



Investigación experimental de la prestaciones de un motor mono-cilíndrico usando combustible diesel emulsionado

Experimental investigation of the single cylinder engine performance using emulsified diesel fuel

Eliezer Ahmed- Melo Espinosa
Ramón - Piloto Rodriguez
Leonardo - Goyos Perez

Noel - Ferrer Frontela
Michel - Errasti Cabrera

Recibido: Julio del 2012

Aprobado: Octubre del 2012

Resumen/ Abstract

En esta investigación se realiza un análisis de las prestaciones y emisiones de un motor Petter mono-cilíndrico de inyección directa al usar como combustible una emulsión de 5% de agua, 2% de surfactante y combustible diesel. Los resultados obtenidos con la emulsión muestran un ligero incremento en el torque y la potencia efectiva, así como en el consumo específico de combustible y el retardo de la ignición. Respecto a las emisiones de gases contaminantes, los hidrocarburos no quemados (HC) y el monóxido de carbono (CO) para la emulsión aumentaron en comparación con los resultados obtenidos para el combustible diesel. En ambos casos, los aumentos son una consecuencia de la disminución de las temperaturas en el interior de la cámara de combustión, los aumentos en el retardo de la ignición y al enfriamiento de la llama.

Palabras clave: combustible diesel, emulsión, motor, prestaciones, emisiones.

In this investigation an analysis based on the performances and emission of a Petter single cylinder direct injection diesel engine when using an emulsion of 5% of water, 2% of surfactant and diesel fuel as fuel is carried out. The result obtained with the emulsion tested shown slight increase in effective torque and power output, but also increases in brake specific fuel consumption and ignition delay. Concerning the exhausts, increases in hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO) emissions for emulsion were obtained. In both cases the increases are due to the effect of lower temperatures inside the combustion chamber, longer ignition delays and quenching of the flame.

Keywords: diesel fuel, emulsion, engine, performance, emissions"

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los problemas medioambientales y los precios cada vez más elevados de los combustibles fósiles en el mercado internacional, condicionan la búsqueda de alternativas para paliar esta situación. Muchos gobiernos destinan importantes recursos y flexibilizan sus decisiones políticas en torno a estos temas. Estudios relacionados con la disponibilidad actual de los combustible fósiles demuestran la capacidad limitada de estos recursos y por tanto la vulnerabilidad a la que están sometidos todos los países dependientes energéticamente de este. Los motores de combustión interna diesel son una de las fuentes responsables de las emisiones de gases contaminantes a la atmosfera. La combustión del combustible diesel contribuye en gran

medida a la contaminación ambiental debido a los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y emisiones de partículas a la atmósfera [1]. La necesidad de reducir las emisiones de gases y la búsqueda de un mejor rendimiento del motor han aumentado el interés en combustibles alternativos o sistemas de emulsión / microemulsión, tales como: las mezclas de diesel con biodiesel y aceites vegetales, microemulsiones basadas en diesel, mezclas de gas naturales / diesel y emulsiones de agua en aceite [1].

Existe un marcado interés en el contenido de agua en los combustibles diesel. La cantidad de agua añadida a estos sistemas coloidales esta normalmente en el intervalo de 5-15 % y la formulación puede ser o bien una emulsión o una microemulsión. El principal incentivo para la introducción de agua en un combustible diesel es reducir la cantidad de carbono en los gases de escape [2]. La reducción en los niveles de carbono obtenidos cuando se añade agua al combustible se cree que es debido al fenómeno llamado microexplosion, causado por la alta presión de vapor de agua, que mejoran la eficiencia del proceso de combustión [3]. Sin embargo, el concepto microexplosion ha sido cuestionado [4].

La presencia de agua también ocasiona una reducción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) en los gases de escape [3, 5-7]. Se ha reportado que el 15% de agua en diesel puede dar una reducción en la emisión de NO_x hasta 35% en condiciones normales [3, 5]. Alahmer [3] reportó en baja cantidad de agua añadida (alrededor de 5 %) un aumento en el cantidad emitida de NO_x. Más allá de esto, con el aumento del porcentaje de agua en la emulsión, la cantidad de NO_x emitida disminuye. La emulsión y microemulsión que contiene 10% de agua puede dar una reducción muy importante en la materia de partículas comparado con el combustible diesel regular durante la combustión en un motor de diesel de inyección directa, pero no sobre las emisiones de los gases de escape [2]. Las emisiones de CO aumentan cuando se añade agua al combustible debido a una reducción en la temperatura en el cilindro, lo que provoca una disminución en la eficiencia de la combustión [8].

Fueron encontradas emulsiones que dan menores cantidades de hidrocarburos aromáticos policíclico en la llama, así como bajas emisiones [3]. Particularmente, una disminución de pireno y fluoreno, se observó cuando el motor fue alimentado con la emulsión. Las menores cantidades de hidrocarburos aromáticos policíclico formadas son probablemente una de las razones de la menor cantidad de carbón obtenido con la emulsión, debido a que estos hidrocarburos puede ser visto como precursores para las partículas de carbón [5]. Sin embargo, el nivel total de HC es mayor con la emulsión, debido a que el agua está estrechamente en contacto con las partículas de diesel y sofoca el proceso de combustión [8]. La mayoría de los métodos comunes para la introducción de agua en los motores diesel son: inyección de agua en el cilindro usando un inyector por separado [5, 9], pulverizando agua a la entrada del aire [10], y las emulsiones agua-combustible. Varios combustibles emulsionados están disponibles comercialmente y son comercializados. El contenido de agua en estos combustible está en rangos entre 10-20 % [3].

