

ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD DE COMBUSTIBLES DIESEL

MATA MONTES, Carmen ⁽¹⁾; MARTINEZ MARTINEZ, Simón ⁽²⁾

PACHECO GALINDO, Carlos ⁽³⁾; ARMAS VERGEL, Octavio ⁽³⁾

octavio.armas@uclm.es

⁽¹⁾Universidad de Castilla La Mancha. Escuela de Ingeniería Minera e Industriales. Almadén. España.

⁽²⁾Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Monterrey. México.

⁽³⁾Universidad de Castilla La Mancha. Escuela de Ingeniería Industrial. Toledo. España.

RESUMEN

Conocer las propiedades de los combustibles diésel resulta de gran importancia para el análisis y la comprensión de fenómenos relacionados con los procesos de inyección, formación de la mezcla, combustión y emisión de compuestos contaminantes. Este trabajo describe un método de estimación del coeficiente isoentrópico de compresibilidad de combustibles diésel. Empleando una instalación para obtener tasas de inyección, se ha ensayado un diésel comercial (con 5.8% de biodiesel), un aceite vegetal hidrotratado (*hydrotreated vegetal oil, HVO*) y un combustible obtenido a partir de gas natural (*gas to liquid, GTL*) mediante un proceso Fischer Tropsch de baja temperatura. Variando la presión de inyección, regulando la temperatura del combustible, manteniendo constante la contrapresión en el interior del tasímetro y utilizando dos tipos de inyectores (de bobina electromagnética y piezoeléctrico), se han estimado experimentalmente los valores del coeficiente isoentrópico de compresibilidad para dichos combustibles. Adicionalmente, se ha determinado que el desfase inicial entre el pulso eléctrico de alimentación del inyector y la curva de tasa solo depende del tipo de inyector. Sin embargo, el desfase final entre el pulso eléctrico del inyector y la tasa depende sólo del inyector en el caso del inyector controlado con bobina electromagnética mientras que en el caso del inyector piezoeléctrico depende además de la presión de inyección a la que se trabaje.

Palabras clave: tasa de inyección, combustibles diésel, coeficiente de compresibilidad

1. Introducción

En trabajos previos [1, 2] se presentó detalladamente la configuración de una instalación para determinar las tasas de inyección con diferentes tipos de inyector y diferentes combustibles al trabajar variando parámetros del proceso de inyección (por ejemplo la presión y la duración de la inyección). En este trabajo, con un planteamiento experimental similar, se sigue la estela de los anteriores trabajos pero dando un paso más allá, ensayando combustibles de origen parafínico.

Para los investigadores y fabricantes de motores diésel es, en muchos casos de estudio, imprescindible el conocimiento de la tasa de inyección para tenerla en cuenta, por ejemplo en modelos termodinámicos de cálculo de liberación de calor, y de esa manera hacer una descripción de la evolución del proceso de combustión más precisa. En algunos trabajos, durante el diagnóstico termodinámico, no se tiene en cuenta el gasto másico de combustible entrando en el cilindro [3-5]. En otros trabajos, aunque se tiene información del levantamiento de aguja del inyector [6, 7], tampoco se tiene información del gasto másico de combustible entrando en el cilindro. En la actualidad, hay trabajos realizados, tanto en operación estacionaria [8] como en operación transitoria del motor [9], donde la información disponible del proceso de inyección es la señal del pulso eléctrico de alimentación del inyector.

La mayoría de los trabajos publicados hasta el momento que incluyen diagnóstico termodinámico, cuando tienen en cuenta la masa inyectada en el cilindro, lo hacen mediante modelos más o menos simples de tasa de inyección [10] o determinando experimentalmente la tasa en banco de inyección y luego acoplándola al modelo termodinámico al tener como referencia el registro de la señal eléctrica del inyector tanto en el banco de inyección como en el motor ensayado [11].

Actualmente, la inmensa mayoría de los motores diésel van alimentados por inyectores con comando electrónico y de ellos es fácil registrar la señal de alimentación eléctrica. Sin embargo, para aquellos investigadores que no posean sistemas de determinación de tasa de inyección, es complejo acoplar un modelo simple que la prediga si no se conoce el desfase inicial (d_1) o final (d_2) entre las señales de pulso eléctrico del inyector y la curva de tasa inyectada (Ver Figura 1).

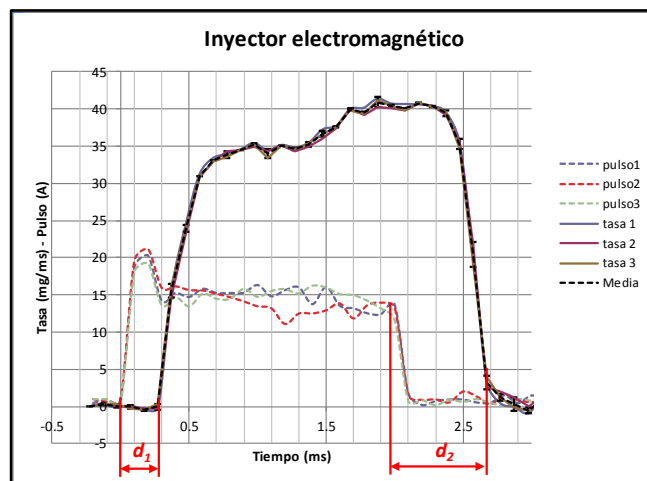


Figura 1: Desfases inicial (d_1) y final (d_2) entre las señales de energización del inyector y sus respectivas tasas de inyección. Ensayo realizado sobre un inyector con control electromagnético.

Tanto cuando se quiere conocer en detalle la operación de los sistemas de inyección (o solamente inyectores) [12, 13, 14], o cuando se quiere estudiar teóricamente la evolución del chorro diésel [15], resulta imprescindible el conocimiento de las propiedades del combustibles [16, 17].

Este trabajo se ha enfocado, por un lado, hacia la determinación experimental de la influencia de parámetros de inyección, tipos de inyectores y tipos de combustibles sobre los desfases existentes entre las señales de alimentación eléctrica del inyector y la curva de tasa de inyección así como sobre la posibilidad de estimar el coeficiente de compresibilidad de los combustibles usados, mediante una metodología que combina los datos experimentales con el cálculo de valores medios de coeficiente de

compresibilidad, a partir de la ecuación que define la tasa de inyección (ver ecuación 1) [18] y usando un indicador del tipo IAV EVI-2 [19].

$$\dot{m}_f(t) = \frac{A_T \Delta p(t)}{a} \quad (1)$$

Donde $\dot{m}_f(t)$ es el gasto másico de combustible (kg/s), A_T - es la sección del tubo (m^2), $\Delta p(t)$ es el incremento de la presión por encima de la presión en el volumen de la unidad hidráulica residual (Pa) y a es la velocidad del sonido en el combustible contenido en el volumen de la unidad hidráulica (m/s).

