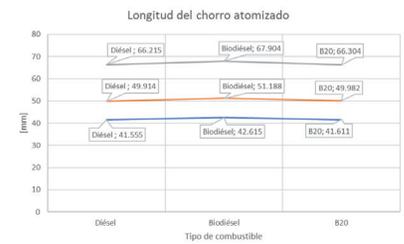


Requerimientos en el sistema de inyección de combustible para el uso de biodiésel



Requirements for the fuel injection system to use of biodiesel

Marcos Gutiérrez-Ojeda¹, Andrés Castillo-Reyes², Juan Iñiguez-Izquierdo² y Gorky Reyes-Campaña²

¹ Tablet School. General Maldonado y Belisario Quevedo. Latacunga (Ecuador)

² Universidad Internacional del Ecuador. Av. Simón Bolívar y Av. Jorge Fernández. Quito (Ecuador)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8656> | Recibido: 20/11/2017 • Evaluando: 02/10/2017 • Aceptado: 21/12/2017

ABSTRACT

Biodiesel, when used as an alternative fuel in its pure state or mixed with diesel, requires certain modifications of time and pressure of the fuel injection to the engine. In the present study, the properties and characteristics to fulfill by fuel injector nozzles when biodiesel is used as fuel, are determined. With the characterization results of neat diesel and neat biodiesel; as well as a blend of 20% biodiesel and 80% diesel, the main parameters of the fuel injection were calculated and simulated according to the power requirements of the engine. The purpose of the present investigation is to determine the fuel injection control parameters that allow equivalent use of diesel and biodiesel, without any change in its components. It was found that maintaining the diameter of the nozzle holes, the atomization characteristics of both type of fuels can be maintained by controlling the injection time and pressure; compensating in addition, differences in heat values, density and viscosity of biodiesel blends compared to neat diesel. Biodiesel is the alternative to pollution problems and sources of energy to operate internal combustion engines; however, to be established as a sustainable and immediately applicable solution, modifications to the engine must be at the level of fuel injection control, avoiding any kind of change or replacement of components.

Keywords: Biodiesel, Diesel, Nozzle, Flow rate, Density, Fuel injection.

combustibles controlando la duración y la presión de inyección de combustible; además de compensar las diferencias de poder calorífico, densidad y viscosidad de las mezclas combustibles de biodiésel en comparación con el diésel puro. El biodiésel es la alternativa a problemas de contaminación y de fuentes de energía para operar motores de combustión interna; sin embargo, para que se establezca como una solución sostenible e inmediatamente aplicable, las modificaciones en el motor deben ser a nivel del control de la inyección de combustible evitando todo tipo de cambio o sustitución de componentes.

Palabras clave: Biodiésel, Diésel, Tobera, Tasa de flujo, Densidad, Inyección de combustible.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de biodiésel en estado puro o mezclado en diferentes concentraciones, en motores con sistemas de inyección de combustible diseñados para funcionar con diésel, hace necesario que antes de hacer modificaciones o de diseñar nuevos componentes, se identifiquen primero los requerimientos que garanticen un resultado equiparado con ambos combustibles. Estos requerimientos fundamentales son: el diámetro de los orificios de la tobera, para entregar la cantidad de combustible requerida por el motor; así como, la longitud y ángulo del chorro de atomización, para garantizar la distribución uniforme en la cámara de combustión de manera homogénea, para mejorar la calidad de la mezcla aire combustible.

En la presente investigación, por medio de cálculo y simulación con datos medidos experimentalmente de diésel y biodiésel puros; así como de una mezcla de 20% biodiésel y 80% diésel (B20), se determinaron: el diámetro de los orificios de la tobera, la longitud y ángulo del chorro de combustible atomizado. El biodiésel se obtuvo por medio de transesterificación de aceite reciclado de palma, considerando que los beneficios ecológicos y el rendimiento de producción [1], como un combustible alternativo, corresponden a la combustión de 100% y mínimo 20% de este tipo de combustible.

