

Efecto del tratamiento magnético en el comportamiento reológico del diésel

Effect of magnetic treatment on the rheological behavior of diesel

Ing. Ramón Arias-Gilart^I, rag@uo.edu.cu, Dr C. José Falcón-Hernández^{II},
DrC. Melek Campos-Sofía^I, Lic. Yadira Silveira-Font^I, téc. Ónix López-Galarza^{III}

^ICentro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente, Cuba;
^{II}Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba; ^{III}Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET). Cuba

Resumen

En el presente trabajo se determinó experimentalmente el efecto del tratamiento magnético en el comportamiento reológico del diésel. Para tratar el combustible se utilizó un acondicionador magnético con una inducción promedio de 0,36 T. Un reómetro Anton Paar Physica MCR 301 se empleó para determinar el comportamiento reológico del diésel antes y después del tratamiento magnético. Para definir los modelos reológicos se dividieron las curvas de flujo en dos zonas. El punto de inflexión de los gradientes de velocidad en el que ocurrió el cambio de comportamiento reológico en el diésel fue 500 s^{-1} . Las muestras de diésel antes y después del tratamiento magnético se comportaron como fluidos newtonianos en gradientes de velocidad desde 0 hasta 500 s^{-1} y las ecuaciones de los modelos matemáticos de ambas muestras son iguales. A partir de 500 y hasta 1000 s^{-1} las muestras se comportaron como fluidos dilatantes, la ecuación del modelo matemático del diésel tratado magnéticamente fue diferente a la del diésel sin tratar. El tratamiento magnético disminuyó en un 20 % el índice de consistencia y aumentó en un 1,26% el índice de flujo del modelo dilatante del diésel, a partir de 500 y hasta 1000 s^{-1} . El tratamiento magnético provocó una disminución de un 6,96 % en la viscosidad no newtoniana del diésel en las condiciones en que se desarrolla el proceso de atomización de los motores de combustión interna (1000 s^{-1}).

Palabras claves: modelo reológico, acondicionador magnético, gradientes de velocidad, diésel.

Abstract

In the present work the effect of the magnetic treatment on the rheological behavior of the diesel was determined experimentally. To treat the fuel, a magnetic conditioner with an average induction of 0,36 T. was used. An Anton Paar Physica MCR 301 rheometer was used to determine the rheological behavior of the diesel before and after the magnetic treatment. To define the rheological models, the flow curves were divided into two zones. The point of inflection in the velocity gradients in which the change of rheological behavior occurred in the diesel was 500 s^{-1} . Diesel samples before and after the magnetic treatment behave like Newtonian fluids in velocity gradients from 0 to 500 s^{-1} and the equations of the mathematical models of both samples are the same. From 500 to 1000 s^{-1} the samples behaved like Dilating fluids, the equation of the mathematical model of the magnetically treated diesel was different from that of untreated diesel. Magnetic treatment reduced the consistency index by 20 % and increased the flow rate of the

diesel dilating model by 1,26 % from 500 to 1000 s⁻¹. This indicates that the non-Newtonian viscosity of the diesel, under the conditions of the atomization process (1000 s⁻¹), decreased by 6,96 % with the applied magnetic treatment.

Keywords: rheological model, magnetic conditioner, velocity gradients, diesel.

Introducción

El petróleo es uno de los recursos naturales más utilizados por el hombre, por la capacidad que tiene de transformarse en energía, así como por ser el soporte de la poderosa y amplia industria petroquímica /1/.

La industria petroquímica es aquella dedicada a obtener derivados químicos del petróleo y los gases asociados. El petróleo es una de las sustancias más consumidas en las sociedades modernas. Esto se debe a que, además de proporcionar materias primas para plásticos, gomas, cauchos, ceras, fibras sintéticas y otros muchos productos, los combustibles derivados del petróleo suplen casi la mitad de las necesidades energéticas mundiales /2/. La industria petroquímica produce un gran número de productos refinados, entre los que se destacan el fuel oil, la gasolina y el diésel, por su elevado consumo en la sociedad actual.

El diésel, también conocido como gasóleo o petrodiesel, es un derivado refinado del petróleo, constituido por una mezcla de compuestos parafínicos, naftalénicos y aromáticos, con puntos de ebullición que oscilan entre los 149 y 371 °C. Por lo que respecta a la longitud de las cadenas carbonadas, el diésel suele incluir compuestos con cadenas de 8 a 22 átomos de carbono y de carácter parafínico/3/. El principal uso del diésel es su aplicación como combustible en los procesos de combustión, tanto de motores de combustión interna (MCI) como de calderas industriales.