La velocidad del sonido depende de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre el combustible, de ahí que sea imprescindible conocer la velocidad del sonido cuando varían las condiciones de inyección para el cálculo del gasto másico inyectado.

La velocidad del sonido puede ser calculada mediante una expresión que la relaciona con otras propiedades del fluido en cuestión, tal y como se presenta en la ecuación 2:

$$a^2 = \frac{B}{\rho} \quad (2)$$

Donde B - es el módulo de compresibilidad y ρ - es la densidad del fluido.

En tareas de ingeniería de fluidos se suele trabajar con el módulo de compresibilidad isoentrópico B_S (ecuación 3) y el módulo de compresibilidad isoterma B_T (ecuación 4).

$$B_S = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_S \quad (3)$$

$$B_T = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (4)$$

Donde p – es la presión y ρ – es la densidad del fluido.

En términos generales, la relación entre B_T y B_S se puede expresar de acuerdo a la ecuación 5:

$$\frac{1}{B_T} = \frac{1}{B_S} + \frac{T\alpha^2}{\rho c_p} \quad (5)$$

Donde α – es el coeficiente isobárico de expansión térmica, c_p – es el calor específico a presión constante y T – es la temperatura.

Combinando las ecuaciones 2 y 5 se obtiene:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{a^2} + \frac{T\alpha^2}{c_p} \quad (6)$$

Solucionando la ecuación 6 para el caso isoterma, se obtiene la siguiente relación entre densidad y velocidad del sonido:

$$\rho(p, T) = \rho(p_0, T) + \int_{p_0}^p \frac{dp}{a^2} + T \int_{p_0}^p \left(\frac{\alpha^2}{c_p} \right) dp \quad (7)$$

A la derecha de la ecuación 7, el primer término representa la principal contribución y se puede obtener midiendo directamente la densidad a presión atmosférica. El segundo término se puede evaluar con promedios de la velocidad del sonido en la isoterma considerada. El último término solo representa un pequeño porcentaje con respecto al primer término, siendo muy pequeño para los combustibles. Este último está relacionado con la diferencia entre los calores específicos $c_p - c_v$, que es cercana a 0 ($c_p/c_v \approx 1$ para líquidos), por tanto, se puede despreciar en este caso [17, 20].

De este modo, si se determina la velocidad del sonido a en función de la presión p , a una temperatura constante T , y la densidad ρ es medida en el punto inicial ($p_0 = p_{atm}$), se puede resolver la ecuación 8 para cada isoterma, y con ella calcular los valores de la densidad a altas presiones. Finalmente, conociendo la velocidad media del sonido y la densidad del fluido, se puede estimar el módulo de compresibilidad isotermino medio haciendo uso de la ecuación 2.

2. Estimación del módulo de compresibilidad en combustibles diésel

Si en la ecuación 1 se considera el incremento de presión en el interior del tasímetro o indicador de tasa (Δp), como un valor constante, aunque en realidad se trata de un valor cuasi-estacionario, el resultado de integrar a ambos lados de la ecuación es el que se muestra en la ecuación 8:

$$m_{total} = \frac{A_t \overline{\Delta p} t_{iny}}{a} \quad (8)$$

Donde m_{total} – es la masa total de combustible inyectada durante el tiempo de inyección t_{iny} .

Dado que la masa total inyectada y el tiempo de inyección se pueden medir, si se conoce el $\overline{\Delta p}$ sería posible estimar la velocidad del sonido en el volumen donde se está inyectando el combustible.

De este modo, para poder obtener un valor aproximado de la velocidad del sonido hay que establecer un criterio para seleccionar el incremento de presión medio ($\overline{\Delta p}$) y el tiempo que dura este valor (t_{iny}). El criterio para determinar el valor de $\overline{\Delta p}$ en ambos inyectores fue el mismo: determinar dicho parámetro dentro del intervalo temporal donde dicho incremento de presión era más estable (condiciones cuasi-estacionarias) respecto de la presión a la cual está sometido el combustible antes de realizar el ensayo. Usando este procedimiento la velocidad del sonido estimada corresponde con los valores de presión y temperatura del combustible en el interior del indicador de tasa de inyección. Tanto la temperatura como la presión del combustible en el interior del indicador de tasa de inyección se registraron en todos los ensayos.

En este trabajo, disponiendo de los datos medidos en [17], se pudo constatar que para la presión del combustible usada en los ensayos de este trabajo ($P_{back} = 72$ bar) el efecto de la presión es despreciable si se compara con el valor de la densidad a presión atmosférica. De este modo, se ha decidido utilizar el valor de densidad a la temperatura correspondiente de cada ensayo, considerando la presión atmosférica. Para ello, se ha realizado la medida de la densidad de estos combustibles en un rango de temperaturas de 298 a 350 K a presión atmosférica, como se muestra en la Figura 2.

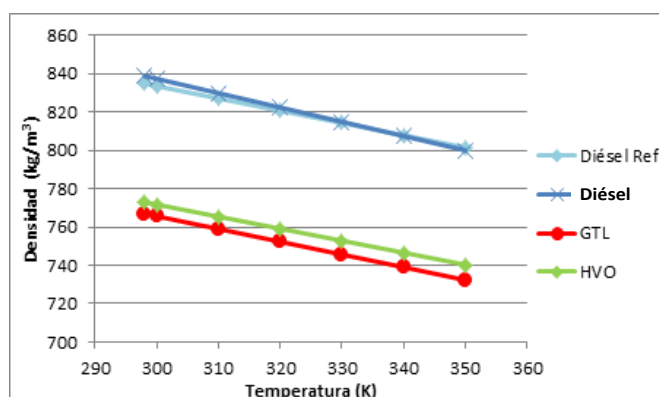


Figura 2: Densidad en función de la temperatura de los combustibles ensayados y de la referencia bibliográfica [17]

A partir de estos datos, se calculó la recta de ajuste para cada combustible que define el comportamiento de la densidad en función de la temperatura:

$$\rho_{DIESEL}(T) = 1061.5 - 0.7471 \cdot T \quad (9)$$

$$\rho_{GTL}(T) = 965.57 - 0.6664 \cdot T \quad (10)$$

$$\rho_{HVO}(T) = 959.89 - 0.6273 \cdot T \quad (11)$$

En la Figura 2 los valores densidad del combustible que aparecen denominados como Diésel Ref. corresponden con los del combustible descrito en [17]. Tal y como se puede apreciar, los combustibles diésel empleados en el presente trabajo y en el empleado como referencia bibliográfica fueron prácticamente iguales en densidad. Por esta razón, dicho combustible será utilizado para comparar los resultados de coeficiente de compresibilidad isoterma medio obtenidos mediante el método aquí propuesto.