Los cálculos y simulaciones fueron realizados en función de la duración de la inyección a lo largo de diferentes valores de presión, con el fin de equiparar el rendimiento del motor con el uso de diésel y de mezclas de biodiésel. El objetivo consiste en determinar las condiciones que mantienen las características de rociado de combustible equivalentes al del diésel puro, para que el uso del biodiésel sea una alternativa directamente aplicable.

RESUMEN

El biodiésel al ser usado como un combustible alternativo en estado puro o mezclado con diésel, necesita determinadas modificaciones en la duración y en la presión de la inyección de combustible en el motor. En el presente estudio se determinan las propiedades y las características que deben cumplir las toberas de un inyector para motores diésel, al momento de usar biodiésel como combustible. Con los datos de caracterización de diésel y biodiésel puros; así como de una mezcla de 20% de biodiésel con 80% diésel, se procedió a calcular y a simular los principales parámetros de la inyección de combustible en función de los requerimientos de potencia del motor. El propósito de la presente investigación consiste en determinar los parámetros de control de la inyección de combustible que permitan el uso equiparado de diésel y biodiésel, sin ningún cambio en sus componentes. Se encontró que, manteniendo el diámetro de los orificios de la tobera, se pueden mantener las características de atomización de ambos tipos de

Investigaciones anteriores señalan que, a pesar de los prometedores resultados en la reducción de emisiones, existe aún cierta resistencia al uso e implementación del biodiésel puro o mezclado como combustible alternativo, debido a una reducción de la potencia del motor e incremento en el consumo de combustible [2], e independientemente del origen de este tipo de combustible [3]. Esto se debe principalmente a un menor valor calorífico, alta viscosidad [4] y mayor densidad [5] del biodiésel. Estos efectos son incluso más notorios conforme aumenta la concentración de biodiésel en la mezcla combustible. El efecto que tiene un poder calorífico menor, es una reducción en la cantidad de energía química que se convierte en energía mecánica; mientras que, una mayor viscosidad trae como consecuencia una mayor profundidad de penetración del chorro atomizado de combustible, pero con un grado deficiente de mezclado con el aire en la cámara de combustión, debido a que un fluido con alta viscosidad tiene mayores dificultades para atomizarse en mayor grado. Finalmente, una mayor densidad trae como consecuencia un mayor consumo de combustible; ya que, el combustible se entrega al motor en función del volumen, y en el caso del biodiésel se entrega una mayor cantidad para compensar el reducido poder calorífico en comparación con el diésel puro [6].

El problema del alto consumo de combustible debido al re-

ducido poder calorífico y a la alta densidad del biodiésel se controla reduciendo el avance a la inyección [7]; mientras que, las dificultades en la atomización debido a la alta viscosidad pueden ser controladas con una mayor presión de inyección [8]. Se debe considerar además que la velocidad de inyección de combustible disminuye cuando se reduce también la presión de inyección [9].

Las propiedades de los combustibles, tales como la densidad y la viscosidad varían con la temperatura, por lo que se han realizado experimentos y modelos matemáticos que permiten corregir las mediciones a los valores de temperatura deseados [10], por esta razón en la presente investigación los valores medidos de la densidad a 15.55 °C se corrigieron a 37.8°C que es la temperatura a la que se midió la viscosidad cinemática, además de que es una temperatura cercana a la de la inyección del combustible en el motor.

Para cumplir con las expectativas de que el biodiésel sea un combustible alternativo y sustituto del diésel puro, se deben definir los parámetros y condiciones que deben controlarse en el sistema de inyección para que se cumplan los requerimientos de potencia del motor, manteniendo parámetros de eficiencia y reduciendo su impacto ambiental [19]. El enfoque de esta investigación consiste en determinar la duración de inyección; así como también la longitud y el ángulo del combustible atomizado, que permitan obtener una entrega de combustible totalmente equivalente entre biodiésel y diésel puro, para mantener la potencia del motor. El hecho de que la entrega de combustible dependa de la duración de la inyección, y no del diámetro de los orificios en las toberas del inyector, permite que el uso del biodiésel no requiera de cambios de diseño ni de construcción en el sistema de inyección, aparte de las modificaciones en los parámetros de control.

