

# INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN COMBUSTIBLE Y ESTADO DE LOS INYECTORES SOBRE EL RENDIMIENTO Y EMISIÓN DE CONTAMINANTES DEL MOTOR DIÉSEL

Ricardo Paz Zeballos\*

## Resumen

El estudio comparativo se circunscribe a medir la variabilidad en la potencia del motor diésel y la emisión de contaminantes emitidos al medio ambiente, evaluando a diferentes presiones de inyección del combustible el funcionamiento del motor, y el estado de las toberas de inyección cuando éstas no garantizan una correcta atomización del combustible en la cámara de combustión del motor.

Los resultados muestran que evidentemente una incorrecta regulación de la presión de inyección del combustible influye en la potencia del motor y por lo tanto en el par proporcionado por el mismo, además una defectuosa condición de las toberas de inyección (obstrucción parcial o total) ocasiona pérdidas de potencia y una combustión incompleta, si bien puede reducir la generación de NO y NOx contribuye a la generación de otros tipos de contaminantes como el CO, MP y HC sin quemar, que se expulsan al medio ambiente.

**PALABRAS CLAVES:** Presión de inyección, toberas, ángulo de cigüeñal, potencia, momento torsor, combustión por compresión, motor diésel, Materia particulada (hollín), emisiones gaseosas de escape.

## Abstract

The comparative study was confined to measure the variability in diesel engine power and the emission of pollutants emitted into the environment by evaluating different fuel injection pressures engine operation, and the state of the injection nozzles when they do not guarantee proper atomization of the fuel in the combustion chamber of the engine.

The results clearly show that improper regulation of fuel injection pressure influences engine power and thus the torque provided by the same, also a defective condition of the injection nozzles (partial or total obstruction) causes losses power and incomplete combustion, while it may reduce the generation of NO and NOx contributes to the generation of other pollutants such as CO, PM and unburned HC which are discharged into the environment.

**KEYWORDS:** Pressure injection nozzles, crank angle, power, torque, fuel compression diesel engine, particulate matter (soot), exhaust gas emissions.

## Resumo

O estudo comparativo foi confinado para medir a variabilidade na potência do motor diesel e as emissões de poluentes emitidos para o ambiente por avaliar operação diferente pressões de injeção de combustível do motor, eo estado dos bicos de injeção quando eles não garantem a atomização adequada do combustível na câmara de combustão do motor.

Os resultados mostram claramente que a regulação imprópria de pressão de injeção de combustível influencia a potência do motor e, portanto, o torque fornecido pelo mesmo, também um estado defeituoso dos injetores (obstrução parcial ou total) provoca perdas energia e de combustão incompleta, enquanto que pode reduzir a geração de NO e NOx contribui para a geração de outros poluentes tais como CO, PM e HC não queimado que são descarregados para o meio ambiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Bicos de injeção de pressão, ângulo de manivela, potência, torque, compressão de combustível do motor diesel, material particulado (fuligem), as emissões de gases de escape.

**Article History:** Received 24 september 2015. Style revision 30 september 2015. Accepted 02 october 2015

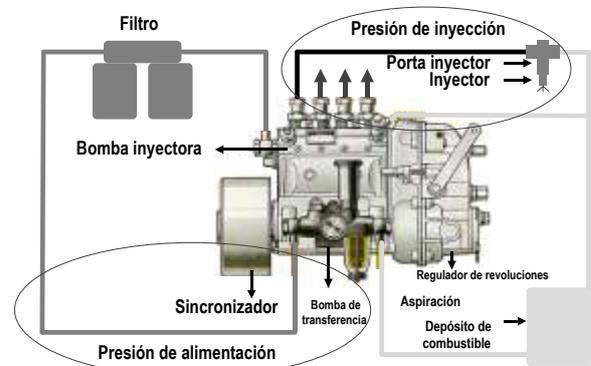
## INTRODUCCIÓN

El rendimiento de un motor diésel en cuanto a potencia y momento torsor, además de la emisión de gases contaminantes y hollín que produce su funcionamiento, son aspectos importantes que deben ser considerados continuamente. Por esta razón un motor diésel, tiene que mantener todos sus sistemas y componentes trabajando en buen estado para proporcionar una mejor prestación, evitando de esta forma, la disminución en su potencia y el incremento de emisiones contaminantes.