Para la determinación de $\overline{\Delta p}$ se siguió un criterio similar durante el ensayo en ambos inyectores. En la Figura 3 se muestran, como ejemplo, curvas de $\Delta p_{(t)}$ de uno de los ensayos realizados con combustible diésel y cada tipo de inyector. En ambos casos se escogió para los cálculos el valor de $\overline{\Delta p}$ obtenido en el intervalo temporal correspondiente al inicio de la meseta de $\Delta p_{(t)}$ señalado en ambas curvas. Es durante este tiempo que el gasto másico se acerca más a la condición estacionaria en ambos inyectores.

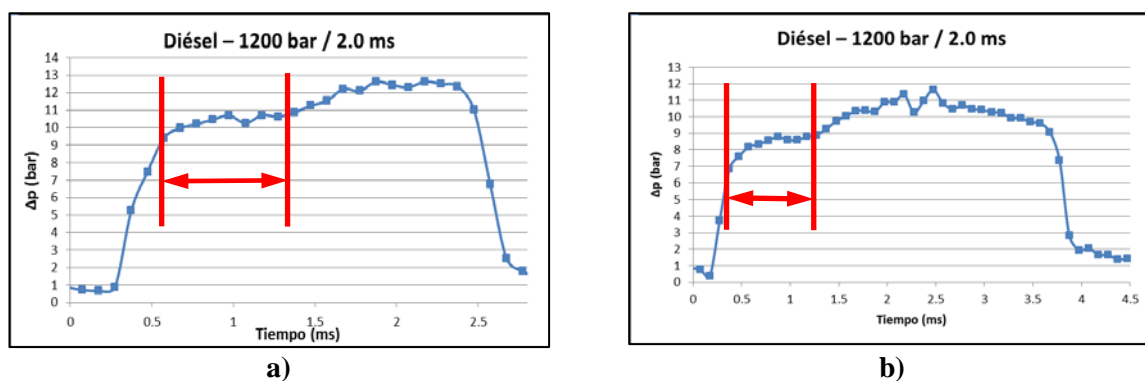


Figura 3: Curva de $\Delta p_{(t)}$ a) Inyector con bobina electromagnética, b) Inyector piezoeléctrico. Intervalo temporal elegido para determinar $\overline{\Delta p}$.

3. Trabajo experimental

3.1. Combustibles e inyectores ensayados

La Tabla 1 muestra las principales características de los combustibles ensayados. Como combustible diésel usado como referencia se empleó un combustible comercializado por CEPSA. El GTL, suministrado por SASOL, es un combustible sintético parafínico obtenido a partir de gas natural mediante un proceso Fischer Tropsch de baja temperatura. El HVO, suministrado por NESTE OIL, es un combustible también parafínico pero obtenido a través de la hidrogenación de aceite vegetal.

Tabla 1: Propiedades de los combustibles

Propiedad	Diésel	GTL	HVO
Fórmula molecular	$C_{14.62}H_{26.87}O_{0.08}$	$C_{16.89}H_{35.77}$	$C_{13.95}H_{28.70}$
Peso molecular (g/mol)	203.7	238.9	197.63
Ratio H/C	1.84	2.12	2.06
Dosado estequiométrico	1/14.45	1/14.95	1/14.71
C (% w/w)	86.14	84.82	84.68
H (% w/w)	13.20	15.18	14.52
O (% w/w)	0.66	0	0
Densidad a 15°C (kg/m ³) ^{a)}	845	774	780
Viscosidad a 40°C (cSt) ^{b)}	2.51	2.34	2.99
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	42.43	44.03	43.95

POFF (°C)	-13	-7	-21
Lubricidad (WS1.4) (µm)	237	211	334
Número de cetano	54.2	> 73	94.8

a) EN ISO 12185, b) EN ISO 3104, c) EN 51123, d) EN 116, e) EN ISO 12156

Se ensayaron dos inyectores diferentes, uno con bobina electromagnética y otro piezoeléctrico. El inyector controlado con bobina electromagnética posee una tobera tipo VCO con cinco orificios de diámetro 0.284 mm, fabricado por Bosch con referencia 0 986 435 014. El inyector piezoeléctrico posee una tobera con seis orificios de 0.125 mm, fabricado por Bosch con referencia 0 445 115 007. Ambos inyectores son empleados en vehículos ligeros diésel con sistema de inyección de rail común (*common rail*).

3.2. Plan de ensayos

La Tabla 2 muestra el plan de ensayos realizado para la determinación del efecto de los parámetros de inyección (presión y duración de la energización del inyector), los combustibles y los inyectores sobre los desfases d_1 y d_2 y para la estimación del coeficiente de compresibilidad isoterma medio. Para todo el estudio la presión del combustible en el interior del indicador de tasa de inyección (P_{back}) se mantuvo en 72 bar. El rango de presión elegido para los ensayos se corresponde con el funcionamiento de vehículos ligeros entre ralentí y plena carga del motor.

Tabla 2: Plan de ensayos

Presión inyección (bar)	Tiempo de energización (µs)	Repeticiones	P_{back} (bar)	Temperatura (°C) ^{a)}	Combustible
400	500, 1000, 1500, 2000	3	72	20 y 40	Diésel GTL HVO
600					
800					
1000					
1200					

a) A la entrada de la bomba de alta presión

3.2. Instalación experimental

La Figura 4 muestra un esquema de la instalación empleada para los ensayos.