Propiedades del combustible			
Tipo de combustible	Diésel	Biodiésel	B20
Densidad @ 37.8°C [kg/m ³]*	833.357	884.11	842.798
Viscosidad cinemática @ 37.8°C [mm ² /s]**	4.02	6.58	5.03
Viscosidad dinámica @ 37.8°C [cP]**	3.35	5.817	4.239
Poder calorífico [MJ/kg]**	42.7817	39.9254	42.5632
*Datos medidos experimentalmente a 15.55°C y calculados a 37.8°C con el método de Douglas Queiroz Santos, et. al, 2013 [10].			
**Datos medidos experimentalmente.			
***Datos calculados.			

Tabla I: Propiedades de diésel y del biodiésel

Datos de los motores analizados			
Tipo de motor*	8V 4000 M63	12V 4000 M63	16V 4000 M63
Potencia [kW]*	1000	1500	2000
Velocidad [rpm]*	1800	1800	1800
Número de cilindros*	8	12	16
Caudal de combustible [l/h] @ 42.8 MJ/kg de poder calorífico del combustible*	251.8	363.3	479.5
Presión de admisión turbo cargada [bar]**	1.2		
Relación de compresión**	16.5:1		
Presión de compresión [bar]**	61		
Temperatura de compresión [K]**	915		
*Datos tomados de http://www.mtu-online.com [12,13, 14].			
**Datos estimados de referencia.			
***Datos calculados.			

Tabla II: Datos del motor para el cálculo de la inyección de combustible

Propiedades del comburente	Aire
Densidad @ 915K & 61bar [kg/m ³]*	23.23
Viscosidad dinámica @ ° 915K & 61bar [cP]**	0.039
*Dato calculado con la ecuación del gas ideal.	
**Dato tomado de Willi Bohl, Wolfgang Elmendorf. Technische Strömungslehre. 2014. [15].	

Tabla III: Propiedades del aire en las condiciones de la cámara de combustión del motor

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIAL Y EQUIPO UTILIZADO

El cálculo y simulación del sistema de inyección se basan en datos experimentales de caracterización de diésel y biodiésel puro; así como de una mezcla combustible de 20% biodiésel y 80% diésel (B20). Se toma como referencia, los datos de potencia, consumo de combustible y régimen de giro de motores diésel de aplicación marina, considerando que la duración de la inyección de combustible debe ser menor a los 25° de giro del cigüeñal para garantizar una tasa de combustión más alta [11].

La aplicación sostenible de los motores de combustión interna y del biodiésel como combustible alternativo, se concentra en aplicaciones en donde se genera o consume grandes cantidades de energía; por esta razón, para el cálculo y simulación, y con el fin de determinar los requerimientos del sistema de inyección con el uso de combustibles alternativos, se tomaron los datos de la especificación de tres motores de aplicación marina de la compañía MTU del tipo 8V, 12V y 16V de la serie 4000 M63 [12, 13, 14], como referencia para el cálculo de las características del rociado con los diferentes tipos de combustibles.

2.1.1. Formulación matemática

Para que un sistema de inyección de combustible sea apto para funcionar con fuentes alternativas como el biodiésel, deben tener el diámetro óptimo en los orificios de la tobera para que el combustible inyectado sea el necesario para alcanzar la potencia requerida por el motor. Se debe también considerar, que el combustible inyectado a través de la tobera debe mantener diferencias mínimas entre las variaciones de longitud y ángulo de atomizado; tanto para el diésel como para diferentes mezclas de biodiésel.

Mediante la ecuación de Bernoulli expresada en función de la presión (ecuación 1), se procede a deducir la ecuación que determina el diámetro de los orificios de las toberas, la misma que a su vez está en función de los requerimientos y características de funcionamiento del motor (ecuación 2).