Bajo esa perspectiva, en el presente trabajo se exponen resultados prácticos del rendimiento de un motor diésel de inyección directa y su producción de emisiones contaminantes, cuando los *inyectores*<sup>1</sup>, importantes componentes del sistema de alimentación de combustible funcionan normalmente, o de forma defectuosa.

Analizando también la *presión de inyección* y las *condiciones de estado de las toberas de inyección* (orificios muy pequeños de 0,1 a 0,3 mm) que principalmente por filtración deficiente del combustible, o la generación de hollín (combustión incompleta) pueden obstruirse parcial o totalmente.

En la figura 1, se describe el sistema de alimentación de combustible para el motor diésel.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1: Sistema de alimentación de combustible, inyección directa con bomba en línea

El inyector, es uno de los componentes principales del sistema de alimentación, y tiene la función de introducir el combustible desde la bomba inyectora hasta la cámara de combustión en condiciones de presión y pulverización adecuada para que la reacción llegue a completarse.

En un motor de encendido por compresión MEC (motor diésel), el combustible se inyecta casi al final de la carrera de compresión y llega procedente de la bomba al inyector a muy alta presión, con el fin de conseguir una elevada velocidad del chorro que penetra en el aire y se fragmenta en pequeñas gotas dentro de la cámara de combustión, figura 2, facilitando así, el proceso de mezcla

<sup>1</sup> La función principal de los inyectores es la introducción apropiada del combustible hacia el interior de la cámara de combustión, con la finalidad de producir una reacción completa del combustible, y por la cual se consiga la máxima potencia posible con la mínima emisión de contaminantes al medio ambiente.

y aumentando la velocidad de combustión, a través de inyectores con toberas de uno o varios orificios y escasa sección de paso.

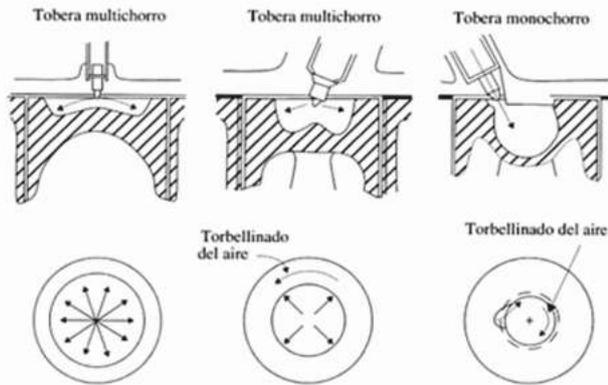
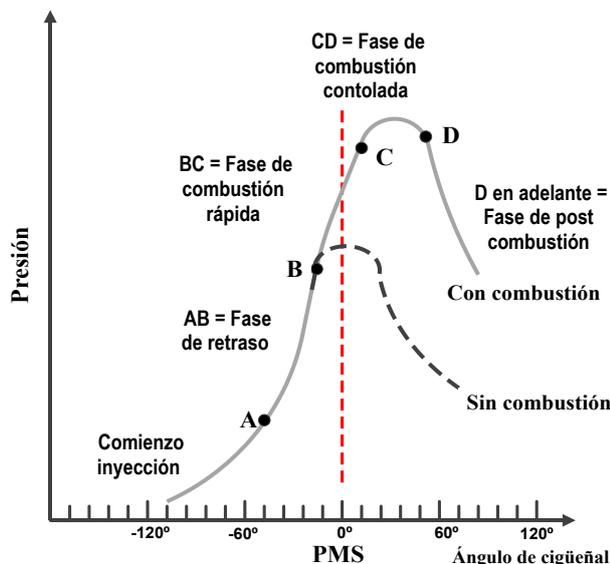