Lif [11] reportó la obtención de una emulsión con 88% de combustible diesel, 2% surfactante y 10% de agua usando una combinación de sorbitanmonooleato y un etoxilato de alcohol hidrofóbico como surfactante y estabilizador [2]. Las microemulsiones de agua y combustible diesel han sido formuladas por el uso de diferentes combinaciones de surfactantes, tales como ácidos grasos, sorbitanmonooleato y el alcohol etoxilato [5, 12-13]. Ghannam [14] estabiliza la emulsión utilizando 0,2% de un surfactante no iónico, que alcanza hasta 50% de agua en el sistema. Alahmer [3] estabilizada la emulsión usando 2% de surfactante Tween 20 añadiendo agua entre 5-30 %. El nonil fenol es un surfactante ampliamente utilizado en muchas aplicaciones. Surfactantes relacionados con nonil fenol, pero con grupos adicionales de átomos llamados unidades de óxido de etileno se llaman nonil fenol etoxilados [15]. El uso de algún tipo de óxidos de etileno en la estructura química surfactante para la obtención de emulsiones agua en diesel es reportada [11, 16]. El nonil fenol y sus compuestos con óxido de etileno son surfactantes no iónicos.

En cuanto a las prestaciones de un motor usando emulsiones, existen reportes de aumento del torque con el incremento del contenido de agua con respecto a todo el rango de velocidades del motor y una disminución del consumo específico de combustible (g_e) con el aumento de la velocidad del motor hasta alrededor de 2100 rpm después que el g_e decrece cuando el contenido de agua se incrementa en el rango de velocidades investigadas [11]. Selim [17] probó emulsiones de agua en diesel hasta un 8% de agua, observando que la adición de agua reduce las temperaturas del metal y los flujos de calor que cruzan la pared y la cabeza del cilindro. Alahmer

[3]Éreportó que con el aumento de la cantidad de agua, el torque y potencia de salida disminuyen, mientras que el g_e se incrementa. Los incrementos en g_e reportado está en concordancia con otros reportes [18]É[9], pero también la reducción de g_e es reportada en [20].Emulsiones con un 13 % de agua y 2 % de surfactante en un motor diesel de 4 cilindros, inyección directa de hasta 260 Nm y 2.400 rpm fueron probados por Ghoje [18]. Una elevada eficiencia térmica y g_e en comparación con el combustible diesel fueron observadas.

El uso de un motor diesel Petter mono-cilíndrico de inyección directa usando emulsiones de agua en diesel es reportado en [21]. Para estabilizar las emulsiones un 2% por volumen de mezcla surfactante que consta de Span 80 y Tween 80 fue usada con el fin de estabilizar agua entre 0-20 %. Como el porcentaje de agua en la emulsión aumenta hasta un 20%, el torque, la potencia de salida y la eficiencia térmica se incrementó. Aumentos importantes en el retardo de la ignición en comparación con el combustible diesel son reportados cuando se utiliza la emulsión [12]. Las diferencias reportadas se encuentran entre 4-7 grados ángulos de giro dependiendo de la potencia al freno motor. Sin embargo, una disminución en el retardo de la ignición es también reportada [22].

En Cuba, los estudios vinculados a las emulsiones se han limitado a algunas aplicaciones en la industria Farmacéutica, Agroalimentaria, Pinturas y Asfáltica. Sin embargo, existen intentos aislados para la obtención de emulsiones agua diesel a partir de surfactantes nacionales y extranjeros, así como el uso de estas emulsiones en los motores diesel. Un elevado porcentaje del parque automotor diesel presenta: sistema de inyección directa de combustible, cuyas presiones de inyección son bajas. Los niveles de contaminación de estos motores debido a su año de fabricación y servicio, son elevados, convirtiéndolos en una fuente potencial de contaminación.

Teniendo en cuenta lo anterior explicado, es recomendable buscar soluciones que mejoren el proceso de combustión, las prestaciones y disminuyan las emisiones de gases contaminantes del motor. La introducción del agua en los motores diesel mediante cualquiera de las tres variantes antes mencionadas, pudiera constituir una buena alternativa para lograr estos resultados. Sin embargo, entre los métodos comunes para la introducción de agua en los motores diesel, es el uso de la emulsión agua-combustible la técnica más eficaz para la reducción de NOx y partículas en los motores diesel de inyección directa [5, 8, 12]. Además según [1]Éreduce las emisiones de CO y HC. Existen reportes [11]É[2, 21]Éque demuestran que el uso de emulsiones mejora las prestaciones del motor. Es por ello que se hace necesario, en las condiciones de Cuba, el estudio de los combustibles emulsionados.