Los sectores públicos y privados se han empeñado en encontrar soluciones a mediano plazo para lograr hacer frente al encarecimiento y la escasez de los derivados del petróleo como el diésel/4/. Por otra parte el uso, generación y transportación de la energía proveniente de los combustibles fósiles ha provocado grandes problemas ambientales; por ejemplo: la contaminación del aire, el cambio climático, la deposición ácida, el agujero de la capa de ozono, entre otros.

El estudio e implementación de nuevos métodos que permitan el ahorro de combustibles y la disminución de las emisiones de gases contaminantes es de vital importancia en la sociedad actual. Algunos de los métodos estudiados en la actualidad para contribuir al ahorro de combustibles y a la reducción de las emisiones de gases de escape en los MCI son: la optimización de la cámara de combustión, la optimización del sistema de ignición, la activación catalítica del combustible, el uso de mezclas de combustibles, la recirculación de los gases de escape y el tratamiento magnético (TM) del combustible/5/.

Estudios recientes sugieren que el tratamiento magnético tiene un efecto positivo en el comportamiento de los MCI. Para los vehículos de motor y las calderas industriales, se reportan tanto la disminución del consumo de combustible como la reducción de las emisiones de gases de escape /6-14/.

También se reportan variaciones en las propiedades físico-químicas de los combustibles tratados magnéticamente. Las más estudiadas son: la viscosidad, la tensión superficial y la temperatura de flasheo. Sin embargo, no se han encontrado reportes de investigaciones que determinen los efectos del tratamiento magnético en las propiedades reológicas de los combustibles derivados del petróleo, específicamente del diésel.

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia bajo la influencia de una fuerza mecánica. Es una rama de la física y de la química-física, sus variables más importantes provienen del campo de la mecánica: fuerzas, deflexiones y velocidades. El término "reología" se origina del griego: "rhein" que significa "fluir". Así, la reología es literalmente "la ciencia del flujo". Sin embargo, los experimentos reológicos no sólo revelan información sobre el comportamiento del flujo de líquidos, sino también sobre el comportamiento de deformación de los sólidos. El objetivo de los reólogos es medir la deformación y el comportamiento de flujo de una gran variedad de materias, presentar los resultados obtenidos claramente y explicarlos /15/.

Sólidos y líquidos presentan toda una gama de comportamientos que dependen tanto de sus características físico-químicas intrínsecas, como del tamaño y modo del esfuerzo al que son sometidos. Los sólidos pueden someterse a esfuerzos de tracción normal a su superficie y a esfuerzos cortantes o de cizalladura

tangentes a su superficie. Los líquidos que adquieren la forma de su recipiente, sólo pueden ser sometidos a esfuerzos cortantes /2/.

La principal clasificación agrupa a los fluidos en dos grandes grupos: los fluidos cuyas características reológicas dependen del tiempo y los que no. Los modelos independientes del tiempo son los más estudiados (figura 1). De manera general existen varios modelos matemáticos que analizan la relación entre los esfuerzos cortantes y los gradientes de velocidad.

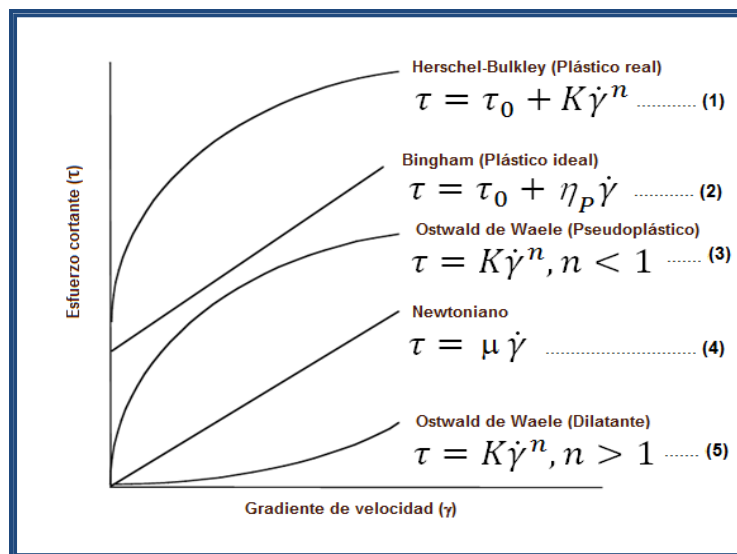


Fig. 1 Modelos reológicos independientes del tiempo. [16; 17].

