y si $\lambda=0.9$, se tiene un 10% de exceso de aire (mezcla pobre).

Los parámetros de funcionamiento del motor que se controlaron y mantuvieron constantes durante la prueba fueron: velocidad angular, temperatura y presión de admisión de aire, temperatura y presión del combustible, humedad relativa en la admisión y temperatura del aceite.

La tabla 3 muestra los valores de los parámetros de operación del motor.

Tabla 3. Condiciones de operación del motor durante la prueba

Parámetro	Valor
Velocidad angular (rpm)	2000
Temperatura de admisión (°C)	40°C
Presión de admisión (mbar)	1035
Temperatura del combustible (°C)	35°C
Presión del combustible (bar)	2.8
Humedad relativa (%)	4.30%
Temperatura del aceite (°C)	90°C

La medición de los gases de escape se realiza con el equipo AVL CEBII, el cual mide hidrocarburos totales, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y oxígeno. La medición de HC se lleva a cabo por la

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

detección de ionización de flama, el monóxido y dióxido de carbono se miden por un sensor infrarrojo no dispersivo; los óxidos de nitrógeno se miden por un detector de quimioluminiscencia y finalmente, la cantidad de oxígeno se detecta con un sensor paramagnético.

3. Resultados y Discusión

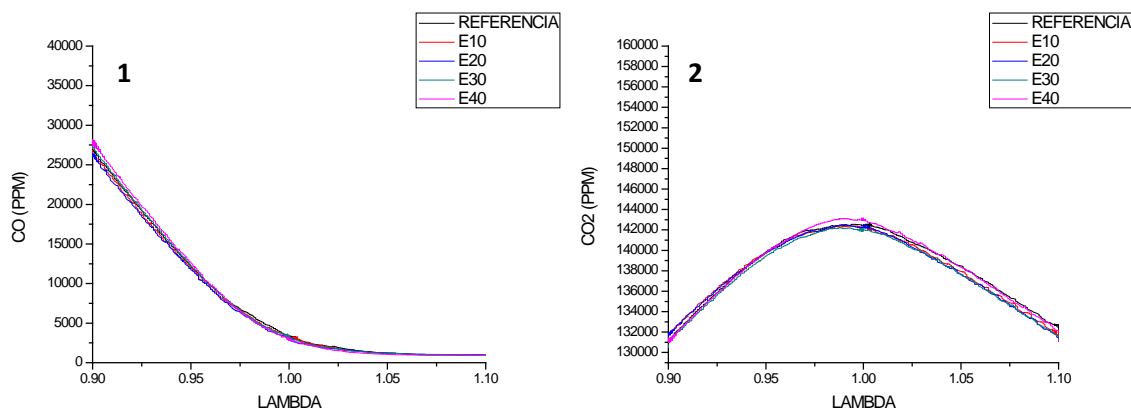
Para iniciar la prueba, se ajustó el valor de λ a 0.9, donde se tiene una condición típica de abundancia de combustible en los automotores; se realizaron mediciones para valores de $\lambda = 0.9, 1$ y 1.1 en todos los combustibles probados. La admisión de aire fue mantenida a un valor constante, donde únicamente se varió la inyección de combustible para poder ajustar las condiciones de lambda.

Al aumentar el contenido de etanol, se tuvo un efecto de empobrecimiento en la mezcla, donde se tuvo que aumentar la duración del pulso de inyección de combustible en un 20% aproximadamente para mantener el valor de lambda en condiciones estequiométricas utilizando E40, disminuyéndose la duración del pulso en mezclas con menor proporción de etanol (E30, E20, E10).