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2 = cte. \quad (1)$$

Donde

- p_1, p_2 : presión [MPa]
- ρ : densidad [kg/m³]
- c_1, c_2 : velocidad del fluido [m/s]
- g : aceleración de la gravedad [m/s²]
- z_1, z_2 : altura [m]

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot SFC \cdot \frac{Pot \cdot 360^\circ}{z \cdot t_{inj}} \cdot K}{n \cdot C_f \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{inj} - p_{comp})}{\rho}}}} \quad (2)$$

Donde

- D_n : Diámetro de los agujeros de la tobera [mm]
- SFC: Consumo específico de combustible [g/kWh]
- Pot: Potencia del motor [kW]
- z: Número de cilindros [-]
- t_{inj} : Duración de la inyección [° giro del cigüeñal]
- K: Factor de motor de 4 tiempos con valor 2. [-]
- n: Número de orificios de la tobera [-]
- C_f : Coeficiente de descarga de la tobera
- p_{inj} : Presión de inyección [MPa]
- p_{comp} : Presión de compresión del motor [MPa]

La longitud y el ángulo que alcanza la atomización del combustible [16], se calculan con las ecuaciones (3) y (4) respectivamente.

$$L_b = 15.8 \times \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{0.5} \cdot D_n \quad (3)$$

Donde

- L_b : Longitud del chorro de atomización [mm]
- ρ : Densidad del combustible a las condiciones de la inyección [kg/m³]
- ρ_a : Densidad del aire a la presión de compresión del motor [kg/m³]

$$\tan \left[\frac{\theta}{2}\right] = \left(\frac{1}{3 + \left[\frac{L_n/D_n}{3.6}\right]}\right) \cdot 4 \times \pi \times \left(\frac{\rho_l}{\rho_a}\right)^{0.5} \times \left(\frac{3^{0.5}}{6}\right) \quad (4)$$

Donde

- θ : Ángulo del chorro de atomización [°]
- L_n : Longitud de los orificios de las toberas [mm]
- D_n : Diámetro de los orificios de las toberas [mm]
- ρ : Densidad del combustible a las condiciones de la inyección [kg/m³]
- ρ_a : Densidad del aire a la presión de compresión del motor [kg/m³]

2.2. PROCESO DE CÁLCULO

Para calcular las características de rociado de determinados combustibles y determinar su uso como una alternativa los unos de los otros, es necesario que todas sus propiedades sean medidas o corregidas a una misma temperatura. Ya que, al hacer el estudio de mezclas combustibles, se deben determinar por estudios específicos los diferentes coeficientes que permitan corregir las densidades y viscosidades a una temperatura determinada. Es recomendable tomar mediciones directas y reales, cercanas a los 40°C, que es la temperatura a la que tiene lugar la inyección de combustible en los motores diésel. En el presente estudio los valores de densidad medidos a 15.55°C se corrigieron al valor de temperatura de 37.8°C, que es a la que se midió la viscosidad, con la finalidad de que los valores de cálculo provengan de mediciones directas, y al mismo tiempo estén cercanas a los 40°C. Posteriormente se procede a calcular el diámetro requerido por las toberas del inyector; en función de la potencia del motor, las características de la inyección y las propiedades de cada tipo de combustible. Finalmente se procede a calcular la longitud y el ángulo de atomización de cada tipo de combustible para proceder a su comparación y de ser necesario, hacer las correcciones necesarias en el tiempo o en la presión de inyección. Para los cálculos se consideró una tobera con 5 orificios y con una longitud de cada orificio correspondiente de 3 a 6 veces el diámetro de los mismos [9].

La solución consiste en determinar la variación porcentual del combustible tipo biodiésel con respecto al diésel para que el combustible inyectado sea el necesario para cumplir con los requerimientos de potencia del motor y de atomización del sistema de inyección. Las variaciones que existan entre los tipos de combustibles estudiados, se pueden corregir, tanto con el tiempo, como con la presión de inyección. La metodología expuesta sirve para todo tipo de combustible alternativo al diésel, teniendo en cuenta que el objetivo es equiparar el funcionamiento y rendimiento en lo que se refiere a la potencia del motor y a las características de rociado del combustible. Es necesario exponer, que los efectos contaminantes resultantes de la combustión o los efectos en la durabilidad o estabilidad de los componentes del motor, necesitan de un estudio y metodología de evaluación propios.