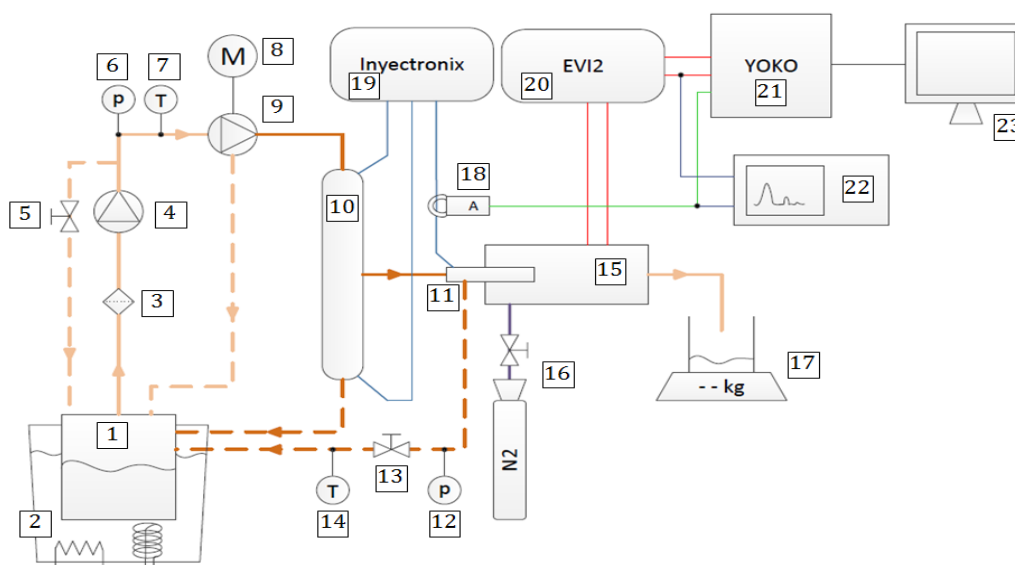


Figura 4: Esquema del banco de medida de tasas de inyección. 1- Depósito de combustible, 2- Baño térmico con sistema de resistencia eléctrica y dedo frío, 3- Filtro de combustible, 4- Bomba de baja

presión, 5- Válvula de bola (retorno bomba de baja presión), 6- Manómetro, 7- Termopar y lector, 8- Banco de pruebas, 9- Bomba de alta presión, 10- Raíl común, 11- Inyector, 12- Manómetro, 13- Válvula de bola (retorno de inyector), 14- Termopar y lector, 15- Indicador de tasa de inyección, 16- Botella de nitrógeno y manorreductor, 17- Balanza de precisión, 18- Pinza amperimétrica, 19- Unidad de control de la inyección, 20- Unidad de control del indicador de tasa de inyección, 21- Cadena de adquisición de datos, 22- Osciloscopio, 23- Ordenador

4. Resultados y discusión

4.1. Efecto combinado de parámetros de inyección y combustibles sobre los desfases d_1 y d_2 .

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la evolución de la tasa de inyección de combustible para el combustible diésel con ambos inyectores, al variar la presión de inyección a de tiempo de energización constante (Figura 5a y c) y al variar los tiempos de inyección a presión de inyección constante (Figura 5b y d).

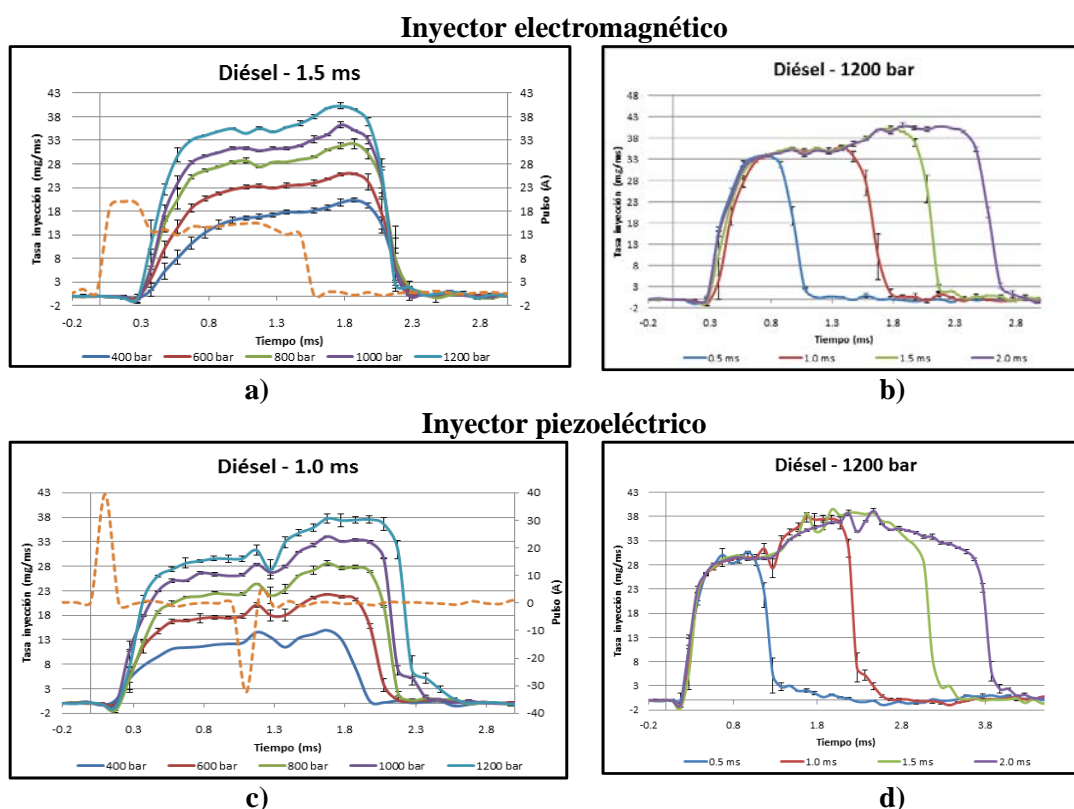


Figura 5: Tasa de inyección a) y b) Inyector electromagnético, c) y d) Inyector piezoeléctrico.

Los resultados de tasa muestran, en ambos tipos de inyectores, que el gasto másico aumenta notablemente a partir de que se ha dejado de energizar el inyector y la aguja del mismo comienza a bajar hasta cerrarse completamente. Resulta interesante ver que, en el caso del inyector piezoeléctrico, al finalizar la energización del inyector, se produce una alteración en el gasto másico debido al cambio que sufre el elemento piezoeléctrico, una vez se termina la energización del inyector. Ese cambio se trasmite a través del fluido y en ello influye el módulo de compresibilidad del fluido. Los resultados con los combustibles GTL y HVO son similares en tendencia a los obtenidos con el combustible diésel.

En la Figura 5 se aprecia también que, independientemente del tipo de inyector, para cualquier presión de inyección a tiempo de energización constante y cualquier tiempo de energización a presión de inyección constante, el desfase d_1 prácticamente no varía. Esta misma tendencia se observa con el d_2

para el inyector electromagnético para la variación de presión a tiempo de energización constante. Sin embargo, con el inyector piezoeléctrico, el desfase d_2 aumenta con el aumento de la presión de inyección.

La Figura 6 muestra, en mayor grado de detalle, los desfases d_1 para ambos inyectores, con los tres combustibles, todas las condiciones de operación y alimentando la bomba de alta presión a las temperaturas ensayadas. Tal y como se puede apreciar el desfase d_1 depende fundamentalmente del tipo del inyector. El desfase d_1 para el inyector electromagnético ensayado es del orden 0.25 ± 0.03 ms, mientras que para el inyector piezoeléctrico es del orden de 0.2 ± 0.03 ms. Con el cambio de combustible no se observan diferencias significativas.