Por los motivos antes expuestos es que el objetivo fundamental de esta investigación consiste en evaluar las prestaciones de un motor diesel Petter mono-cilíndrico de inyección directa, al usar combustible diesel emulsionado al 5 %. Los principales parámetros evaluados son el torque y potencia efectiva, el consumo específico de combustible (g_e), retardo de la ignición, así como las emisiones de HC y CO.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como combustibles para las pruebas en el motor se emplearon dos muestras fundamentalmente: una muestra de combustible diesel regular puro y la otra de combustible emulsionado. La emulsión preparada contiene un 5 % de agua, 2 % de surfactante y combustible diesel. El surfactante usado fue una mezcla de nonil fenol a 38,45% y óxido de etileno a 61,55%. El sistema coloidal se preparó utilizando un equipo ultrasónico Soniprep-120 de agitación con una intensidad de 10 Hz durante 10 minutos. Esta técnica se seleccionó debido a que la técnica de vibración ultrasónica se considera una elección excelente para preparar eficazmente partículas diminutas en una solución a alta velocidad [19]. Las pruebas de estabilidad para la emulsión se llevó a cabo manteniendo la misma en tubos de ensayo de vidrio con un tapón durante un mes a una temperatura ambiente de 28-30 C°. La densidad de los componentes aislados de la emulsión (el combustible diesel y el surfactante) y la emulsión fueron evaluadas utilizando un picnómetro estándar de 25 ml. La viscosidad dinámica de los componentes y emulsión se evaluaron utilizando un viscosímetro RION VT 03-F.

El motor utilizado en las pruebas en banco de motores fue un motor diesel Petter mono-cilíndrico de inyección directa. Las características principales del motor se dan en la tabla 1. Los

experimentos se llevaron a cabo a 100 % de cremallera abierta, bajo condiciones estable a altas cargas y diferentes velocidades del motor entre 1300-1700 rpm.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas del Motor Petter.	
Elemento	Valor
Cantidad de cilindros	1
Cilindrada	0,659 L
Carrera	0,110 m
Diámetro	0,0873 m
Relación de compresión	16.5:1
Sincronización de la inyección de combustible	24° antes TDC (hasta 1650 rpm)
	28° antes TDC (1651-2000 rpm)
Tipo de enfriamiento	Enfriado por agua

El diagrama esquemático del montaje experimental utilizado para los ensayos del motor se muestra en la figura 1. Con el objetivo de medir la presión en la cámara de combustión se instaló en el cilindro un sensor piezoeléctrico Kistler de presión (tipo 6067C). Una plataforma acondicionadora de señal Kistler con un amplificador piezoeléctrico (tipo 5064) también fue instalado. Una tarjeta de adquisición de datos de Addi-Data APCI-3016-16 fue utilizada para el registro de las mediciones de la presión. Además para medir los ángulos de giro del cigüeñal se utilizó un codificador mecánico acoplado al cigüeñal del motor. Este codificador mecánico se conectó a un codificador electrónico que convierte el pulso mecánico en una señal eléctrica, proporcional al valor de los ángulos de giro. El multiplicador de pulso recibe la señal eléctrica y la corrige antes de ser registrada por la tarjeta de adquisición de datos. Este sistema fue utilizado para proporcionar la correlación exacta entre la señal de medición de presión y la posición del ángulo del cigüeñal ($^{\circ}ca$) con una resolución de $1^{\circ}ca$; lo cual define un error en la determinación del tiempo de retardo de la ignición entre 0,09-0,14 ms, dependiendo de la frecuencia de rotación del cigüeñal. El equipamiento utilizado para medir las emisiones de HC y CO fue un analizador de emisiones Testo 350 XL con una resolución de 10 ppm. El rango de mediciones para HC y CO según el fabricante es para HC: de 0-40000 ppm, y para CO: de 0-10000 ppm.