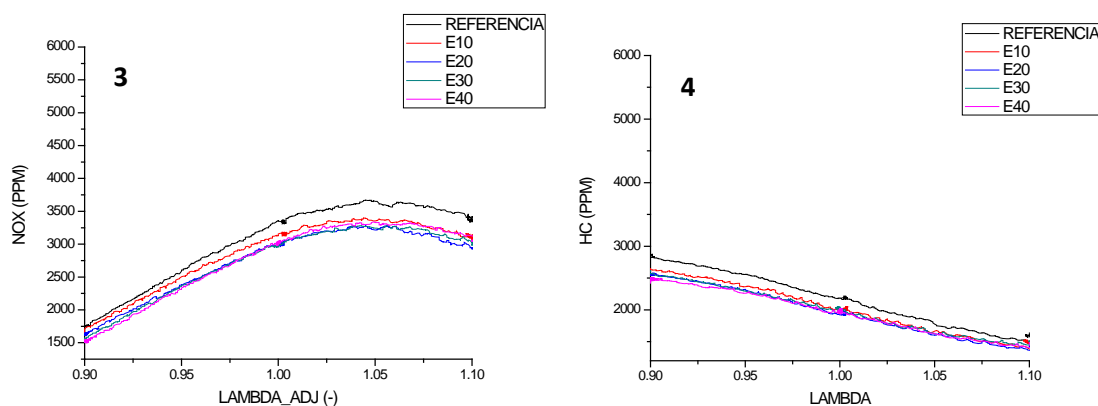
Este efecto es resultado del incremento de oxígeno en el combustible, producto del contenido de etanol, ya que cuenta con hasta un 35% de oxígeno en su composición química.

4.1 Emisiones

Las figuras 1, 2, 3 y 4 muestran las emisiones de CO, CO₂, NO_x y HC.



XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013



Figuras. 1, 2, 3 y 4. Medición de los gases de escape

En todos los casos, el eje de las abscisas muestra el valor de lambda de Brettschneider desde 0.9 hasta 1.1. En las figuras, a simple vista no se observa una diferencia significativa entre los 5 combustibles probados, pero realizando una comparación más detallada utilizando el método de la integración numérica para conocer el área bajo cada curva resultante, se pudo conocer el comportamiento real de los gases para cada caso.

En base a lo anterior se construyó la tabla 4, que contiene la diferencia porcentual de incremento o disminución del valor de cada gas de escape medido con respecto al combustible de referencia.

Tabla 4. Porcentaje de variación en la emisión de gases de escape respecto a la referencia

Gases	Combustibles			
	E10(%)	E20(%)	E30(%)	E40(%)
CO	-2.612	-4.2049	-0.3138	0.0509
CO2	-0.1426	-0.2045	-0.3626	0.0689
NOx	-5.9362	-9.8563	-9.9346	-9.2846
HC	-6.947	-9.7935	-8.6999	-10.0919

Como se puede observar en la tabla 4, existe una reducción en la emisión de CO para mezclas con un contenido de etanol del 10-20%, empezando a incrementarse considerablemente al aumentar el volumen de etanol en hasta un 40%, donde los valores de emisión se encuentran por encima de los de la referencia. En la figura 1 se aprecia que para todos los combustibles, se presenta la mayor emisión en condiciones ricas, donde no hay el aire suficiente para que se alcance a oxidar todo el carbono presente, por lo que es mayor la cantidad de CO; al incrementar la cantidad de aire ($\lambda > 1$), la reducción de CO se da con una tendencia exponencial decreciente, donde se hace asintótica para

valores de λ mayores a 1.05. El porcentaje de disminución de CO se encuentra por debajo de lo indicado por otros autores [9,13], debido a que no reportan ningún control de la inyección al incrementar el contenido de etanol en sus mezclas, por lo que se espera que el empobrecimiento sea excesivo y todo el carbono disponible se oxide, reduciendo drásticamente la cantidad de CO.

En el caso del CO₂, existe una reducción marginal en la emisión de los 4 combustibles en comparación con la referencia, teniendo un valor máximo en la mezcla E30. Al utilizar E40, se observa una tendencia de aumento en la emisión de CO₂, lo que supone si se sigue incrementando el contenido de etanol, siga incrementándose la cantidad de CO₂. Esto se puede derivar del hecho de que se alcanza a oxidar mayor contenido de carbono, produciendo mayor CO₂ y disminuyendo la cantidad de CO, lo cual suena contradictorio, ya que en E40, la emisión de CO fue mayor respecto a la referencia.

La mayor emisión de CO₂ se dio en condiciones estequiométricas [13], lo cual concuerda con lo indicado por autores de estudios en condiciones similares [10,11].