3. RESULTADOS

Se encontró que sin hacer cambios en el motor ni en el sistema de inyección, y que para alcanzar la potencia requerida por el motor y para mantener en un rango adecuado las características de atomizado de combustible, tanto con diésel como con biodiésel puros; así como también mezclados, es necesario recortar la duración de la inyección en el caso del diésel y alargarla en el caso de las mezclas de biodiésel.

Datos de la tobera y características de la inyección			
Tipo de combustible	Diésel	Biodiésel	B20
Número de orificios	5		
Longitud de los orificios [mm]	2		
Coefficiente de descarga de la tobera	0.7		
Diámetro de los orificios de la tobera [mm]	0.44		
Presión nominal de inyección [bar]	1500		
Duración de la inyección en grados de giro del cigüeñal [°GC]	20	24	22
Consumo específico de combustible del motor 8V 4000 M63 @ 251.8 l/h [gr/kW·h]*	209.839	222.619	212.217
Consumo específico de combustible del motor 12V 4000 M63 @ 363.3 l/h [gr/kW·h]*	201.839	214.131	204.126
Consumo específico de combustible del motor 168V 4000 M63 @ 479.5 l/h [gr/kW·h]*	199.797	211.965	202.061
*Datos calculados en base al caudal de combustible especificado del motor con la densidad de cada combustible.			

Tabla IV. Datos de la tobera y características de la inyección con diésel y biodiésel

Investigaciones anteriores demuestran que, con el uso de biodiésel, el aumento del consumo específico de combustible en relación al diésel aumentó en 12.9% [17], debido a que el biodiésel tiene un menor poder calorífico y una mayor densidad en una proporción de 18.5% más de masa y 13.5% menos de volumen [18]. A esto hay que añadir que, las diferencias porcentuales de los poderes caloríficos y el consumo de combustible entre el diésel y el biodiésel puro (ver Tabla I y IV), alcanzan el 7%; mientras que, en el caso de la mezcla combustible de 20% biodiésel y 80% diésel (B20), esta diferencia alcanza el 1%.