Figura 2: Diferentes formas de inyección de combustible dentro de la cámara de combustión

En los motores diésel de inyección directa hay un inyector por cilindro con uno o varios orificios y la dirección de los chorros de combustible está diseñada para que se distribuya adecuadamente dentro de la cámara de combustión, facilitando así, el proceso de mezcla con el aire para una combustión rápida. Durante la inyección, la presión y temperatura del aire están por encima de los valores correspondientes al punto de ignición del diésel, causando la combustión espontánea de una fracción de la mezcla aire-combustible, después de un tiempo de retraso en el giro del cigüeñal. Conforme avanza la combustión, en el interior del cilindro aumenta la presión de inyección hasta alcanzar la cantidad adecuada de combustible, entonces el proceso de combustión aumenta la presión que posteriormente transfiere potencia al motor, en la figura 3, se representa las fases de combustión por compresión MEC.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Combustión en el motor diésel, fases de combustión

Ángulo de cigüeñal de las toberas, son los orificios por donde se suministra el combustible en condiciones apropiadas, los utilizados en motores de inyección directa,

corresponden a toberas tipo de orificios como se puede ver en la figura 4.

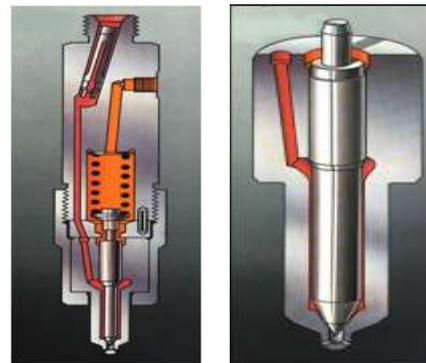


Figura 4: Inyector y tobera de inyección tipo de orificios

El proceso de combustión está relacionado con la difusión del combustible en el aire, En consecuencia, es importante que el sistema de inyección suministre el combustible provocando gran turbulencia para favorecer la difusión en el aire.

Obtener del motor la potencia máxima, implica que la presión durante el proceso de combustión, oscile entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$  después del PMS, siendo este uno de los factores para que el proceso de combustión pueda realizarse normalmente, considerando a la vez, que la cantidad de aire introducido quemará todo el combustible inyectado.

**Proceso de combustión por compresión**

Para que se produzca la reacción de una manera efectiva, el combustible (diésel o gasóleo) debe pasar del estado líquido a gaseoso, lo que le permite mezclarse con el oxígeno. Debido a que el proceso no es 100% eficaz, parte de los reactivos no se transforman completamente en  $CO_2$  y  $H_2O$ , formando otras sustancias contaminantes que se emiten al exterior en forma de emisiones. Como consecuencia de esta limitación, parte de la energía química de los reactivos no se transforma en calor.

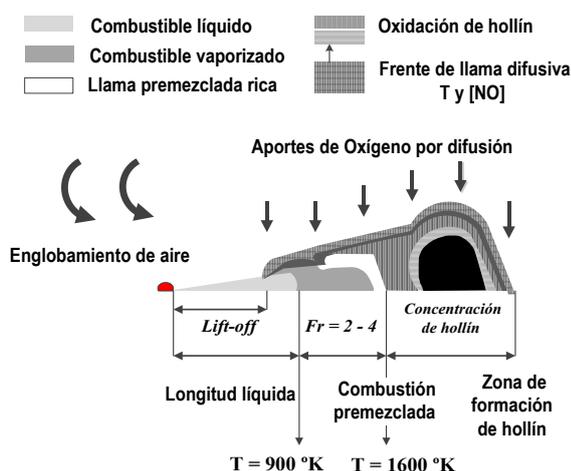
Los procesos reales en un motor diésel difieren de los que forman el ciclo termodinámico ideal, durante las colisiones que sufren las moléculas de combustible (o los átomos desprendidos de éstas) con las moléculas de oxígeno del aire tiene lugar la oxidación primaria y la formación de centros activos. El tiempo requerido para la combustión es muy breve (decenas de milisegundos), y está comprendido entre  $40^\circ$  a  $50^\circ$  de giro del cigüeñal (en torno a  $20^\circ$  APMS y  $20^\circ - 30^\circ$  DPMS).