Por parte de los NO_x, existen reducciones considerables en las 4 mezclas combustibles probadas, donde E30 presenta la mayor reducción con un 10% menos aproximadamente que lo emitido por el combustible de referencia. Este comportamiento está directamente relacionado con la temperatura de escape del motor, ya que la formación de NO_x aumenta conforme se incrementa la temperatura de combustión, por lo tanto, si esta disminuye, disminuirá de igual manera la temperatura de los gases de escape y entonces será menor la formación de NO_x.

Este efecto se debe a que los cambios de temperatura en los gases de escape son proporcionales con la temperatura máxima del cilindro, debido a que el etanol contiene un mayor calor latente de vaporización, por lo tanto, tiene la capacidad de absorber energía calorífica de las paredes del cilindro durante la vaporización del combustible, ocasionando que la temperatura de combustión sea menor y por lo tanto, la de los gases de escape también.

La figura 5 muestra la temperatura promedio de los gases de escape para todos los combustibles probados.

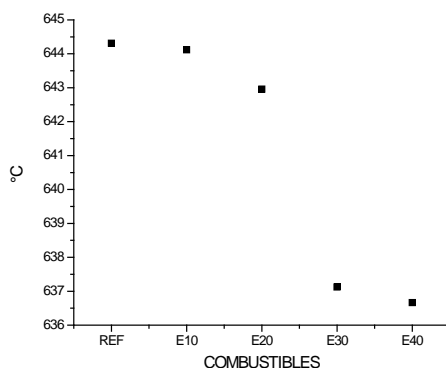


Figura 5. Temperatura de los gases de escape

En esta figura se puede observar que al incrementar el contenido de etanol en la mezcla, disminuye considerablemente la temperatura de escape, siendo menor para el combustible E40 (1.2% menos que la gasolina de referencia). Teóricamente, en condiciones estequiométricas es donde se alcanzan las temperaturas mayores de escape y por lo tanto, las emisiones de NO_x deberían de ser máximas.

En la figura 3, se observa que la máxima emisión de NO_x ocurre en un valor de $\lambda=1.05$, es decir un 5% rico. Algunos autores reportan que la máxima emisión de NO_x ocurre en valores de λ entre 1.1 y 1.2; aunque reportan que la variación de la emisión de NO_x únicamente es visible cuando se utiliza combustible E85, mientras que en concentraciones de etanol más bajas, el comportamiento es muy similar al de un combustible de referencia; sin embargo, otros autores reportan que existe un incremento del 8% en la emisión de NO_x para el combustible E15 en comparación con un combustible de referencia, notando un incremento en la temperatura de escape en un 4.3% aproximadamente [12,13,14].

Por otra parte, la emisión de los HC de la figura 4 muestra que el combustible de referencia tiene la mayor emisión en comparación con los combustibles que contienen etanol. La generación de hidrocarburos no quemados teóricamente es máxima para condiciones de mezclas ricas, ya que existe exceso de combustible disponible para quemar, siendo insuficiente el oxígeno y por lo tanto ocurre una mala combustión expulsando parte de los hidrocarburos del combustible al medio ambiente. Teóricamente, entre el 1-1.5% del combustible total es expulsado al medio ambiente en forma de HC.

De la tabla 4 se observa que la mezcla E40 tiene la mayor reducción en la emisión de HC (10%), debido a lo anteriormente explicado, ya que se tiene una mayor cantidad de oxígeno disponible para su reacción con el combustible, emitiendo una menor cantidad de hidrocarburos sin quemar hacia el medio ambiente.

4.2 Potencia indicada

La figura 6 muestra el resultado de la evaluación de la potencia indicada en los combustibles utilizados para este trabajo.

Como se puede observar en la figura 6, la potencia indicada es prácticamente similar para todos los combustibles probados, siendo menor en condiciones de mezclas pobres ($\lambda=1.1$), esto debido a que en este punto, la mezcla contiene un 10% más de aire y por lo tanto el aporte calorífico es menor, lo que ocasiona una caída de la potencia en un 12% aproximadamente con respecto a las mezclas en condiciones ricas ($\lambda=0.9$).

La potencia indicada fue ligeramente menor para todas las mezclas, en un 1.3% aproximadamente, donde la mayor pérdida se presentó con el combustible E20 (1.54%).