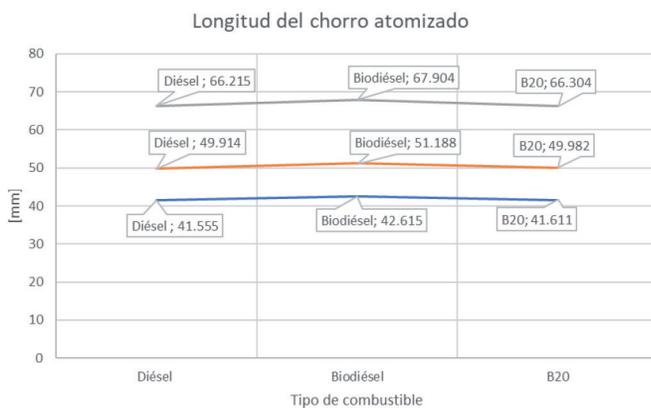


Fig. 1: Longitud del chorro de atomización calculado a 1500 bar

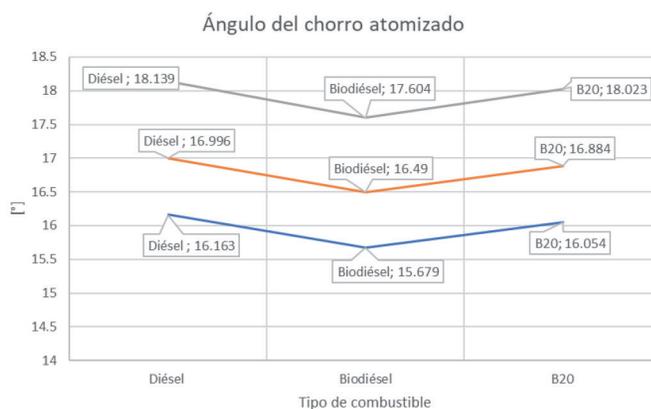


Fig. 2: Ángulo del chorro de atomización calculado a 1500 bar

Las ecuaciones descritas en la formulación matemática, fueron implementadas con el uso del software matemático Mathcad®, tanto para el cálculo de valores específicos, como para simular diferentes condiciones dentro del cálculo. La selección del software mencionado se debe a su versatilidad para desplegar resultados en función de un rango determinado de una variable. En este caso se calculó el diámetro de los orificios de las toberas, la longitud y el ángulo del chorro atomizado, en función de la presión de inyección. Para el cálculo, se consideró una presión nominal de inyección de 1500 bar.

Con la finalidad de mantener las mismas características de la inyección, en lo referente a la longitud y al ángulo del chorro atomizado de combustible, y haciendo uso de la misma geometría de la tobera del inyector con el uso de diferentes combustibles; es necesario corregir la duración de la inyección entre 2 y 4° de giro del cigüeñal. Para mantener la misma longitud del chorro de combustible es necesario corregir la presión de inyección entre 150 y 200 bar; y para mantener los mismos ángulos de atomización con los combustibles analizados y dependiendo de la potencia del motor, las correcciones en la presión de inyección se encuentran en el rango de 500 a 800 bar (ver Tabla V).

4. DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos se observa que es posible alcanzar los requerimientos de potencia del motor usando diésel o biodiésel como combustibles, sin la necesidad de hacer cambios en los componentes del motor o del sistema de inyección, pero sí en los parámetros de control, como son el tiempo y la presión de inyección.

Manteniendo la presión y reduciendo la duración del tiempo de inyección del diésel en 4° de giro del cigüeñal en comparación con el biodiésel puro, y en 2° en comparación con la mezcla del 20% de biodiésel y 80% de diésel (B20); se logra además, que las características de atomización del combustible se mantengan con diferencias del 3% para la longitud y el ángulo de atomización con el uso del biodiésel puro; mientras que, las diferencias con el uso de la mezcla combustible B20 son del 1%.

Para reducir las variaciones porcentuales de la longitud y el ángulo del chorro atomizado, que alcanzan máximo el 3%; es necesario hacer correcciones relativamente grandes en la presión de inyección, que llegan a alcanzar hasta un 37.5%. Ya que, conforme aumenta la presión del sistema, el ángulo del chorro de atomización tiende a disminuir, en el caso del biodiésel en estado puro es necesario reducir la presión de inyección hasta 900 bar, para tener el mismo ángulo del chorro atomizado con diésel inyectado a 1700 bar.

El uso del biodiésel como un combustible alternativo y como una solución ecológica, debe tener la flexibilidad de ser usado en los motores y con los sistemas de inyección actuales. Diferencias entre el 1 y 3% en las características de atomización de la inyección hacen que, con la configuración correcta de la duración del tiempo de inyección de acuerdo a las características del motor, el biodiésel puro o mezclado, pueda ser usado como un absoluto sustituto del diésel en lo que respecta el mantener los requerimientos de potencia y características de atomización.

Características de la inyección en función de la presión de inyección				
Tipo de combustible		Diésel	Biodiésel	B20
Duración de la inyección en grados de giro del cigüeñal [°GC]		20	24	22
Motor 8V 4000 M63	Longitud del chorro atomizado [mm]	41.555	41.571	41.611
	Presión de inyección corregida [bar]	1500	1650	1500
	Ángulo del chorro atomizado [°]	16.163	16.159	16.054
	Presión de inyección corregida [bar]	1500	1000	1500
Motor 12V 4000 M63	Longitud del chorro atomizado [mm]	49.914	49.549	49.982
	Presión de inyección corregida [bar]	1500	1700	1500
	Ángulo del chorro atomizado [°]	17.073	17.043	17.002
	Presión de inyección corregida [bar]	1400	900	1350
Motor 16V 4000 M63	Longitud del chorro atomizado [mm]	66.215	66.241	66.304
	Presión de inyección corregida [bar]	1500	1650	1500
	Ángulo del chorro atomizado [°]	18.019	18.075	18.09
	Presión de inyección corregida [bar]	1700	900	1400

*Datos calculados en base al caudal de combustible especificado del motor con la densidad de cada combustible

Tabla V: Datos de las características de inyección en función de la presión de inyección para cada tipo de combustible para una geometría definida de la tobera del inyector

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una metodología teórica de cálculo con datos experimentales para evaluar las características del sistema de inyección de combustible con el uso de diésel y de biodiésel.