La cadena de reacciones que siguen a esta oxidación, concluye con la obtención de los productos finales, entre los cuales están:  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ , HC,  $NO_x$  y en el caso de la combustión incompleta, CO y hollín<sup>2</sup>.

El combustible inyectado a alta presión en la cámara de combustión a través de los orificios del inyector en forma de chorro compuesto por pequeñas partículas líquidas del combustible, normalmente se sitúa en las proximidades del punto muerto superior (TDC, Top Dead Centre), donde ocurren los siguientes fenómenos:

<sup>2</sup> Partículas sólidas muy finas (100 nm a 5 µm) de carbono impuro, producto de la combustión incompleta de sustancias orgánicas. Su aspecto es similar a la ceniza pero más oscura.

El primer fenómeno post inyección, es la *atomización* (el combustible líquido se disgrega en gotas de pequeño tamaño). El pequeño tamaño de las gotas favorece el proceso posterior de evaporación, debido a que menores diámetros conducen a una mayor transferencia de calor hacia el líquido como consecuencia de una mayor relación superficie/volumen y a la mejora del coeficiente de película. La atomización del chorro diésel termina cuando desaparece el líquido en el interior del chorro, y éste sólo está formado por gotas y gas ambiental englobado en su interior, figura 5.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Representación esquemática del modelo conceptual de combustión diésel

El siguiente fenómeno que se produce al comenzar el proceso de atomización es el *englobamiento de aire*, mecanismo durante el cual la interacción del chorro inyectado con el aire provoca la entrada de este último dentro de la periferia del propio chorro. Esto produce un aumento en el grosor del chorro y una disminución tanto de su velocidad como de su densidad. El englobamiento de aire es uno de los parámetros más importantes en la combustión del chorro, y determina el proceso de mezcla, que a su vez controla la combustión.

Las gotas de pequeño tamaño, rodeadas de aire caliente debido al englobamiento, adquieren rápidamente energía del medio y cambian de estado (*evaporación*), fenómeno controlado por el englobamiento de gases a temperatura alta y la difusión térmica y másica entre la gota y el gas circundante, siendo el primero, el proceso que interviene en la combustión diésel debido a su lentitud.

La evaporación completa del combustible finaliza en la denominada *longitud líquida*. Ver figura 5, al final del proceso de evaporación, el *dosado relativo local Fr* definido como la relación masa de combustible/masa de aire con respecto a la estequiométrica, es del orden de 2 a 4, y esta mezcla, muy pobre en oxígeno, se encuentra a temperaturas del orden de 700 a 900 °K.

Después de la evaporación, cuando la mezcla formada por combustible evaporado y aire englobado durante el *Lift-off* (distancia entre la tobera de inyección y el inicio de la llama) se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad, y debido al calor transmitido por el aire caliente, la mezcla reacciona químicamente en un proceso de *combustión premezclada* débilmente exotérmico,

dando lugar a unos productos con una temperatura cercana a 1600 °K y con una composición rica en monóxido de carbono e hidrocarburos sin quemar de cadena corta y la consiguiente formación de hollín.

Durante este proceso se libera entre 10 a 15 % del contenido energético total del combustible. La aparición de dicha fase de combustión premezclada rica de oxidación del combustible (elevadísimo número de reacciones y especies involucradas) se puede explicar en dos etapas, la primera de ellas consistente en la conversión del combustible en los productos intermedios resultante de una combustión premezclada rica en equilibrio ( $Fr \approx 4$ ), y la segunda es la oxidación de dichos productos intermedios, siguiendo un mecanismo de reacción determinado, hasta su combustión completa, lo cual ocurre para dosados estequiométricos o ligeramente ricos.

