



Caracterización de chorros Diesel evaporados en segundo régimen de rotura

SIMÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ*, MIGUEL GARCÍA YERA*, JOSÉ MANUEL RIESCO ÁVILA**

Para mejorar el proceso de combustión en los modernos motores Diesel, y lograr un mejor control en las emisiones contaminantes, es fundamental conocer los fenómenos internos en los motores de inyección directa, especialmente en los motores Diesel de pequeña cilindrada, donde el choque del combustible líquido en el *bowl* del pistón, o en las paredes del cilindro, puede generar gran cantidad de emisiones contaminantes. Sin embargo, las características de la penetración de la fase líquida dependen de la atomización y de la vaporización, así como del proceso de mezclado aire-combustible. El resultado de comprender cómo varios parámetros pueden llegar a afectar la penetración de la fase líquida de un chorro Diesel resulta importante para diseñar adecuadamente las cámaras de combustión de estos motores.

Este trabajo busca proponer una correlación matemática que permita definir la distancia de penetración de la fase líquida del chorro Diesel en un entorno evaporativo y de segundo régimen de rotura, bajo condiciones termodinámicas controladas del fluido de trabajo y de los parámetros de inyección; a esta penetración se le llamará simple-

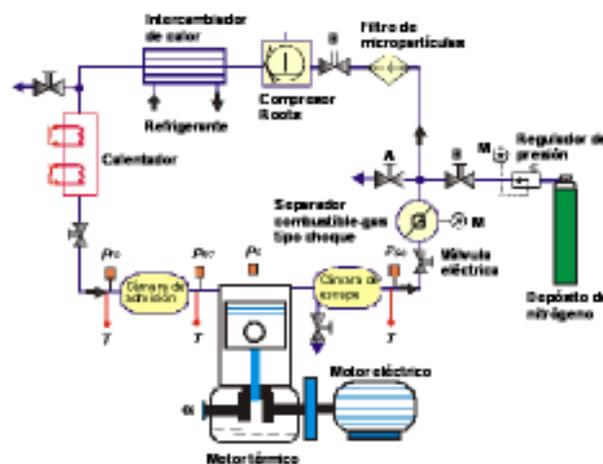


Fig. 1. Diagrama esquemático de la instalación experimental.

mente fase líquida (LL). El desarrollo de esta correlación está basado en recientes experimentos obtenidos en un motor térmico con accesos ópticos especiales adaptados en la cámara de combustión,

* Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica, UG

el cual ha sido utilizado en previas investigaciones.¹⁴

Materiales y métodos

Descripción de la instalación experimental

La instalación experimental, la cual ha sido empleada para estudiar el chorro Diesel bajo condiciones termodinámicas controladas (presión, temperatura y densidad) en la zona crítica de inyección (PMS: Punto Muerto Superior), se muestra en la figura 1. Esta máquina permite estudiar el chorro bajo dos condiciones diferentes: atmósfera inerte y atmósfera reactiva. La configuración utilizada en este trabajo está referida a la atmósfera inerte, donde se planteó una serie de experimentos con los que se desarrolló una correlación matemática que permite predecir, en tiempo real, el comportamiento del chorro líquido hasta que se presenta el segundo régimen de rotura.

El motor térmico de la instalación experimental, cuyas características técnicas se plasman en la tabla I, funciona en pseudo arrastre y en un circuito hermético: el circuito se carga con nitrógeno, el cual actúa como fluido de trabajo, este gas es impulsado por un compresor Roots que opera como un sistema de sobrealimentación para elevar la presión de alimentación hasta condiciones de consigna (desde uno hasta tres bar absolutos). El fluido de trabajo de admisión es conducido a través de dos unidades de acondicionamiento térmico que le permiten establecer y controlar las variables termodinámicas que se definen para cada experimento.

Después de efectuarse la inyección, los gases de escape (combustible + nitrógeno) son enfriados

mediante un sistema de separadores, donde se eliminan tanto las gotas residuales de combustible como las partículas sólidas que han sido arrastradas a través del sistema. El fluido de trabajo, una vez que ha sido purificado, vuelve a ser conducido por el circuito hasta llegar al interior del cilindro donde se inicia nuevamente una inyección.

La figura 2 muestra un corte esquemático de la sección transversal de la cámara de combustión del motor térmico, donde se localiza la cámara de inyección cilíndrica (45 mm de diámetro y 55 mm de altura), esta última tiene un acceso para el inyector (parte superior) y cuatro accesos laterales para visualización, de los cuales uno se utiliza para colocar el transductor de presión instantánea. Los accesos ópticos son de cuarzo, con las siguientes dimensiones geométricas: 49 x 33 y 20 mm de espesor. La localización de cada uno de los elementos que componen la culata del motor térmico se representa en el diagrama esquemático de la figura 2.