Se ha evidenciado que por medio del control de la duración de la inyección de combustible es posible mantener las características de atomización y el rendimiento del motor con combustibles alternativos.

La densidad del combustible está estrechamente relacionada con la cantidad de su volumen inyectado; mientras que, la viscosidad determina su calidad de atomización. Al mismo tiempo, la cantidad de combustible inyectado depende también del poder calorífico; ya que, en función de esta propiedad, se debe inyectar más o menos cantidad del mismo.

La calidad y las características de atomización del combustible no solo dependen de la tobera del inyector, sino también de las condiciones en la cámara de combustión bajo las cuales el combustible es inyectado. Las variaciones de la densidad y viscosidad del aire son altas, cuando se comparan sus valores en condiciones normales (1 atm – 293K) y en las condiciones a la que se encuentra en el interior de la cámara de combustión al final del ciclo de compresión e inicio de la inyección; en el caso del presente estudio, a 61bar y 915 K.

Los valores de la densidad y viscosidad varían drásticamente con la temperatura; del mismo modo las características de la inyección como la longitud y el ángulo del chorro atomizado de combustible, dependen de la temperatura del combustible y pueden ser controlados mediante el tiempo y la presión de inyección.

El diésel y la mezcla combustible de 20% de biodiésel y 80% diésel, son prácticamente compatibles, requiriendo únicamente cambios en la duración de la inyección de combustible, mientras que el uso de biodiésel puro necesita cambios considerables en los valores de presión de inyección desde 500 hasta 800 bar, dependiendo de la potencia del motor, además de los cambios en la duración de la inyección.

La metodología propuesta ha demostrado ser adecuada para definir los parámetros de control de inyección de diferentes tipos de combustibles, con el fin de que su uso produzca el mismo