Por último, el proceso de combustión exotérmico ocurre fundamentalmente en el *frente de llama*. Los productos parcialmente oxidados de la combustión premezclada se concentran en el *frente de llama* por medio de un proceso combinado de convección y difusión, mientras que por la parte exterior se suministra el oxígeno necesario fundamentalmente por difusión. En dicho frente se libera el resto del contenido energético del combustible, es decir, entre el 85% y el 90%, y prácticamente se alcanza la *temperatura adiabática de llama*.

Debido a estas altas temperaturas, la mayor parte del hollín formado en la etapa anterior se oxida a CO<sub>2</sub> y la tasa de formación de NO, muy dependiente de la temperatura alcanza los valores más elevados. Los productos de la combustión, después de atravesar el frente de llama, sufren un proceso de mezcla con el aire en exceso que queda en la cámara (dilución) que, unido al proceso de expansión, causa un enfriamiento de dichos productos y un cambio en su composición. Este fenómeno provoca que se detengan las reacciones que conducen a la formación y destrucción de determinadas especies contaminantes, como los NO<sub>x</sub> y el CO, apareciendo éstos por tanto, en el escape del motor.

En los motores a diésel, es importante considerar las características del chorro combustible inyectado, debido a que controla el englobamiento de aire (es decir la mezcla), y por esta razón controla la combustión por compresión, por lo tanto, aquello que mejore o acelere la mezcla, mejorará y acelerará la combustión.

En consecuencia, de la forma como sale el chorro combustible, dependerá el proceso de mezcla y la combustión. En cierta manera la comprensión al detalle del fenómeno del chorro es la clave para entender su evaporación y su combustión y constituye el punto de partida para entender la formación de contaminantes.

**DESARROLLO**

El motor puesto a prueba para la presente investigación tiene las características indicadas en la tabla 1.

**Tabla 1**  
**Características del motor puesto a prueba**

<b>Tipo:</b>	Motor de inyección directa de 4 tiempos turbo cargado
<b>Marca y modelo:</b>	Nissan FD6-T
<b>Número de cilindros:</b>	6
<b>Diámetro del cilindro:</b>	100 mm
<b>Carrera:</b>	120 mm
<b>Cilindrada total:</b>	5654 cm <sup>3</sup>
<b>Relación de compresión geométrica:</b>	17:1
<b>Potencia:</b>	175 HP a 3200 rpm (a nivel del mar)
<b>Momento torsor:</b>	46 Kgm a 1900 rpm. (a nivel del mar)
<b>Orden de encendido:</b>	1-4-2-6-3-5
<b>Adelanto inicial de la inyección:</b>	17°
<b>Sistema de inyección de combustible:</b>	Bomba inyectora tipo en línea
<b>Tobera del inyector tipo de orificios:</b>	4 orificios
<b>Apertura de los inyectores:</b>	220 bar (según el manual)
<b>Código tobera de inyección:</b>	NP-DLLA155S324N
<b>Juego de válvulas:</b>	Admisión 0,4 mm
<b>Escape:</b>	0,4 mm

Fuente: Nissan FD6-T

Este motor tuvo que ser reacondicionado totalmente habiéndose realizado una reparación completa de tal modo que se inhiba la influencia del desgaste o calibración equivocada de los otros componentes, prevaleciendo la *presión de inyección y el estado de los inyectores* como los factores relacionados con la potencia generada por el motor y la mezcla contaminante emitida.