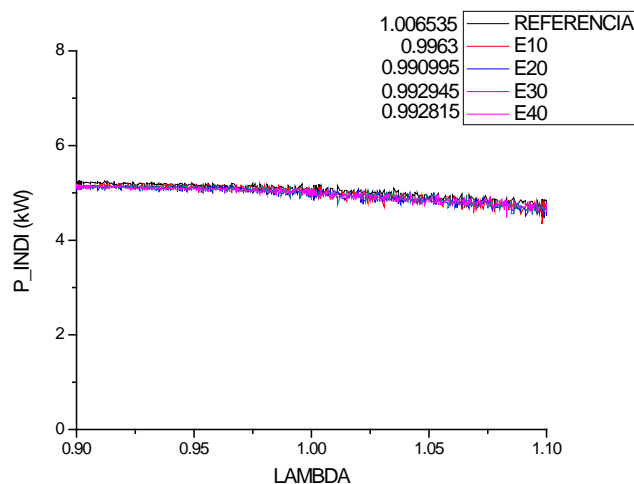


Figura 6. Potencia indicada

El resultado de que las pérdidas de potencia con respecto a la gasolina de referencia sean mínimas es que se tiene un control electrónico en el pulso de inyección, logrando que el motor opere en valores estequiométricos, por lo tanto, la exigencia de combustible será mayor para mezclas con altos contenidos de etanol, obteniendo prácticamente la misma potencia de salida.

4.3 Consumo de combustible

En la figura 7 se muestra el consumo específico de combustible (consumo másico de combustible dividido entre la potencia indicada)

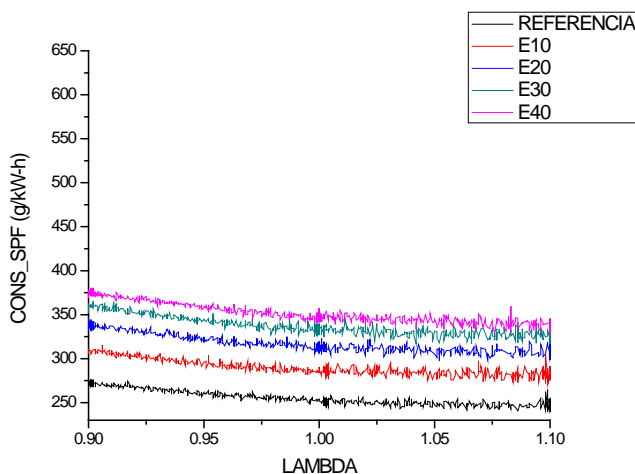


Figura 7. Consumo específico de combustible

En esta figura se puede ver claramente que existe un incremento considerable en el consumo específico de combustible conforme se incrementa el contenido de etanol en las mezclas.

E40 presenta el mayor consumo en comparación con la gasolina de referencia (37.5%), debido principalmente a la disminución del poder calorífico por la adición de etanol. Teóricamente, si a un motor se le suministra un combustible con menor poder calorífico, tendería a aumentar el consumo para proporcionar la misma potencia demandada, por lo que si el poder calorífico del etanol es 29.7 MJ/kg y el de la gasolina 42.54 MJ/kg, el motor necesitaría consumir 43.3% más de etanol para producir la misma potencia que la gasolina de referencia.

Se puede apreciar también que existe una tendencia de disminución en el consumo del combustible para todos los casos al empobrecerse la mezcla, debido a que en ese punto no se le demanda más potencia al motor y el consumo tiende a disminuir. En condiciones de exceso de aire ($\lambda = 1.1$), el consumo disminuye un 14% aproximadamente para todas las mezclas en comparación de condiciones de exceso de combustible ($\lambda = 0.9$), mientras que en el punto estequiométrico ($\lambda=1$), existe una disminución entre un 7- 8%.

Para mantener el punto de operación fijo en un valor de λ de referencia (rico, estequiométrico y pobre), se tuvo que ajustar el pulso de inyección aumentando el tiempo de apertura, ya que al añadir etanol la mezcla tiende a empobrecerse, existiendo exceso de aire, por lo tanto se aumentó la duración del pulso de inyección para obtener las condiciones deseadas de λ en cada mezcla.