rendimiento del motor y variaciones mínimas en los parámetros que determinan la calidad de la inyección.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vidal-Benavides, A. I., Quintero-Díaz, J. C., and Herrera-Orozco, I., Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado. DYNA 84(201), pp. 155-162, 2017. (doi: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n201.54469>)
- [2] Jinlin Xue, Tony E. Grift a, Alan C. Hansen. "Effect of biodiesel on engine performances and emissions". Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1098-1116. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016>)
- [3] Bai-Fu Lin, Jyun-Han Huang, Dao-Yi Huang. "Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions" Fuel 88 (2009) 1779-1785. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.006>)
- [4] Hüseyin Aydin, Hasan Bayindir. "Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine". Renewable Energy 35 (2010) 588-592. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.009>)
- [5] Magin Lapuerta, José M. Herreros, Lisbeth L. Lyons, Reyes García-Contreras, Yolanda Briceño. "Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions". Fuel 87 (2008) 3161-3169. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.013>)
- [6] D.H. Qi, L.M. Geng, H. Chen, Y.ZH. Bian, J. Liu, X.CH. Ren. "Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil". Renewable Energy 34 (2009) 2706-2713. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.004>)
- [7] C. Carraretto, A. Macor, A. Mirandola, A. Stoppato, S. Tonon. "Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations". Energy 29 (2004) 2195-2211. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.042>)
- [8] N R Banapurmath, P GTewari, and R S Hosmath. "Effect of biodiesel derived from Honge oil and its blends with diesel when directly injected at different injection pressures and injection timings in single-cylinder water-cooled compression ignition engine". Proc. IMechE Vol. 223 Part A: J. Power and Energy. 2009. (doi: <http://dx.doi.org/10.1243/09576509JPE673>)
- [9] Hiroyasu, H., Arai, M., and Tabata, M. "Empirical Equations for the Sauter Mean Diameter of a Diesel Spray," SAE Technical Paper 890464, 1989. (doi: <http://dx.doi.org/10.4271/890464>)
- [10] Douglas Queiroz Santos, Ana Lúcia de Lima, Ana Paula de Lima, Waldomiro Borges Neto, José Domingos Fabris. "Thermal expansion coefficient and algebraic models to correct values of specific mass as a function of temperature for corn biodiesel". Fuel 106 (2013) 646-650. 2013. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.048>)
- [11] Günter P. Merker, Christian Schwarz, Rüdiger Teichmann. Grundlagen Verbrennungsmotoren. 6ta. Ed. Berlin. Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 2012. ISBN 978-3-8348-1987-1
- [12] MTU Friedrichshafen GmbH. "Engine Program / Diesel engines for work boats / 8V 4000 M63" [en línea]. [citado 05.11.2017]. Disponible en Internet: http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-marine-main-propulsion-dieselelectric-drives-and-onboard-power-generation/diesel-engines-for-work-boats/detail/?tx_mcgshop_shop%5Bengine%5D=434&tx_mcgshop_shop%5Baction%5D=show&tx_mcgshop_shop%5Bcontroller%5D=Shop&Hash=51726abb9558789f9af929f6f6aef7a5
- [13] MTU Friedrichshafen GmbH. "Engine Program / Diesel engines for work boats / 12V 4000 M63" [en línea]. [citado 05.11.2017]. Disponible en Internet: http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-marine-main-propulsion-dieselelectric-drives-and-onboard-power-generation/diesel-engines-for-work-boats/detail/?tx_mcgshop_shop%5Bengine%5D=437&tx_mcgshop_shop%5Baction%5D=show&tx_mcgshop_shop%5Bcontroller%5D=Shop&Hash=c15dbdd9a87b66a4fb789897e272426b
- [14] MTU Friedrichshafen GmbH. "Engine Program / Diesel engines for work boats / 16V 4000 M63" [en línea]. [citado 05.11.2017]. Disponible en Internet: http://www.mtu-online.com/mtu/products/engine-program/diesel-engines-for-marine-main-propulsion-dieselelectric-drives-and-onboard-power-generation/diesel-engines-for-work-boats/detail/?tx_mcgshop_shop%5Bengine%5D=440&tx_mcgshop_shop%5Baction%5D=show&tx_mcgshop_shop%5Bcontroller%5D=Shop&Hash=8572553c36ec3197c8894505971c98d8
- [15] Willi Bohl, Wolfgang Elnenorf. Technische Strömungslehre. 15. Ed. Würzburg. Vogel Business Media GmbH. 2014. ISBN 978-3-8343-3329-2
- [16] Subhash Lahane, K.A. Subramanian. "Effect of different percentages of biodiesel-diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine". Fuel 139 (2015) 537-545. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.036>)
- [17] Octavio Armas, Kuen Yehliu, André L. Boehman. "Effect of alternative fuels on exhaust emissions during diesel engine operation with matched combustion phasing". Fuel 89 (2010) 438-456. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.022>)
- [18] J.M. Luján, V. Bermúdez, B. Tormos, B. Pla. "Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II)" BIOMASS AND BIOENERGY 33 (2009) 948-956. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.003>)
- [19] Reyes-Leon, A., Quinto-Diez, P., Sanchez-Silva, F., Barbosa-Saldaña, J. (2016). ANALYSIS OF THE FUEL INFLUENCE IN ENERGY, EXERGY AND ECOLOGICAL EFFICIENCIES OF A POWER PLANT. DYNA Energía y Sostenibilidad, 5(1), [11 p.]. (doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/E57993>)

AGRADECIMIENTOS

Se agradece y se reconoce la contribución de Svyatoslav Cheranov, del Moscow Polytech en Moscú - Rusia, por su valioso aporte en este trabajo.