**Esquema completo de la instalación experimental y equipo utilizado.**

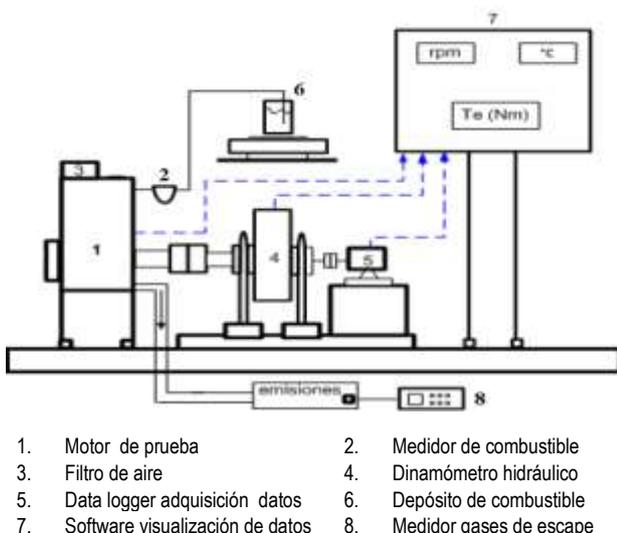


Figura 6: Montaje del motor utilizado en los ensayos

**Características de los principales equipos utilizados:**

- Dinamómetro hidráulico marca MWD, Industria Argentina, utilizado para medir la potencia y momento torsor.

- Data Logger y software de adquisición de datos para medir los parámetros de operación del motor como la velocidad de rotación, temperatura de funcionamiento, temperatura ambiente, presión barométrica, humedad relativa y otros.
- Analizador de gases con capacidad de medir hasta 5 tipos de gases diferentes como también la temperatura de los gases de escape y la temperatura ambiente.
- Probador de inyectores utilizado para la calibración de los inyectores del motor ensayado.
- Opacímetro marca Bear, cámara de medición de gases que nos permite realizar el análisis de los humos de los vehículos diésel.
- Banco de pruebas montado en la sala de ensayos según esquema mostrado en la figura 6. En la figura 7 se puede ver el motor diésel montado sobre el banco de ensayos y acoplado al dinamómetro hidráulico.



Crédito: R. Paz Z 2015

Figura 7: Motor y Dinamómetro en la sala de ensayo

**Evaluación energética**

El desempeño energético del motor fue evaluado con el motor en buenas condiciones de operación con los inyectores completamente reparados y calibrados para un buen desempeño, obteniéndose valores de potencia y torque máximos y tomando en cuenta que, tanto la potencia obtenida como el par torsor serían un tanto menores a las indicadas por el fabricante debido principalmente a las pérdidas que experimenta un motor cuando trabaja en altitudes por encima de las del nivel del mar.

Estos valores obtenidos de potencia y par sirven como medidas de comparación cuando se utiliza inyectores descalibrados o con toberas de inyección obstruidas.

La tabla 2, muestra los resultados de las pruebas que se realizaron sobre el motor diésel, variando la presión de apertura de los inyectores y el estado de condición de las toberas de inyección.

**Tabla 2**  
**Potencia y momento torsor, motor diésel de prueba**

	POTENCIA	MOMENTO TORSOR	Observación
Bien calibrado	151,0 HP a 3300 RPM	37,4 kgm a 2300 RPM	Estándar
Presión de inyección menor	147,0 HP a 3300 RPM	34,8 kgm a 2300 RPM	Menor al estándar
Presión de inyección mayor	149,0 HP a 3000 RPM	36,5 kgm a 2300 RPM	Menor al estándar
Orificios obstruidos	114,0 HP a 3000 RPM	26,8 kgm a 2300 RPM	Mucho menor al estándar

Archivo: H:\Pruebas\Ensayo-0045.ad3

Motor: Nissan FD6T diésel

Condiciones ambientales:

Temperatura 18,5 °C, presión 668,2 HPa, humedad 43%

Factor de corrección: 1571 (SAE J1349/2004)/Momento de inercia: 0,105 desde 971 a 3301 RPM

Rango: 1000 a 3300 RPM,

**Potencia máxima 151,0 HP**<sub>3300 RPM</sub>

**Torque máximo 37,4 kgm**<sub>2300 RPM</sub>

**Tiempo de aceleración: 00:14,85**

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran claramente que la presión de inyección del combustible y el estado de las toberas de inyección tiene influencia sobre la potencia y el torque del motor ocasionando disminución de los mismos.