La figura 1 muestra los modelos reológicos independientes del tiempo que más se utilizan y sus respectivas ecuaciones matemáticas.

donde

τ : esfuerzo cortante (Pa)

$\dot{\gamma}$: gradiente de velocidad (s^{-1})

μ : viscosidad dinámica (Pa s)

η_p : viscosidad plástica (Pa s)

K: índice de consistencia ($Pa s^n$)

n: índice de flujo (adimensional)

La caracterización del comportamiento geológica se emplea en las evaluaciones de fenómenos de transporte de cantidad movimiento, calor y materia. La

caracterización reológica permite predecir comportamientos en el uso y aplicación de sustancias líquidas o semilíquidas /3/.

La combustión es un proceso en el que la deformación y las características de flujo de los combustibles juegan un papel muy importante, por lo tanto el objetivo de este trabajo es determinar el efecto del tratamiento magnético en el comportamiento reológico del diésel.

Materiales y métodos

En la investigación se empleó una muestra del diésel comercializado en Cuba en todos los depósitos de ventas de este tipo de combustible. En la tabla 1 se exponen algunas de las características de este producto que constituyen normas nacionales.

Tabla 1
Especificaciones del diésel utilizado

Índice de Calidad	Valor de la muestra utilizada	Valor normado	Método de ensayo
Temperatura de inflamación (°C)	62	mínimo 45	NC ASTM D 93
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)	4,6	1,6 – 5,3	NC ASTM D 445
Densidad a 15 °C (g/cm ³)	0,846	0,815-0,865	NC ASTM D 1 298, 4 052

Como se observa en la tabla 1 las propiedades del diésel utilizado cumplen con los valores normados, el índice de cetano no se pudo realizar.

Acondicionador magnético

Para el tratamiento magnético se utilizó un acondicionador magnético a base de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro. La inducción magnética promedio de este acondicionador es de 0,36 T con una desviación estándar de 0,005 T. La simulación del circuito magnético del acondicionador magnético empleado en la investigación se presenta en la figura 2.

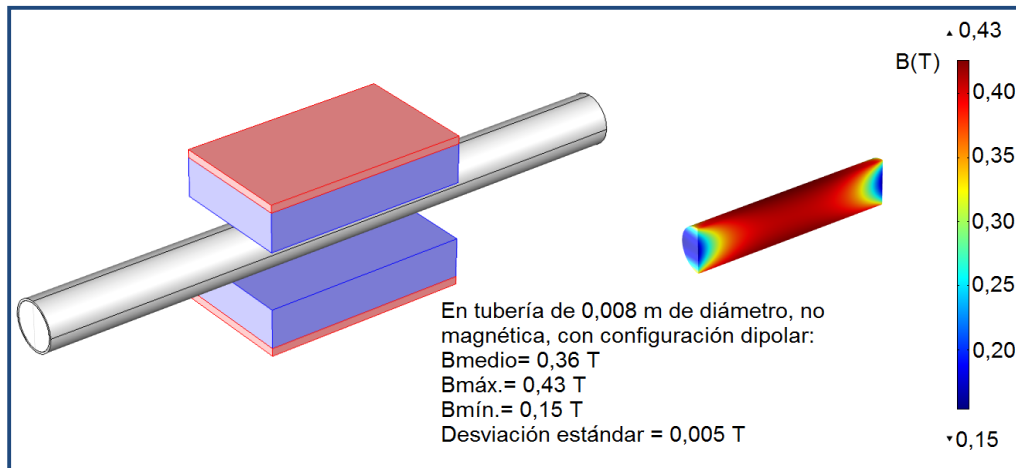


Fig. 2 Patrón de distribución de campo magnético en una tubería diamagnética (B-inducción magnética, $B_{máx.}$ - inducción máxima, $B_{mín.}$ - inducción mínima).

Para garantizar que las líneas de inducción del campo se distribuyan uniformemente por toda el área de flujo del combustible se utilizó una configuración dipolar.

Metodología para el tratamiento magnético

Para la aplicación del tratamiento magnético se empleó una instalación experimental como se muestra en la figura 3. Está compuesta por un acondicionador magnético a imanes permanentes, una tubería diamagnética, dos recipientes y dos válvulas. Para mantener la velocidad del fluido se mantuvo el recipiente principal con un volumen de muestra constante.

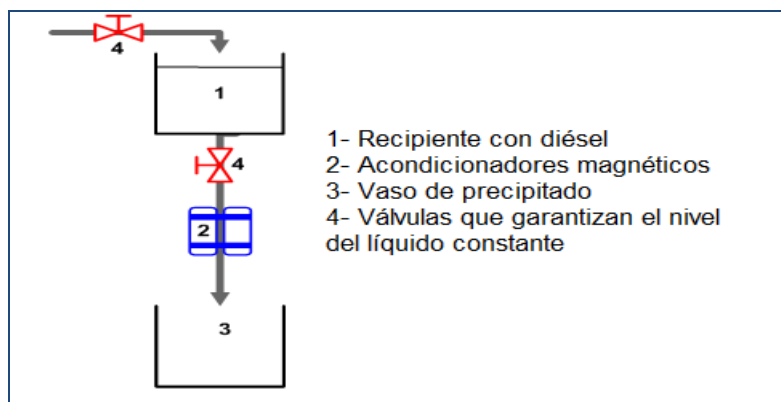


Fig. 3 Esquema del tratamiento magnético del combustible.