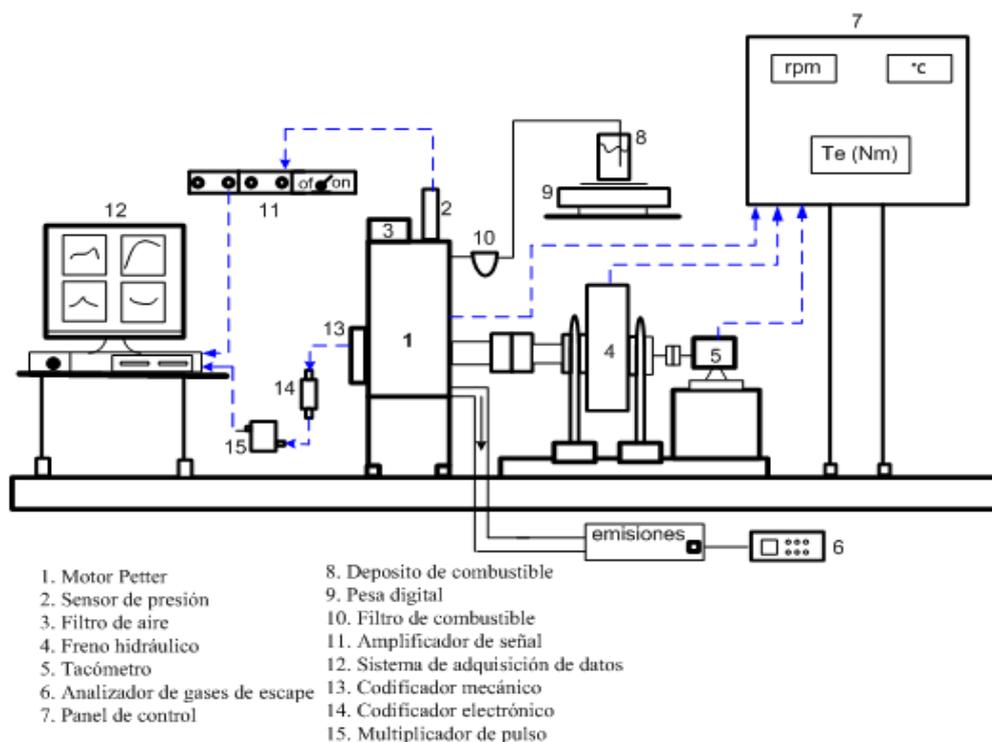


Fig.1. Diagrama esquemático del motor y su instrumentación.

En el panel de control ubicado en la sala se toman directamente las lecturas de temperatura ($^{\circ}C$),

torque efectivo (T_e) y revoluciones por minuto del motor (rpm). Acoplado al panel de control se encuentra una celda de carga colocada en un extremo del freno hidráulico. El freno hidráulico utilizado es del tipo Froude. El consumo específico de combustible se determinó a partir del gasto de combustible horario (Gh), para lo cual se utilizó balanza digital Sartorius con una precisión de 0,1g. La potencia efectiva (N_e) fue estimada a partir del torque efectivo (T_e), según [23]. Durante la realización de los experimentos en el banco de pruebas de motores para la medición de los parámetros medioambientales se usó una estación meteorológica portátil TFA, modelo 35.1078.10.IT. Las condiciones ambientales experimentales de referencia se comportaron como se muestra a continuación: La temperatura ambiente se mantuvo entre 28°C y 29°C, la presión atmosférica entre 1001 hPa y 1004 hPa, y la humedad relativa alrededor del 70%. Una vez verificado estos parámetros, el motor fue encendido y llevado a un período de asentamiento con el objetivo lograr un régimen térmico óptimo.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La emulsión preparada para ser evaluada en el motor contiene un 5 % de agua, 2 % de surfactante y combustible diesel. El surfactante usado fue una mezcla de nonil fenol a 38,45% y óxido de etileno a 61,55%. El uso de este surfactante dio buen resultado en la estabilización de la emulsión, además no fue necesario hacer uso de algún estabilizador extra. Las mediciones de densidad y viscosidad del combustible diesel, el surfactante y la emulsión preparada se muestran en la tabla 2. Como se puede observar un aumento en la cantidad de surfactante en el sistema da lugar a un combustible de mayor viscosidad.

Tabla 2. Resultados de la densidad y viscosidad.		
Muestra	Propiedades físicas	
	densidad (g/cm^3)	viscosidad ($mPa \cdot s$)
Diesel	0.84	5
Surfactante	0.95	220
Emulsión	0.85	11

Luego de realizar los experimentos en el banco de pruebas de motores se obtuvo como resultado las prestaciones del motor Petter para los combustibles ensayados (Diesel y Emulsión) a 1300, 1400, 1500, 1600 y 1700 rpm . Los resultados del torque efectivo (T_e) y una comparación entre el combustible diesel y la emulsión se muestran en la figura 2. Un ligero aumento del torque efectivo (<4%) cuando se utiliza la emulsión se observa en toda la gama de velocidades del motor. Cuando la carga es quemada en el interior del cilindro, el agua se vuelve vapor con las altas presiones, y esto puede ser la razón principal del aumento del torque. Otra razón es que la baja tensión interfacial para la interfase de aceite-agua conduce al fenómeno microexplosión. La misma tendencia en un diagrama del torque contra rpm cuando se utiliza la emulsión es reportado en [11, 21]. Alahmer [3], reportó una disminución del torque cuando el contenido de agua se incrementa, además reportó valores de torque máximo para una emulsión al 5%. Un ligero máximo se observa en la figura 2 ,alrededor de las 1400 rpm . A bajas velocidades el torque aumenta hasta llegar su máximo valor, a medida que la velocidad del motor aumenta. Después de este punto, la disminución del torque es debido a una disminución en el rendimiento volumétrico.

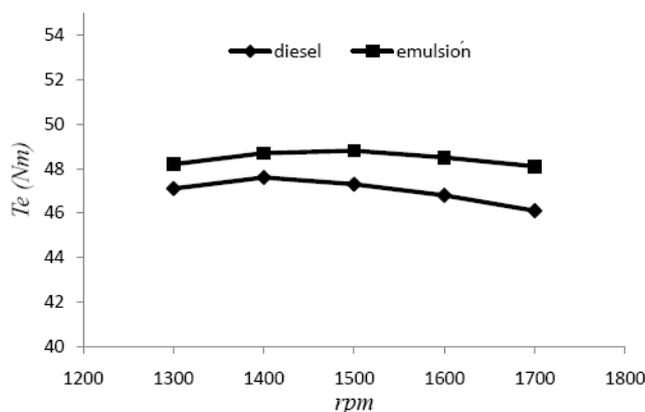


Fig. 2. Comportamiento del torque efectivo

El comportamiento de la potencia efectiva (P_e) se muestra en la figura 3. Un ligero aumento en la potencia cuando la emulsión es utilizada fue observado, como una consecuencia del incremento del torque efectivo observado previamente. Los experimentos desarrollados a 1700 rpm muestran diferencias significativas (4,6%) entre los combustibles objeto de estudio. La potencia máxima cuando el motor es alimentado con el 5% de agua en la emulsión es reportado, pero un aumento en el contenido de agua puede conducir a una disminución de la potencia efectiva [3].