La Figura 7 muestra el desfase d_2 para ambos inyectores, con los tres combustibles, todas las condiciones de operación y alimentando la bomba de alta presión a las temperaturas ensayadas. Para el inyector electromagnético el desfase d_2 es del orden de 0.7 ms para tiempos de 1 ms de energización, disminuyendo hasta valores de 0.5 ms cuando el tiempo de energización se acerca a 0.5 ms.

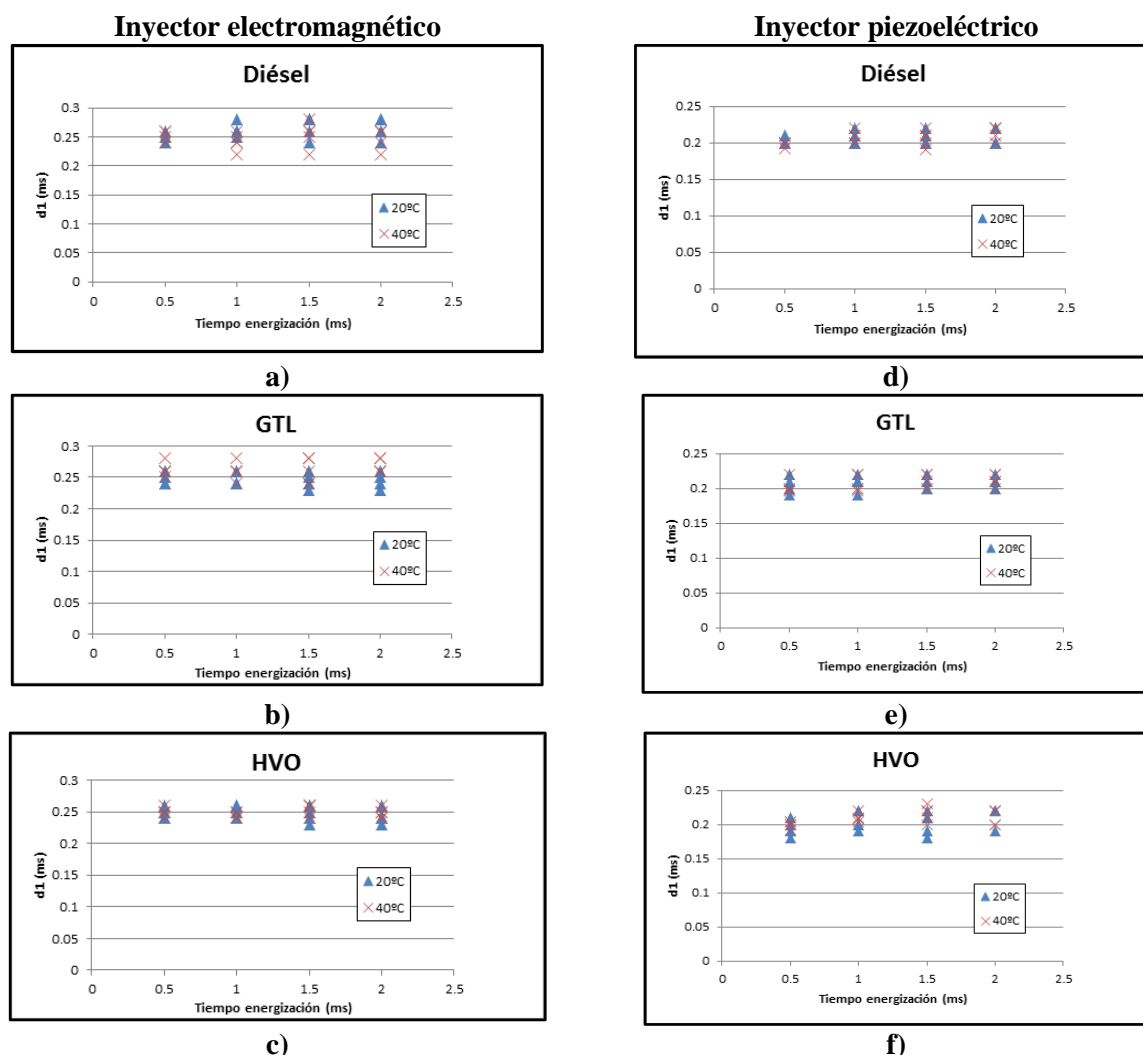


Figura 6: Desfase entre el pulso de energización del inyector y la tasa de inyección (d_1). Inyector electromagnético (a, b, c) e inyector piezoeléctrico (d, e, f).

El comportamiento del desfase d_2 en el inyector piezoeléctrico depende claramente del tiempo de energización (a mayor tiempo mayor desfase d_2 con un comportamiento prácticamente lineal). Este efecto aumenta en la medida que aumenta la presión de inyección. Tal y como muestra la Figura 7, con el aumento del tiempo de energización los desfases d_2 van desde 0.7 ms con tiempo de energización 0.5 ms hasta 1.6 ms con tiempo de energización 2 ms a 400 bar y hasta 2 ms a 1200 bar

con tiempo de energización 2 ms. Al igual que ocurriría con el desfase d_1 , en la Figura 7 se observa que el desfase d_2 presenta similares tendencias independientemente del combustible.

4.1. Estimación del coeficiente de compresibilidad de los combustibles ensayados.

La Figura 8 muestra los valores de coeficientes de compresibilidad estimados a partir de los ensayos realizados con los dos inyectores y en todas las condiciones de operación para ambos inyectores. En las figuras se ha añadido los ajustes obtenidos y sus coeficientes de correlación.

Tal y como se puede apreciar, los valores de módulo de compresibilidad obtenidos para cada combustible son muy similares entre inyectores ensayados. El módulo de compresibilidad es una característica inherente al combustible, la presión y la temperatura por lo que la influencia del tipo de inyector debe ser despreciable en este caso de estudio.