Entre las dos caras polares del acondicionador magnético se colocó la tubería diamagnética (silicona) de 0,008 m de diámetro, a través de la cual se hizo fluir el diésel.

El tiempo de exposición del diésel al tratamiento magnético se determinó según la metodología planteada por /16; 17/. Para un volumen de diésel de 0,5 L y las condiciones de este sistema de tratamiento, la velocidad promedio fue de 2 m/s y el tiempo de exposición de 0,025 s.

Reómetro utilizado

Para analizar el comportamiento reológico del diésel antes y después del tratamiento magnético se empleó un reómetro Anton Paar Physica MCR 301 (figura 4). Las curvas de flujo de las muestras se ajustaron a los modelos reológicos a partir de los valores de esfuerzos cortantes y gradientes de velocidad brindados por este equipo.



Fig. 4 Reómetro Anton Paar Physica MCR 301 utilizado en la experimentación (1- Vista general, 2- Vista del sensor).

Procedimiento

Se realizaron aleatoriamente tres corridas experimentales con diésel tratado magnéticamente (DTM) y tres con diésel sin tratar (D) como control. Los valores de las mediciones de esfuerzo cortante (τ) se promediaron, se graficaron y se ajustaron las curvas de flujo correspondientes, utilizando el programa Microsoft Excel 2007.

Para realizar el análisis del comportamiento reológico de las muestras se siguieron los siguientes pasos:

1. Los valores negativos de las datas de esfuerzos cortantes se eliminaron, ya que se deben a errores de medición en el equipo.
2. Los restantes valores se promediaron y se graficaron con el fin de determinar y/o obtener los modelos reológicos que caracterizan a estas muestras.
3. Se compararon los comportamientos de las muestras con los modelos reológicos Newtoniano y Ostwald de Baile (pseudoplástico y dilatante).
4. Se seleccionó el modelo de mejor ajuste (R^2) para cada curva.
5. Los resultados del ajuste de las curvas (los coeficientes de los modelos matemáticos) se utilizaron para comparar los comportamientos reológicos del diésel antes y después del tratamiento magnético.

Resultados y discusión

Para determinar el comportamiento reológico de las muestras se analizaron las variaciones de los esfuerzos cortantes respecto a los gradientes de velocidad (curvas de flujo). La comparación de las curvas de flujo de las muestras con los modelos reológicos y los ajustes obtenidos se muestran en la figura 5 y en la tabla 2, respectivamente.

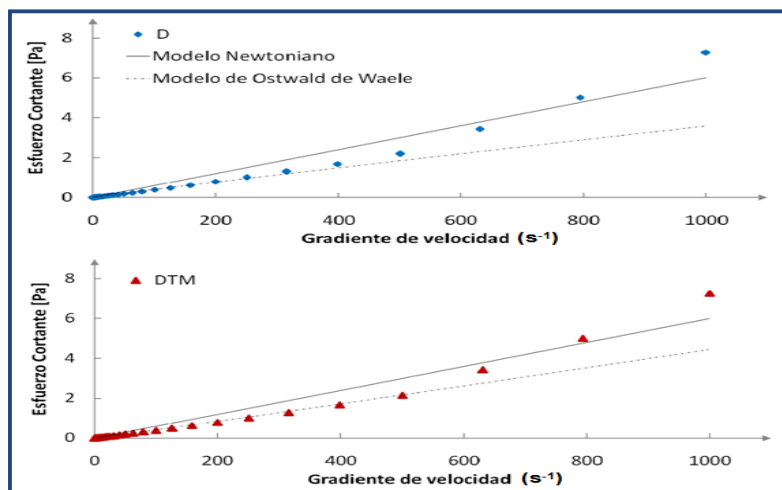


Fig.5 Curvas de flujo de las muestras de diésel sin tratamiento magnético (D) y de diésel tratado magnéticamente (DTM).