También, ligeros aumentos en la potencia cuando se añade agua usando un motor de Petter es reportado en [21].

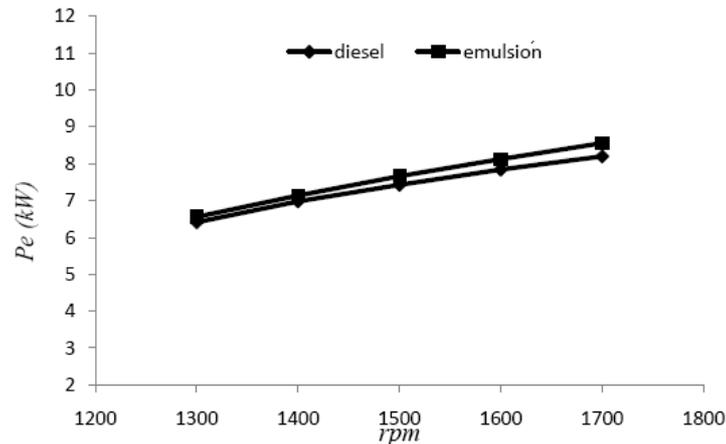


Fig. 3. Comportamiento de la potencia efectiva.

Consultando los valores del consumo específico de combustible en la figura 4, se puede apreciar un aumento en todos los puntos experimentales cuando la emulsión es usada, excluyendo el experimento desarrollado a 1400 rpm. La misma tendencia general es referida en los reportes [12, 21]. Un resultado opuesto es reportado en [11], el mismo se atribuye a la influencia del agua en el proceso de atomización, pero este comportamiento no fue observado en este trabajo. La razón principal para el aumento observado en el consumo específico de combustible es porque cuando el porcentaje de agua se incrementa, una cantidad importante de combustible diesel es desplazado por el agua en el combustible. Esto significa que menos combustible diesel está contenido en el sistema, aumentando el consumo específico de combustible. Un consumo mínimo, aunque leve, es observado alrededor de las 1400 rpm. Además, el consumo de combustible disminuye con la velocidad de motor hasta que llega a 1400 rpm. Más allá de todo, estos aumentos son debido a que a altas velocidades la potencia del rozamiento es superior resultando en un aumento más lento en la potencia de salida que en el consumo de combustible y por consiguiente aumenta el consumo específico de combustible (g_e).

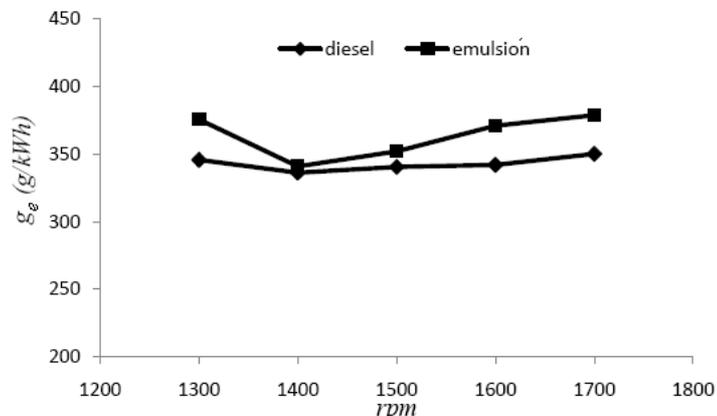


Fig. 4. Comportamiento del consumo específico de combustible.

Los resultados de las mediciones de presión en el cilindro permiten determinar el período de retardo de la ignición por la primera derivada de la presión en el cilindro. Un retraso del inicio de

combustión cuando la emulsión es usada fue observado para cada estado del motor. El comportamiento observado se muestra en la figura 5, para las pruebas realizadas a 1700 rpm. La comparación de los resultados de retardo de la ignición a diferentes velocidades del motor se muestra en la figura 6. Los resultados muestran aumentos del retardo de la ignición (en ángulos de giro del cigüeñal) en comparación con el combustible diesel cuando la emulsión es usada, estos resultados se corresponden con los obtenidos en [3, 8, 10]. Esto puede ser debido a que el uso de la emulsión tiende a bajar la temperatura de combustión y temperaturas más bajas pueden conducir a aumentar el retardo de la ignición. Este período más largo retardo observado (2-5 °ca) es más pequeño que las diferencias encontradas en las pruebas reportadas bajo diferentes condiciones experimentales y usando diferentes surfactantes [8]. El análisis del retardo de la ignición fue desarrollado basado en los resultados de la primera derivada de la presión en el interior del cilindro contra los ángulos de giro del cigüeñal en cada condición probado en el motor.