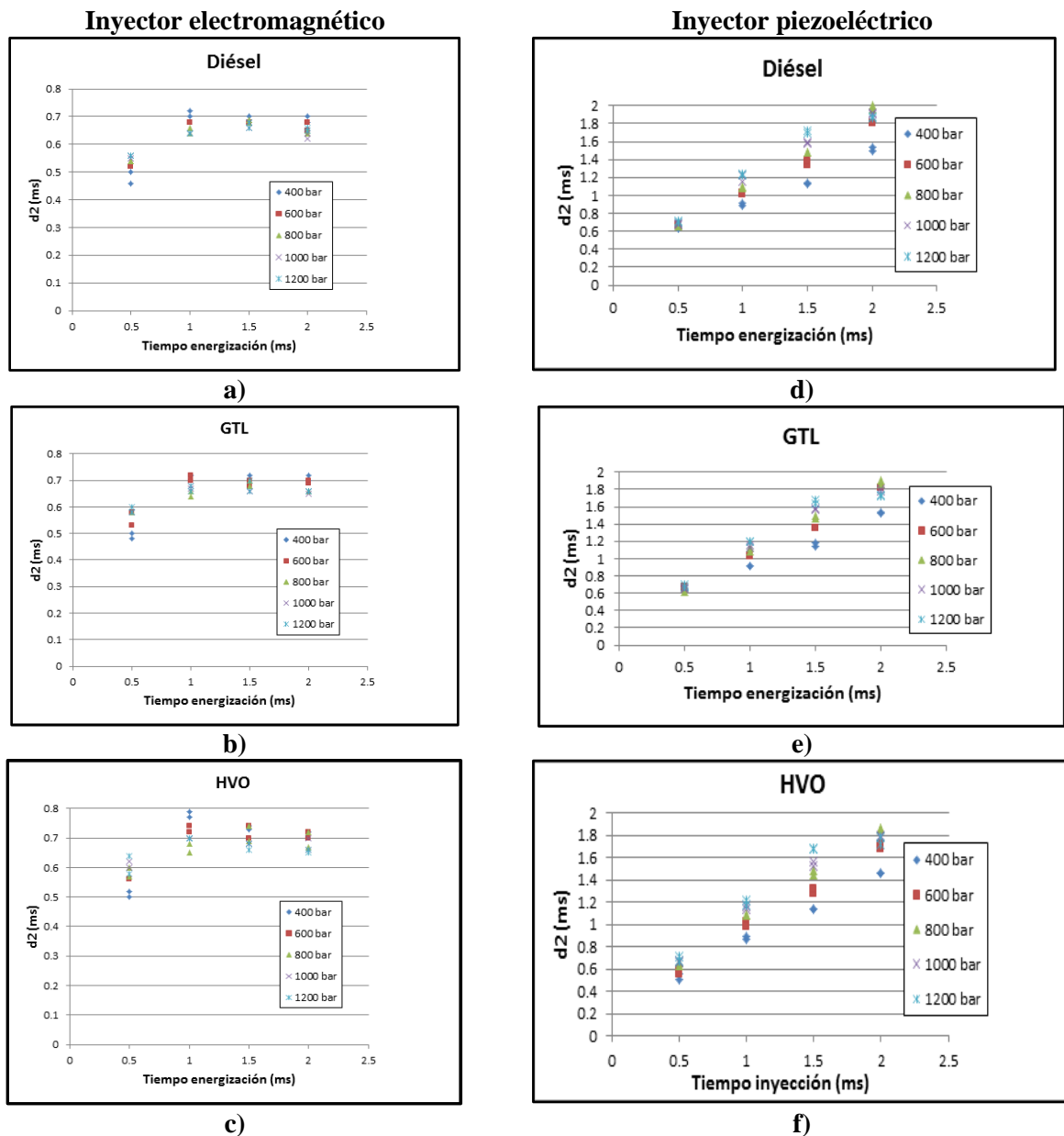


Figura 7: Desfase entre el pulso de energización del inyector y la tasa de inyección (d_2). Inyector electromagnético (a, b, c) e inyector piezoeléctrico (d, e, f).

Es por ello que en la Figura 9 se han integrado los valores determinados para cada combustible independientemente del inyector usado. Tal y como se puede apreciar el ajuste lineal realizado al usar

todos los ensayos de un mismo combustible y ambos inyectores presenta igualmente un coeficiente de correlación R^2 relativamente alto.

A modo de comprobación, empleando los datos que presentan los autores de la referencia [17], en la Figura 10 se presentan los resultados de los ajustes para el combustible diésel de dicho trabajo junto a los resultados de los combustibles ensayados en este trabajo. Como se puede observar el grado de coincidencia entre los valores de coeficiente de compresibilidad entre los combustibles diésel usados en los dos trabajos: el presente y el de la mencionada referencia bibliográfica.