### Emisiones contaminantes

De manera simultánea a las mediciones que se realizaron para la determinación de la potencia y el torque del motor diésel, también se efectuaron mediciones de gases de escape, utilizando un analizador de gases para dos tipos de gases: NO y NOx.

Las mediciones de estos dos contaminantes, presenta las siguientes tendencias:

1. Un aumento en las RPM del motor, incrementa la emisión en (ppm) de NO y NOx.
2. La emisión de gases contaminantes es mayor a presión correcta o cuando la presión es menor o mayor, y mucho menor cuando las toberas están obstruidas.

Al respecto de esta segunda tendencia, las emisiones de NO y NOx se reducen cuando la presión de inyección de combustible es más baja o más alta que la presión correcta, esto es debido a que, al no producirse una combustión completa dentro de la cámara de combustión, la temperatura disminuye por lo cual la generación de estos gases contaminantes disminuye, pero la combustión incompleta, si bien puede reducir la generación de NO y NOx contribuye a la generación de otros tipos de contaminantes como el *CO*, *MP* y *HC* sin quemar que se expulsan al medio ambiente.

### CONCLUSIONES

- Estudiando el proceso de combustión del motor diésel, respecto a los factores: presión de inyección y estado de los inyectores (orificios de las toberas) se demuestra una disminución en la potencia del motor y aumento en las emisiones contaminantes. Excepto NO y NOx.
- A fin de no tener problemas de reducción de potencia y emisión de contaminantes, se debe inspeccionar y calibrar los inyectores periódicamente en lo posible después de cada 1000 horas de funcionamiento del motor.
- Una mayor o menor presión de inyección provoca una disminución en las emisiones de NO y NOx como consecuencia de la reducción en la temperatura de combustión, este efecto de combustión incompleta origina la generación de otros contaminantes: monóxido de carbono CO, Materia Particulada MP (hollín) e hidrocarburos HC sin quemar, que son emitidos al medio ambiente.
- Entre otros factores, un adelanto de la inyección también causa un mayor nivel en la emisión de NO, debido a que la liberación de calor tiene lugar más cerca del punto muerto superior y por tanto las temperaturas locales alcanzadas son mayores, aunque este último aspecto no fue verificado experimentalmente.
- Se considera importante la difusión de los resultados obtenidos hacia la sociedad, específicamente a los conductores que poseen un vehículo con motor a diésel y a los técnicos mecánicos quienes son los responsables de mantenimiento de los vehículos.

### BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Muñoz, R. M., et al, 1987, Motores de combustión interna, Prensas Universitarias de Zaragoza, ISBN 84-7733-518-4, Zaragoza – España,

Muñoz, R. M., Payri, F., 1989, Motores de combustión interna alternativos, Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales Fundación General U.P.M., ISBN 10: 8486451019 ISBN 13: 9788486451011, Madrid – España,

Armas, V.O., 1999, Diagnóstico experimental proceso de combustión en motores diésel de inyección directa, Universidad Politécnica de Valencia, ISBN 84-7721-722-X, Valencia – España,

García, A., 2011, Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de la combustión y la formación de hollín en motores diésel, Editorial Reverte, 2011, ISBN 978-84-291-4716-2, Madrid – España,

López, S. J., 2005, Estudio teórico experimental del chorro libre diésel no evaporativo y de su interacción con el movimiento del aire, Editorial Reverte, ISBN 84-291-4703-9, Madrid – España,

Pérez, C. J., 2008, Modelado cinético-químico del proceso de combustión diésel, Ediciones de la UCLM, Tesis Doctoral 242, ISBN 978-84-8427-565-7, Castilla de la Mancha – España.

(\*), Ingeniero Mecánico, MSc. Gestión del Mantenimiento Técnico, Docente Carrera Mecánica Automotriz, Facultad de Tecnología – UMSA.