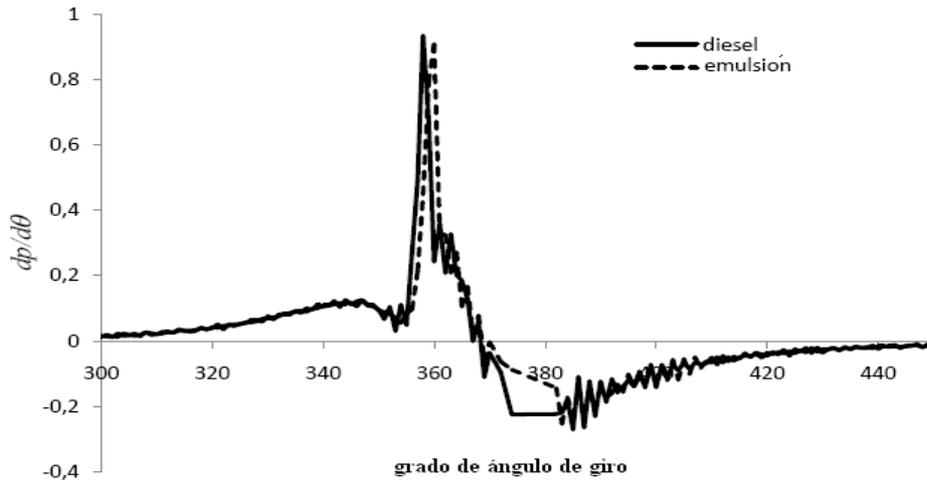


Fig. 5. Comportamiento de la $dp/d\theta$ para el retardo de la ignición a 1700 rpm.

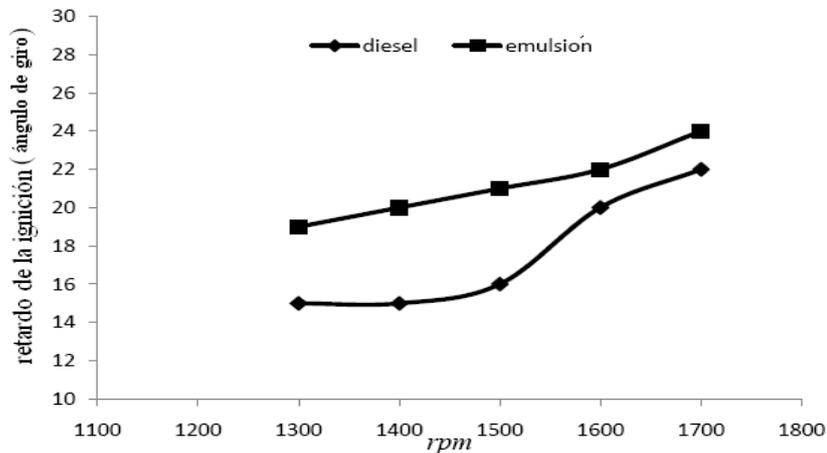


Fig. 6. Comportamiento del retardo de la ignición.

Las emisiones de HC se muestran figura 8. Importantes incrementos en las emisiones de HC son observadas (entre 4-18%) para todas las condiciones experimentales a las que fue sometido el motor. Este resultado también es reportado por Lif en [2], y Subramanian en [8], sin embargo otros investigadores [18, 24], reportan resultados totalmente opuestos.

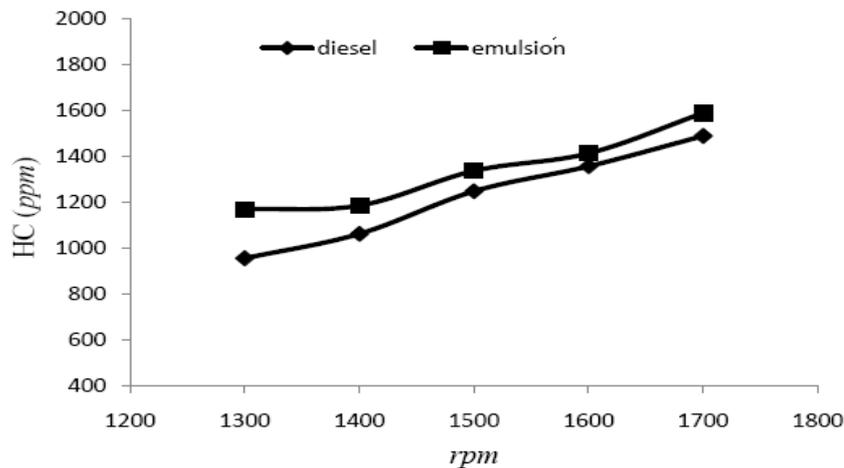


Fig.8. Comportamiento de las emisiones de HC.