Tabla 2
Ecuaciones y coeficientes de ajuste de los modelos reológicos

Muestras	Modelos reológicos	Ecuación	R ²
D	Newtoniano	$\tau = 0,006 \dot{\gamma} \dots \dots \dots (6)$	0,953
	Pseudoplástico	$\tau = 0,004 \dot{\gamma}^{0,957} \dots \dots \dots (7)$	0,980
DTM	Newtoniano	$\tau = 0,006 \dot{\gamma} \dots \dots \dots (8)$	0,952
	Dilatante	$\tau = 0,003 \dot{\gamma}^{1,032} \dots \dots \dots (9)$	0,996

Los datos obtenidos se ajustaron a los modelos Newtonianos y Ostwald de Waele, para gradientes de velocidad desde 0 hasta 1000 s⁻¹, con un coeficiente R² mayor de 0,95; lo que se considera aceptable para ambos modelos. Con el modelo reológico Ostwald de Waele (mejor ajuste), el diésel se comportó como un fluido pseudoplástico antes del TM y como dilatante después del TM. Es importante destacar que a pesar de los elevados valores de R², a gradientes de velocidades mayores de 500 s⁻¹, los valores de esfuerzos cortantes se incrementan notablemente y no coinciden con las curvas de los modelos matemáticos analizados. Esto no ocurre a gradientes de velocidad menores de 500 s⁻¹ donde τ aumenta gradualmente y todos los puntos de la curva se ajustan al modelo. Por lo que se pueden identificar dos zonas en el comportamiento reológico de las muestras de diésel que dependen del gradiente de velocidad. Según Chhabra y colaboradores, los materiales reales a menudo pueden exhibir una combinación de dos o tres tipos de comportamientos reológicos /18/.

El punto de inflexión de la curva puede haberse producido a partir de un cambio en el régimen de flujo. Los estudios de la reología de los fluidos generalmente se realizan en régimen de flujo laminar, el cambio de régimen ocurre cuando el gradiente de velocidad excede cierto valor crítico, que depende de la naturaleza de los fluidos. En el flujo turbulento la viscosidad muestra un aparente aumento con el incremento del gradiente de velocidad, de forma similar a los fluidos dilatantes /19/.

Por lo explicado anteriormente, se dividieron las curvas de flujo en dos zonas para corroborar el efecto observado. Estas zonas se analizaron de forma

independiente para definir que modelos reológicos las caracterizan. Se le llamó zona 1 a la parte de la curva de flujo con valores de gradientes de velocidad desde 0 hasta 500 s^{-1} y zona 2 al resto de la curva hasta 1000 s^{-1} . Estos análisis se muestran en la figura 6.

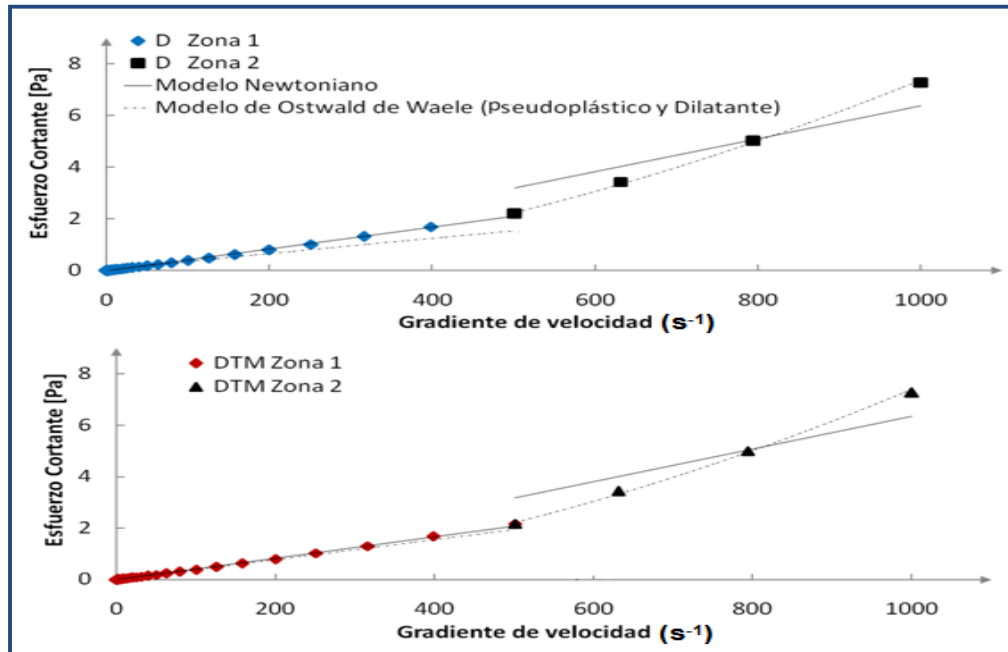


Fig. 6 Curvas de flujo de las muestras de diésel sin tratamiento magnético (D) y de diésel tratado magnéticamente (DTM), analizadas por zonas.