E40 fue la mezcla que mayor ajuste del pulso de inyección se le tuvo que realizar para obtener las mismas condiciones del punto de operación ($\lambda=0.9$, 1 y 1.1). Se incrementó la duración de apertura del inyector de 3290 μs para condiciones estequiométricas a 3944 μs (20.4% más), lo que significa que el motor necesitó mayor inyección de combustible para mantenerse en el mismo punto de operación, debido al efecto de empobrecimiento producido por la mezcla E40.

Algunos autores reportan que utilizando mezclas de gasolina con etanol en condiciones similares de operación a las del presente estudio, se incrementó el consumo específico del combustible en hasta 50% [12,14].

4. Conclusiones

En resumen, las conclusiones más importantes que se pueden mencionar de este trabajo son las siguientes:

La adición de etanol provoca un efecto de empobrecimiento en los combustibles, producto del mayor contenido de oxígeno, siendo mayor conforme se incrementa su volumen presente en la mezcla.

En condiciones controladas de velocidad y ajuste de λ , existe una reducción marginal en la emisión los gases de escape para todas las mezclas. Se disminuye considerablemente la temperatura de los gases de escape, lo que significa una reducción en la emisión de los NOx, así como un efecto de enfriamiento en el cilindro debido al mayor calor latente de vaporización del etanol.

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

Utilizando mezclas gasolina-etanol anhidro, existe una disminución de la potencia indicada menor al 2% para todos los casos, donde no se observa un comportamiento distinto al producido por el uso de gasolina comercial.

Existe un mayor consumo específico de combustible proporcional al aumento del contenido de etanol en las mezclas de hasta 37% debido al menor poder calorífico del etanol, por lo que el motor tiende a demandar mayor cantidad de combustible para producir la misma potencia de salida que el combustible de referencia.

No se presentaron problemas de inyección al incrementar las proporciones de etanol, debido al ajuste electrónico en la duración del pulso, por lo que se pudo mantener constante el punto de operación de lambda en todas las mezclas probadas.

5. Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Laboratorio de Combustión del Instituto Mexicano del Petróleo, sin el cual la elaboración de este trabajo de investigación no hubiera sido posible concretarse.

6. Referencias

- [1]. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO). Appropriateness of a 350 million litre biofuels target. Canberra, Australia. 2003
- [2]. Clean Fuels Development Coalition (CFDC). The ethanol fact book, a compilation of information about fuel ethanol. United States of America. 2007.
- [3]. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Effects of intermediate ethanol blends on legacy vehicles and small non-road engines, report 1. U.S Department of Energy. 2009.
- [4]. Seminario internacional en biocombustibles y combustibles alternos. Impactos del alcohol carburante, experiencia brasilera. Bogotá, Colombia. 2006.
- [5]. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. México D.F. 2008.
- [6]. Secretaría de Energía (SENER). Programa de introducción de bioenergéticos. México D.F. 2008.
- [7]. Carlos Montoya Contreras. Fundamentos y situación actual del uso de etanol anhidro como oxigenante de las gasolinas en Costa Rica. San José, Costa Rica. 2006.
- [8]. Edwin Espinosa Simpson. Adquisición de bienes consistentes en etanol anhidro para oxigenar gasolinas en la zona metropolitana de Guadalajara Jalisco. México, D.F. 2010.
- [9]. Bridge Analyzers Inc. Lambda calculation - the bretttschneider equation, general principles and methods. 2003.
- [10]. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. Mc Graw-Hill. Nueva York. 1989.
- [11]. I. Schifter, L. Díaz, R. Rodríguez, J.P. Gómez, U. González. Combustion and emissions behavior for ethanol-gasoline blends in a single cylinder engine. FUEL. 2011.

XIII Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del Hidrógeno Aguascalientes, México, 2013

- [12]. Cheolwoong Park, Young Choi, Changgi Kim, Seungmook Oh, Gihun Lim, Yasuo Moriyoshi. Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas. FUEL. 2010.
- [13]. K. Varde, A. Jones, A. Knutsen, D. Mertz, P. Yu. Exhaust emissions and energy release rates from a controlled spark ignition engine using ethanol blends. Automobile Engineering. 2006.
- [14]. Rodrigo C. Costa, José R. Sodré. Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions. FUEL. 2009.