Cuando la emulsión es usada, una disminución de la temperatura en el cilindro debería esperarse causada por una combustión retardada como el largo periodo de retardo de la ignición muestra. Esta disminución en la temperatura en conexión con la extinción de la llama por la evaporación del agua en el combustible conduce a mayores emisiones de HC. Bajo condiciones donde el retardo de la ignición es mayor, la inyección de combustible durante el intervalo de tiempo de retardo del encendido, constituye una fuente importante de emisiones de HC. Las emisiones de CO de la emulsión y el combustible diesel son mostrados en la figura. 9. Las emisiones de CO de la emulsión es mayor que las obtenidas para el combustible diesel para cada condición experimental a la que fue sometido el motor. Las menores emisiones de CO se observaron a las rpm más altas del motor. Este resultado también es reportado por Lif [2], Subramanian [8], y Cherng-Yuan [9], sin embargo otros investigadores como Nadeem [13], reportaron resultados opuesto a los obtenidos en esta investigación.

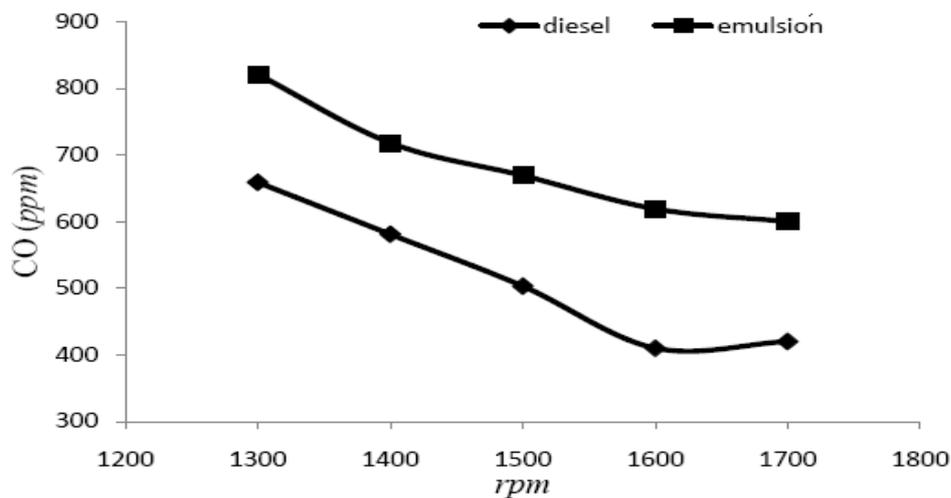


Fig. 9. Comportamiento de las emisiones de CO.

Los aumentos en las emisiones de CO observada son una consecuencia de la interacción de varios fenómenos estrechamente relacionados. El ligero aumento en la cantidad de oxígeno en el combustible emulsionado tiene influencia en el proceso de combustión. Además, el efecto del ligero aumento en el retardo de la ignición observado para la emulsión en comparación con el combustible diesel es también uno de los factores que influyen en el aumento de CO.

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos para los combustibles objeto de estudio mostraron que con el uso de la emulsión se logra un ligero aumento en el torque efectivo y la potencia efectiva.

- Al usar la emulsión como combustible el consumo específico de combustible es mayor que al usar combustible diesel.
- Se observa que como tendencia la emulsión muestran aumentos del retardo de la ignición (2-5°ca) en comparación con el combustible diesel.
- Los incrementos de las emisiones de HC y CO observados cuando fue usada la emulsión es una consecuencia de las bajas temperaturas en el interior de la cámara de combustión, los retardos en la ignición y el enfriamiento de la llama.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Cooperación para el Desarrollo de la Universidad del Consejo Flamenco Interuniversitario (VLIR), por la financiación de un programa de iniciativas propias, con cuyo apoyo gran parte de las instalaciones utilizadas en este trabajo fueron adquiridos bajo un proyecto titulado "célula de conocimiento sobre los biocombustibles (provenientes de cultivos no comestibles y productos residuales) para uso en motores de combustión interna".