Para las dos muestras de diésel analizadas (D y DTM) la mejor correlación para la zona 1 es de una línea recta. Las muestras se ajustan perfectamente al modelo Newtoniano a gradientes de velocidad por debajo de 500 s^{-1} con coeficientes R^2 de 0,997 y 0,998; respectivamente (tabla 3). Estos resultados se corresponden con lo obtenido por Santos y colaboradores en 2011 /20/, para gradientes de velocidad por debajo de 300 s^{-1} .

Al analizar la zona 2, las muestras se comportaron como fluidos dilatantes, según el modelo Ostwald de Waele ($R^2= 0,997$) para ambas muestras (tabla 3), lo que coincide con lo planteado por Capelli en 2012 /21/. En la tabla 3 se muestra un resumen de los modelos, las ecuaciones y los coeficientes de ajuste de ambas muestras. Los ajustes obtenidos y la distribución de los puntos alrededor de la línea de tendencia, muestran que hay una mayor correspondencia si se analiza la curva por zonas que al analizarla de manera general.

Tabla 3
Ajuste de los modelos reológicos por zonas

Muestras		Comportamiento reológico	Ecuación	R ²
D	Zona 1	<u>Newtoniano</u>	$\tau = 0,004\dot{\gamma} \dots \dots \dots (10)$	<u>0,997</u>
		Pseudoplástico	$\tau = 0,004\dot{\gamma}^{0,924} \dots \dots \dots (11)$	0,979
	Zona 2	Newtoniano	$\tau = 0,006\dot{\gamma} \dots \dots \dots (12)$	0,852
		<u>Dilatante</u>	$\tau = 5 * 10^{-5}\dot{\gamma}^{1,719} \dots \dots \dots (13)$	<u>0,997</u>
DTM	Zona 1	Newtoniano	$\tau = 0,004\dot{\gamma} \dots \dots \dots (14)$	<u>0,998</u>
		Dilatante	$\tau = 0,003\dot{\gamma}^{1,011} \dots \dots \dots (15)$	0,996
	Zona 2	Newtoniano	$\tau = 0,006\dot{\gamma} \dots \dots \dots (16)$	0,847
		<u>Dilatante</u>	$\tau = 4 * 10^{-5}\dot{\gamma}^{1,741} \dots \dots \dots (17)$	<u>0,997</u>

En esta tabla 3, se subrayan los mejores ajustes y sus modelos matemáticos característicos. A partir de los resultados obtenidos por zonas, se puede afirmar que en la zona 1 ambas muestras (diésel antes y después del tratamiento magnético) se caracterizan por tener un comportamiento newtoniano. Para las dos muestras la ecuación del modelo reológico es la misma (ecuaciones 10 y 14).

En la zona 2, el diésel antes y después del TM se comportó como fluido dilatante según el ajuste al modelo Ostwald de Waele (ecuaciones 13 y 17). Los coeficientes que describen el modelo matemático dilatante para el diésel antes y después del tratamiento magnético son diferentes. Esta información se muestra resumida en la tabla 4.

Tabla 4
Parámetros del modelo reológico de las muestras de diésel analizadas antes (D) y después del tratamiento magnético (DTM) en la Zona 2

Muestras	K (Índice de consistencia)	n (Índice de flujo)
D	$5 * 10^{-5}$	1,719
DTM	$4 * 10^{-5}$	1,741
Diferencia (%)	20	1,260

Como se puede observar, existen diferencias entre los parámetros del modelo reológico dilatante del diésel antes y después del TM. El índice de consistencia

disminuyó un 20 % y el índice de flujo aumentó un 1,26 %, lo que evidencia que ocurrieron cambios estructurales en el diésel después del tratamiento magnético. Estos cambios se manifiestan a elevados gradientes de velocidad.

Los gradientes de velocidad típicos que se presentan en el proceso de atomización del combustible en los MCI van desde 1000 hasta 10 000 s⁻¹ [22]. En estos valores de gradientes de velocidad el diésel se comporta como un fluido dilatante, si sigue el mismo comportamiento que se muestra en la figura 6. Por lo tanto, con las ecuaciones de los modelos reológicos obtenidos en la zona 2 se puede determinar la viscosidad que tendría el diésel en las condiciones reales del proceso de atomización.

La viscosidad no newtoniana para los fluidos dilatantes (modelo Ostwald de Waele) se define por la siguiente ecuación según [23]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K * \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = K * \dot{\gamma}^{n-1} \dots\dots\dots (18)$$

En la ecuación 18 se puede observar que la viscosidad en los fluidos dilatantes es directamente proporcional al índice de consistencia y al gradiente de velocidad. Utilizando los valores de la tabla 4 y un gradiente de velocidad de 1000 s⁻¹, típico de los procesos de atomización de combustible; se obtuvo que la viscosidad del diésel sin tratamiento magnético fue de 7,18 mPa s y la del diésel tratado magnéticamente fue de 6,68 mPa s. Esto indica que la viscosidad del diésel, en las condiciones del proceso de atomización, disminuyó en un 6,96 % con el tratamiento magnético aplicado.