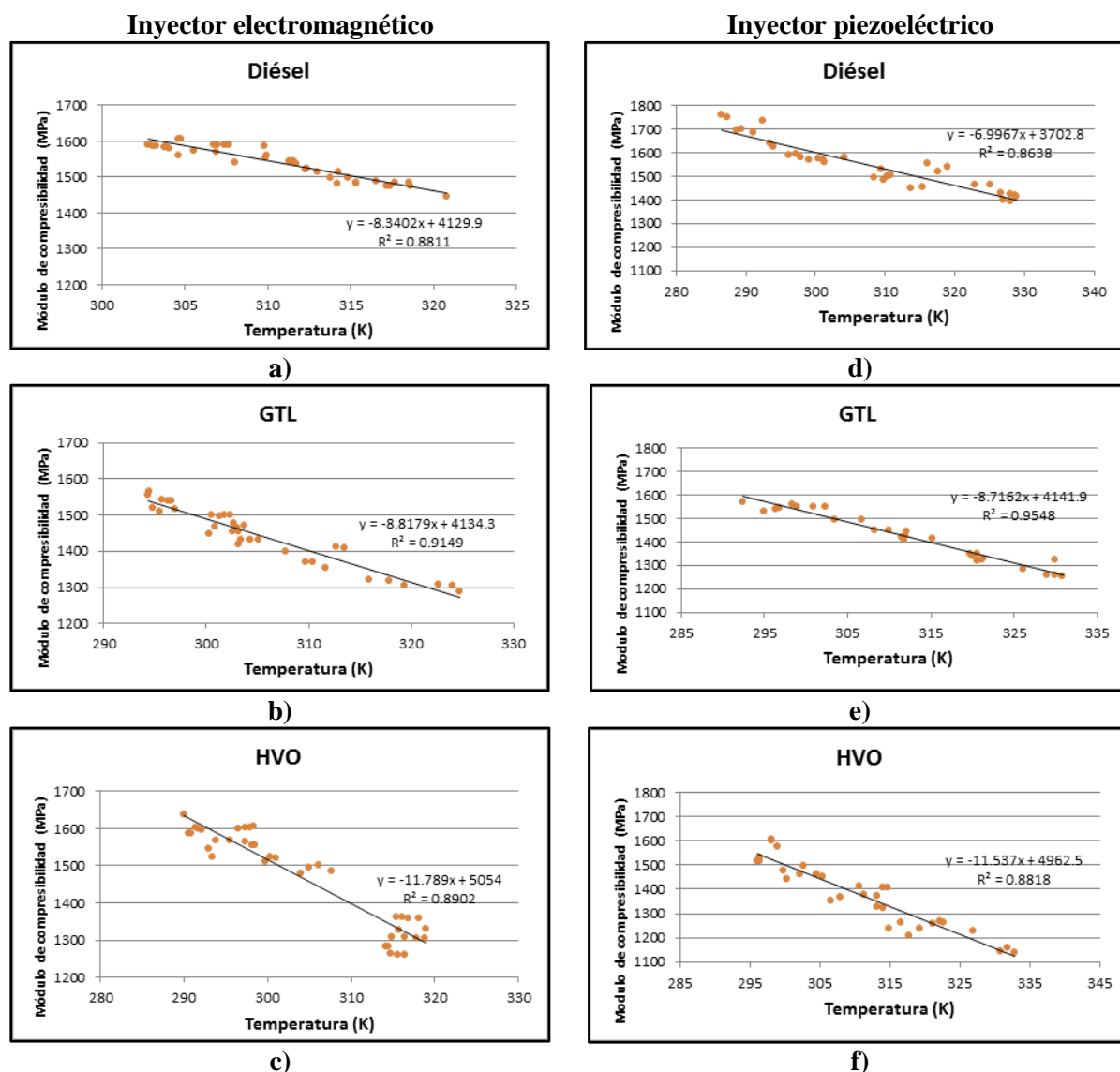


Figura 8: Módulo de compresibilidad de los diferentes combustibles determinados a partir de los ensayos con ambos inyectores. Inyector electromagnético (a, b, c) e inyector piezoelectrico (d, e, f).

Al comparar los resultados aquí obtenidos (Figura 10) con los presentados en la referencia [16] (ver mezcla del 25% biodiesel y 75% diésel (ensayada a 323 K), combustible más parecido al combustible diésel ensayado en el presente trabajo con 5.8% de biodiesel) se observa que el método aquí propuesto estima un coeficiente de compresibilidad medio de aproximadamente 1450 MPa, mientras que la medida en la referencia [16] (para 323 K y 70 bar) es de 1400 bar, es decir un error del 4%, aun cuando la proporción de biodiesel es diferente.

Asimismo, en la Figura 10 también se ofrecen valores estimados de coeficientes de compresibilidad para los dos combustibles parafínicos estudiados. Si se comparan los valores correspondientes al combustible HVO con los obtenidos en la referencia [16] (punto de comparación 323 K y 70 bar en

dicha referencia), se observa que el coeficiente de compresibilidad isoterma medio medido es del orden 1200 bar, mientras que en el presente trabajo se obtuvo un valor en torno a 1220 bar, es decir un error del 2%.

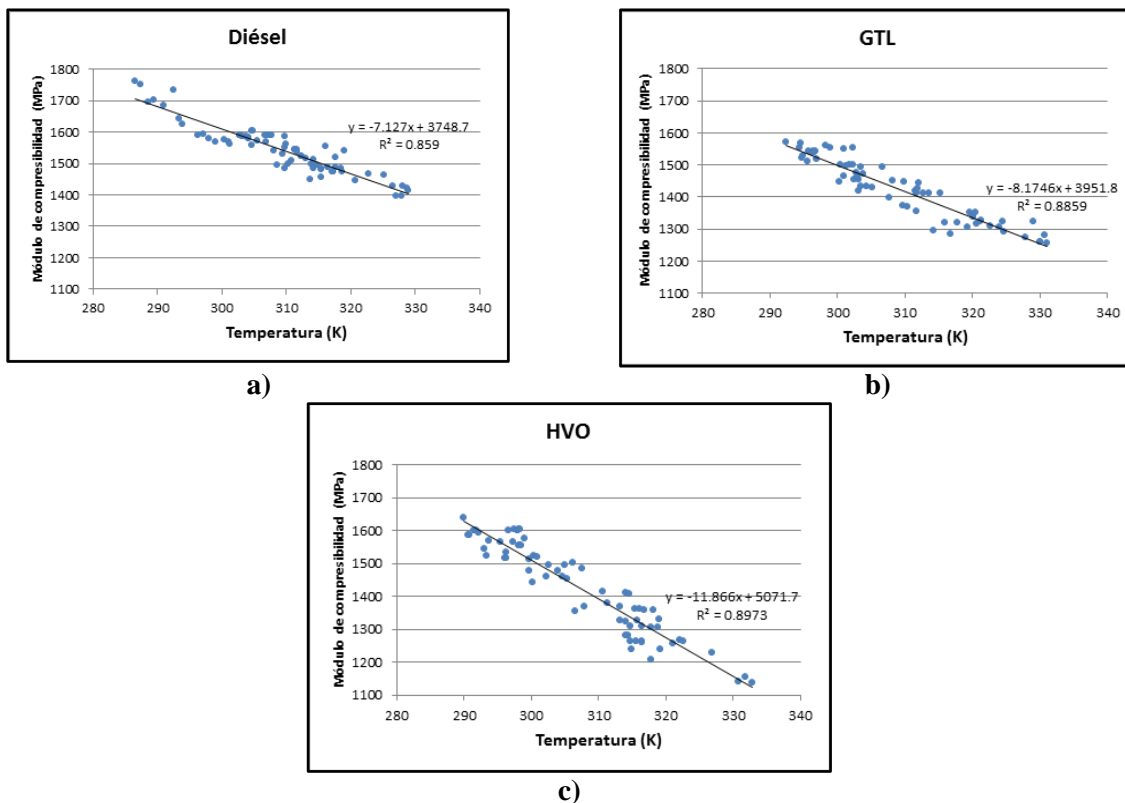


Figura 9: Módulo de compresibilidad isoterma medio de los diferentes combustibles determinados a partir de los ensayos con ambos inyectores.

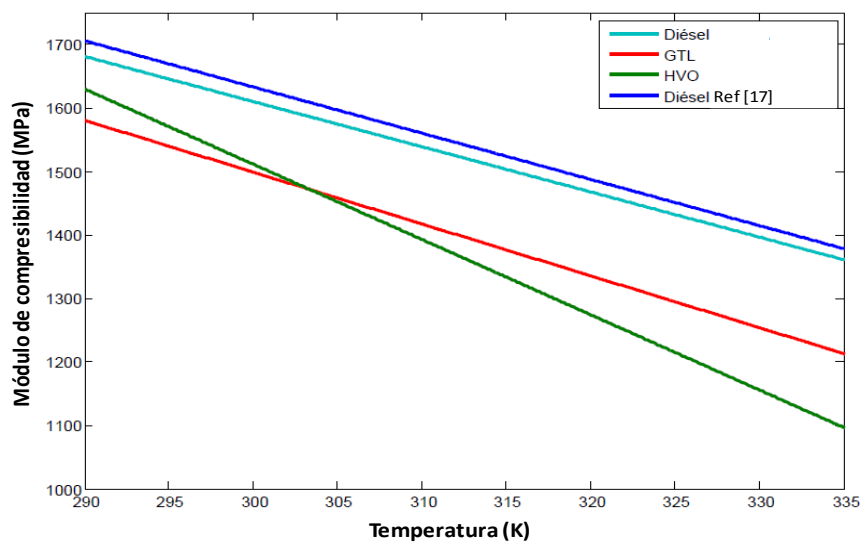


Figura 10: Módulo de compresibilidad estimado para los diferentes combustibles en el rango de 290-335 K y presión de 72 bar.