REFERENCIAS

- [1]. DANTAS, A., *et al.*, —Alternative fuels composed by blends of nonionic surfactant with diesel and water: engine performance and emissions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2011, vol. 28, n. 3, p. 521 – 531. ISSN 0104-6632.
- [2]. LIF, A., *et al.*, "Fuel emulsions and microemulsions based on Fischer-Tropsh diesel". *Journal Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010, vol. 354, n. 1-3, p. 91-98. ISSN 0927-7757.
- [3]. ALAHMER, A., *et al.*, "Engine performance using emulsified diesel fuel". *Journal Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, n. 8, p. 1708-1713. ISSN 0196-8904.
- [4]. FU, W., *et al.*, "There is no micro-explosion in the diesel engines fueled with emulsified fuel". *Journal Chinese Science Bulletin*, 2006, vol. 51, n. 10, p. 1261-1265. ISSN: 1001-6538.
- [5]. LIF, A., *et al.*, "Reduction of soot emissions from a direct injection diesel engine using water-in-diesel emulsion and microemulsion fuels". *Journal SAE Technical Paper*, 2007, vol. 2007-01-1076, n. 1. p. 1-10. ISSN: 0148-7191. Consultado el: 28 de agosto de 2012. Disponible en: <http://papers.sae.org/2007-01-1076>.
- [6]. ARMAS, O., *et al.*, "Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel". *Journal Fuel*, 2005, vol. 84, n. 7- 8, p. 1011-1018. ISSN 0016-2361.
- [7]. NAZHA, M., *et al.*, "Soot and gaseous species formation in a water-in-liquid fuel emulsion spray. A mathematical approach". *Journal Energy Conversion & Management*, 1998, vol. 39, n.16-18, p. 1981-1989. ISSN 0196-8904.
- [8]. SUBRAMANIAN, K., "A comparison of water–diesel emulsion and timed injection of water into the intake manifold of a diesel engine for simultaneous control of NO and smoke emissions". *Journal Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, n. 2, p. 849-857. ISSN 0196-8904.
- [9]. LIN, CH., CHEN, L., "Engine performance and emission characteristics of three-phase diesel emulsions prepared by an ultrasonic emulsification method". *Journal Fuel*, 2006, vol. 85, n. 5-6, p. 593-600. ISSN 0016-2361.
- [10]. BEDFORD, F., RUTLAND, C., "Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion". *Journal SAE Technical Paper*, 2000, vol. 2000-01-2938, n. 1, p. 1-10 .ISSN 0148-7191. Consultado el: 28 de agosto de 2012. Disponible en: <http://papers.sae.org/2000-01-2938/>
- [11]. LIF, A., HOLMBERG, K., "Water-in-diesel emulsions and related systems". *Journal Advances in Colloid and Interface Science*, 2006, vol. 123-126, n. 1, p. 231-239. ISSN 0001-8686.
- [12]. LIN, CH., Wang, K., "The fuel properties of three-phase emulsions as an alternative fuel for diesel engines". *Journal Fuel*, 2003, vol. 82, n. 11, p. 1367-1375. ISSN 0016-2361.
- [13]. NADEEM, M., *et al.*, "Diesel engine performance and emission evaluation using emulsified fuels stabilized by conventional and gemini surfactants". *Journal Fuel*, 2006, vol. 85, n. 14-15, p. 2111-2119. ISSN 0016-2361.
- [14]. GHANNAM, M., SELIM, M., "Stability Behavior of Water-in-Diesel Fuel Emulsion". *Journal Petroleum Science and Technology*, 2009, vol. 27, n. 4, p. 396-411. ISSN 1091-6466.
- [15]. COX, C., "Nonyl Phenol and related chemicals". *Journal of Pesticide Reform*, 1996, vol.16, n.1, p. 15-20. ISSN 0893-357X.

- [16]. SALAGER, J., *et al.*, "Enhancing Solubilization in Microemulsions—State of the Art and Current Trends". Journal of Surfactants and Detergents, 2005, vol. 8, n. 1, p. 3-21. ISSN 1558-9293.
- [17]. SELIM, M., ELFEKY, S., "Effect of diesel/water emulsion on heat flow and thermal loading in a precombustion chamber diesel engine". Journal Applied Thermal Engineering, 2001, vol. 21, n. 15, p. 1565-1582. ISSN 1359-4311.
- [18]. GHOJEL, J., *et al.*, "Performance, emissions and heat release characteristics of direct injection diesel engine operating on diesel oil emulsion". Journal Applied Thermal Engineering, 2006, vol. 26, n. 17-18, p. 2132-2141. ISSN 1359-4311.
- [19]. KANNAN, G., ANAND, R., "Experimental investigation on diesel engine with diestrol-water micro emulsions". Journal Energy, 2011, vol. 36, n. 3, p. 1680-1687. ISSN 0360-5442.
- [20]. KANNAN, K., UDAYAKUMAR, M., "NOx and HC emission control using water emulsified diesel in single cylinder diesel engine". Journal ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2009, vol. 4, n. 8, p. 59-62. ISSN 1819-6608.
- [21]. ABU-ZAID, M., "Performance of single cylinder, direct injection Diesel engine using water fuel emulsions". Journal Energy Conversion and Management, 2004, vol. 45, n. 5, p. 697-705. ISSN 0196-8904.
- [22]. ALKHULAIFI, K., HAMDALLA, M., "Ignition Delay Correlation for a Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Automotive Diesel and Water Diesel Emulsion". Journal World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, vol. 6, n. 58, p. 905-917. ISSN 2010-3778. Consultado el: 28 de agosto de 2012.
Disponible en: <http://www.waset.org/journals/waset/v58/v58-179.pdf>
- [23]. MELO, E., *et al.*, "Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina". Revista Ingeniería Energética, 2012, vol. 33, n. 2, p. 94-102. ISSN 1815-5901.
- [24]. SAMEC, N., *et al.*, "Numerical and experimental study of water/oil emulsified fuel combustion in a diesel engine". Journal Fuel, 2002, vol. 81, n. 16, p. 2035-2044. ISSN 0016-2361.

AUTORES

Eliezer Ahmed Melo Espinosa

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: emelo@ceter.cujae.edu.cu

Ramón Piloto Rodríguez

Licenciado Químico, Doctor en Ciencias, Profesor Auxiliar, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: rpiloto@ceter.cujae.edu.cu

Leonardo Goyos Perez

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Tecnología de Construcción de Maquinarias (TCM). Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: goyos@tesla.cujae.edu.cu

Noel Ferrer Frontela

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: noel@ceter.cujae.edu.cu

Michel Errasti Cabrera

Ingeniero Mecánico, Profesor Instructor, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", CUJAE, La Habana, Cuba.

e-mail: merrasti@ceter.cujae.edu.cu