Lo anterior puede ser explicado si se considera que el tratamiento magnético provocó cambios en las interacciones físicas y químicas de los componentes del diésel. Estos cambios pueden ser a nivel molecular o estructural, pero inducen modificaciones en las asociaciones que forman los hidrocarburos en este tipo de compuestos (los llamados clústeres), disminuyendo sus tamaños.

Estas modificaciones, incluyendo los cambios en los modelos reológicos del diésel, también alteran los procesos de combustión en los que participan estos combustibles tratados magnéticamente, fundamentalmente en los MCI. Ejemplos positivos de estas modificaciones son: la reducción de las emisiones de gases contaminantes como el CO₂, los NO_x y el CO [17; 24-26], la disminución

de los índices de consumo y el aumento de la eficiencia térmica [14; 27], entre otros.

Conclusiones

- 1. Para definir los modelos reológicos que caracterizan al diésel con y sin tratamiento magnético fue necesario realizar los ajustes en dos zonas de las curvas de flujo, el punto de inflexión entre las dos zonas, en el que ocurre un cambio de comportamiento reológico en el diésel fue 500 s^{-1} .**
- 2. Las muestras de diésel antes y después del tratamiento magnético se comportaron como fluidos newtonianos hasta 500 s^{-1} y las ecuaciones de los modelos matemáticos de ambas muestras son iguales.**
- 3. A partir de 500 y hasta 1000 s^{-1} las muestras se comportaron como fluidos dilatantes, la ecuación del modelo matemático del diésel después del tratamiento magnético es diferente a la del diésel sin tratar.**
- 4. El tratamiento magnético a partir de 500 y hasta 1000 s^{-1} disminuyó un 20% el índice de consistencia y aumentó un $1,26 \%$ el índice de flujo de la ecuación del modelo dilatante del diésel. El tratamiento magnético provocó una disminución de un $6,96 \%$ en la viscosidad no newtoniana del diésel en las condiciones en que se desarrolla el proceso de atomización de los motores de combustión interna (1000 s^{-1}).**

Nomenclatura

B: inducción magnética (T)

B_{máx.}: inducción magnética máxima (T)

B_{mín.}: inducción magnética mínima (T)

CO: monóxido de carbono

CO₂: dióxido de carbono

CNEA: Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado

CEINPET: Centro de Investigaciones del Petróleo

D: diésel sin tratamiento magnético

DTM: diésel tratado magnéticamente

K: índice de consistencia

MCI: motores de combustión interna

n: índice de flujo

NO_x: óxidos de nitrógeno

R²: coeficiente de ajuste de las curvas a los modelos matemáticos

T: Tesla, unidad del Sistema internacional de Unidades de la inducción magnética

TM: tratamiento magnético

γ : gradiente de velocidad (s⁻¹)

τ : esfuerzo cortante (Pa)

η_p : viscosidad plástica (Pa s)

η : viscosidad no newtoniana (Pa s)

Bibliografía

1. RODRÍGUEZ TARRAGÓ, H. L., FALCÓN HERNÁNDEZ, J. AND ANGULO PALMA, H. J. "Comportamiento reológico de las emulsiones empleando productos de la pirólisis". *Tecnología Química*. 2015, vol 35, núm. 3, p. 343-353.
2. RODRÍGUEZ, M. O. Comportamiento reológico de disoluciones acuosas de surfactantes comerciales no iónicos. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 2009.
3. GARCIA, A. P. Desarrollo de nuevas metodologías espectrales para el control analítico de productos y procesos petroquímicos y farmacéuticos. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona, 2014.
4. OLIVERA FUJIWARA, E. "Energía y medio ambiente". *Revista Mexicana de Opinión Pública*. 2010, vol 6, núm. 9, p. 51-65.