5. Conclusiones

El trabajo realizado ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- En el rango de presiones y tiempos de inyección (típicos del trabajo con los motores de vehículos ligeros diésel) y los tipos de inyectores y combustibles estudiados, el desfase inicial (d_1) entre la señal de energización del inyector y la curva de tasa es independiente del modo de operación y del combustible ensayado, solo depende del tipo de inyector.
- Para las condiciones de ensayo antes mencionadas, se ha detectado que el desfase posterior, entre el fin de la señal de energización y el fin de la curva de tasa, sobre todo en el inyector piezoeléctrico, es dependiente del tiempo de energización. Esta dependencia es más acusada en la medida que aumenta la presión de inyección.
- Se ha desarrollado un método relativamente simple de estimación del valor medio del coeficiente de compresibilidad isoterma a partir de una instalación para la medida de tasa de inyección.
- Los valores estimados de coeficiente de compresibilidad para el combustible diésel y HVO comparados con los valores obtenidos por otros autores difieren en el rango de 2-4%, por lo que este método se considera válido para ser usado como método de estimación del mencionado parámetro característico del combustible.

6. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha la financiación al proyecto COMBALT2. Asimismo, agradecen la cesión de los combustibles GTL y HVO a las empresas SASOL y NESTE OIL respectivamente, así como el apoyo logístico ofrecido por la empresa Turbo-inyección Alonso. Finalmente, los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México y a la financiación del proyecto PAICYT IT 647-11 por la estancia del Prof. Simón Martínez Martínez durante la realización de los ensayos.

7. Referencias

- [1] Martínez-Martínez, S., Armas, O., Mata, C. Efecto de parámetros de inyección diésel sobre la entrega de combustible empleando un inyector con bobina electromagnética. XVII Congreso Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Memorias del Congreso, 19 al 21 de septiembre, Salamanca, Guanajuato, México. ISBN 978-607-95309-6-9. pp. 13-87-1394. 2012.
- [2] Armas, O., Mata, C., Martínez-Martínez, S. Effect of diesel injection parameters on instantaneous fuel delivery using a solenoid-operated injector with different fuels. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, N° 64, pp. 9-21. Septiembre, 2012.
- [3] Woschni, G. Computer Programs to Determine the Relationship between Pressure Flow, Heat Release, and Thermal Load in Diesel Engines. SAE paper 650450. 1965.
- [4] Krieger, R.B., Borman, G.L. The Computation of Apparent Heat Release for Internal Combustion Engines. ASME paper 66-WA/DGP-4. 1966.
- [5] Gatowski, J.A., Balles, E.N., Chun, K.M., Nelson, F.E., Ekchian, J.A., Heywood, J.B. Heat Release Analysis of Engine Pressure Data. SAE paper 841359. 1984.
- [6] Armas, O., Ballesteros, R., Martos, F.J., Agudelo, J.R. Characterization of light duty Diesel engine pollutant emissions using water-emulsified fuel. Fuel 84, 1011–1018. 2005.
- [7] Armas, O., Yehliu, K., Boehman, A.L. Effect of alternative fuels on exhaust emissions during diesel engine operation with matched combustion phasing. Fuel 89, 438–456. 2010.

- [8] Martínez, J.D., Rodríguez-Fernández, J., Sánchez-Valdepeñas, J., Murillo, R., García, T. Performance and emissions of an automotive diesel engine using a tire pyrolysis liquid blend. *Fuel* 115, pp. 490-499. 2014.
- [9] Armas, O., García-Contreras, R., Ramos, A., López, A.F. Impact of Animal Fat Biodiesel, GTL, and HVO Fuels on Combustion, Performance, and Pollutant Emissions of a Light-Duty Diesel Vehicle Tested under the NEDC. *Journal of Energy Engineering*, DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000237.
- [10] Payri, F., Armas, O., Desantes, R., Leiva, A. Modelo termodinámico para el diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diésel de inyección directa. III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Habana, Cuba. Septiembre 1997.
- [11] Benajes, J., Molina, S., Novella, R., Amorim, R. Study on Low Temperature Combustion for Light-Duty Diesel Engines. *Energy Fuels*, 24, 355–364. 2010.
- [12] Lapuerta, M., Armas, O., Ballesteros, R., Fernández, J. Diesel emissions from biofuels derived from Spanish potential vegetable oils. *Fuel* 84, 773–780. 2005.
- [13] Szybist, J., Morris, D., Boehman, A.L., Esen, E. Diesel fuel formulation effects on injection timing and emissions. *ACS Division of Fuel Chemistry, Preprints*, 48 (1), pp. 428-429. 2003.
- [14] Payri, R., Climent, H., Salvador, F.J., Favennec, A.G. Diesel injection system modelling. Methodology and application for a first-generation common rail system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 218 (1), pp. 81-91. 2004.
- [15] Payri, R., Salvador, F.J., Gimeno, J., Bracho, G. Effect of fuel properties on diesel spray development in extreme cold conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222 (9), pp. 1743-1753. 2008.
- [16] Lapuerta, M., Agudelo, J.R., Prorok, M., Boehman, A.L. Bulk modulus of compressibility of diesel/biodiesel/HVO blends. *Energy and Fuels* 26 (2), pp. 1336-1343. 2012.
- [17] Payri, R., Salvador, F.J., Gimeno, J., Bracho, G. The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels. *Fuel* 90 (3), pp. 1172-1180. 2011.
- [18] W. Bosch. The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection. SAE paper 660749. DOI: 10.4271/660749. 1966.
- [19] R. Lillington. A Review of Heavy Duty Diesel Injector Characterization. http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/pg/students/esrjar/research/redacted_15-6-11_a_review_of_the_existing_literature_on_injector_valve_transfer_function_and_performance_analysis.pdf.
- [20] Boehman, A.L. The Impact of the Bulk Modulus of Diesel Fuels on Fuel Injection Timing, 2004. *Energy & Fuels*, 18, 1877-1882. 2004.