5. GOVINDASAMY, P. Experimental investigations of Magnetically activated fuel on lean Burn combustion in a two stroke Spark ignition engine. Director: D. S. PhD Thesis. ANNA University, India, 2007.
6. PATEL, P. M., RATHOD, G. P. AND PATEL, T. M. "Effect of magnetic field on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine". *IOSRJEN*. 2014, vol 4, núm. 5, p. 28-34.
7. KUMAR, P. V., PATRO, S. K. AND PUDI, V. "Experimental study of a novel magnetic fuel ionization method in four stroke diesel engines". *IJMERR*. 2014, vol 3, p. 150-160.
8. GOVINDASAMY, P. AND DHANDAPANI, S. "Performance and emissions achievements by magnetic energizer with a single cylinder two stroke catalytic coated spark ignition engine". *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2013, vol 5, p. 21-24.
9. AKTAR, A. R., TIPOLE, P., BHOJWANI, V. AND DESHMUKH, S. "Effect of magnetic field strength on hydrocarbon fuel viscosity and engine performance". *IJMCA*. 2013, vol 1, núm. 7, p. 094-098.
10. JAIN, S. AND DESHMUKH, S. "Experimental Investigation of Magnetic Fuel Conditioner (MFC) in IC Engine". *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2012, vol 2, p. 27-31.
11. FARIS, A. S., AL-NASERI, S. K., JAMAL, N., ISSE, R., *et al.* "Effects of Magnetic Field on Fuel Consumption and Exhaust Emissions in Two-Stroke Engine". *Energy Procedia*. 2012, vol 18, p. 327-338.
12. KHALIL, A. H. R. A. AND HAMMOODI, H. S. "Effect of Magnetizing the Fuel on the Performance of an SI Engine". *Al-Rafidain Engineering*. 2011, vol 19, p. 84-90.
13. EL FATIH, F. AND SABER, G. "Effect of fuel magnetism on engine performance and emissions". *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2010, vol 4, núm. 2, p. 6354-6358.
14. RAKESH, T., RAO, G. V. AND SANKAR, P. K. "Fuel Ionization By Magnetic Field In Four Stroke SI Engine". *IJMCA*. 2015, vol 3, núm. 2, p. 038-042.
15. MEZGER, T. G. *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. edited by V.N.G.C. KG. Edtion ed. New York: Vincentz Network GmbH & Co KG, 2006. p.384, ISBN 3878701748.
16. SOFIA, M. C., HERNÁNDEZ, J. F. AND MARTÍNEZ, A. M. "Efecto del tratamiento magnético en emulsiones de petróleo Mesa 30 con diferentes emulgentes". *Tecnología Química*. 2010, vol 29, núm. 3, p.48-54.
17. ARIAS GILART, R., BERENQUER UNGARO, M., VÁZQUEZ NIGORENKO, J. A., SILVEIRA FONT, Y., *et al.* "Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible ". *Cuba: Medio Ambiente y Desarrollo*. 2016, núm. 30, p. 1-7.
18. CHHABRA, R. P. AND RICHARDSON, J. F. *Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications*. Edtion ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. p.436 ISBN 0750637706.
19. TADROS, T. F. *Rheology of dispersions: principles and applications*. Edtion ed.: John Wiley & Sons, 2011. 218 p. ISBN 3527632395.
20. SANTOS, N., ROSENHAIM, R., DANTAS, M., BICUDO, T., *et al.* "Rheology and MT-DSC studies of the flow properties of ethyl and methyl

- babassu biodiesel and blends". *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2011, vol 106, núm. 2, p. 501-506.
21. CAPELLI, A. Influência da faixa de taxas de deformação na precisão de caracterizações reológicas de fluidos. Tesis de Maestria. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São José do Rio Preto. 2012.
22. BARNES, H. A., HUTTON, J. F. AND WALTERS, K. *An introduction to rheology*. Edtion ed.: Elsevier, 1989. 201 p. ISBN 0080933696.
23. DÍAZ GARCÍA, A. AND GARCÍA ABREU, D. *Manual de hidráulica aplicada*. edited by E. ISPJAM. Edtion ed. Santiago de Cuba, 1989. p.270
24. KHAJURE, N. S., MANE, L., ATTAR, A., BHOJWANI, V., et al. "Reduction of Harmful Emission From Exhaust In IC Engine By Application of Magnetic Field on Fuel Line". *IJMCA*. 2014, vol 2, núm. 2, p. 59-63.
25. KUSHAL, C. AND BASAVARAJ, M. "Effect of Fuel Magnetism by Varying Intensity on Performance and Emission of Single Cylinder Four Stroke Diesel Engine". *IRJET*. 2015, vol 2, núm. 7, p. 1121-1126.
26. AL-RAWAF, M. A. "Magnetic Field Effects on Spark Ignition Engine Performance and its Emissions at High Engine Speeds". *Journal of Engineering and Development*. 2015, vol 19, núm. 4, p. 37-48.
27. BHOYE ANKIT, R., PATEL, M. P. H., PATEL, T. M. AND RATHOD, M. G. P. "Performance Analysis of Single Cylinder CNG Engine Under The Influence of Magnetic Fuel Energizer". *International Journal of Scientific Research*. 2016, vol 5, núm. 5, p. 679-681.