Sistema de inyección

La inyección de combustible se lleva a cabo mediante un sistema Bosch *common rail*, en el cual se establece un rango de presión de inyección de 300 a 1300 bar. El inyector está equipado con una tobera de tipo minisaco de un sólo orificio axi-simétrico, con diámetros desde 115 hasta 200 μ m. El sistema de inyección se ha construido con el propósito de modificar los parámetros de inyección: tiempo, frecuencia y presión. Para minimizar la suciedad

Tabla I. Características técnicas del motor.

Tipo de motor térmico	Monocilíndrico de 2T
Tipo de barrido	Lazo tipo curtis
Desplazamiento	3L
Diámetro	150 mm
Carrera	170 mm
RC	17.1:1

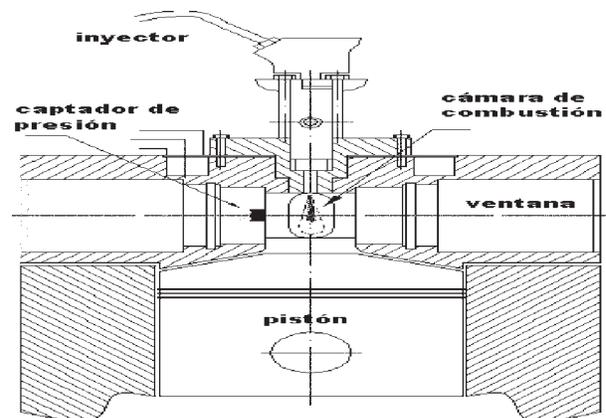


Fig. 2. Diagrama esquemático de la culata del motor térmico.

de las ventanas de visualización durante la experimentación, el motor es programado para funcionar a modo de una inyección por cada doce ciclos de operación, y se ha designado un tiempo de inyección de 1.5 ms.

Condiciones de operación del motor

El motor térmico funciona a un régimen constante de 500 rpm. Este valor se ha definido como el óptimo debido a condiciones de lubricación y vibraciones. Las ventanas de visualización se han diseñado para resistir hasta 120 bar de presión, sin embargo, en esta investigación sólo se han experimentado presiones entre 60 y 80 bar. Durante la operación del motor, la temperatura del monoblock es controlada mediante un calentador y un enfriador externo, desde el arranque del mismo hasta que está en operación ordinaria. Las condiciones termodinámicas del fluido de trabajo en la admisión del motor son monitoreadas para lograr controlar las condiciones termodinámicas de éste en la zona donde se lleva a cabo la inyección. El rango de las temperaturas que pueden establecerse en la admisión es de 25 a 120°C.

Condiciones experimentales

La estructura de los experimentos realizados se presenta en las tablas siguientes: en la II se muestra el valor establecido para la presión y la temperatura del fluido de trabajo, así como los parámetros de inyección, y la tabla III muestra la variación del diámetro de la tobera, la presión de inyección, los flujos máxicos y el coeficiente de descarga. Las condiciones termodinámicas (temperatura y densidad del fluido de trabajo) en la cámara de inyección y en la región próxima al PMS se calculan a partir de un modelo termodinámico de diagnóstico CALMEC (cálculo de motores encendidos por compresión).¹ La presión en el interior del cilindro es monitoreada de forma instantánea mediante un transductor piezoeléctrico colocado en uno de los accesos de la cámara de inyección (figura 2). Por otro lado, un transductor de tipo piezorresistivo instalado entre la pre-cámara de admisión y el cilindro (figura 2) permite medir la presión en el PMI

(punto muerto inferior); asimismo, un captador de temperatura se instaló en la pre-cámara de admisión para medir la temperatura del fluido de trabajo en el PMI. Con la medición de estas variables fue posible determinar las condiciones termodinámicas en la zona $\pm 3^\circ$ del PMS, región considerada como la más estable durante el proceso de inyección.¹

Sistema de adquisición de imágenes

El sistema experimental para captar las imágenes fue una fuente de iluminación policromática, basada en una lámpara estroboscópica de Xe, un difusor de luz que permite uniformidad en la iluminación y una cámara CCD (Charge Coupled Device). Las imágenes adquiridas durante los experimentos han sido el resultado de la atenuación de luz que incide en el chorro que atraviesa el volumen de control en la zona de inyección. Esta atenuación, en el caso de chorros Diesel, se produce por el efecto *scattering* durante el proceso en filmación.

Las imágenes fueron captadas por una cámara CCD colocada frente a la ventana de visualización y en posición opuesta a la cámara de combustión. La cámara CCD es de una resolución de 768 x 484 píxeles con 1/16000 de velocidad de obturación. Esta técnica determina el contorno del chorro líquido atomizado, de donde se obtiene información de las características macroscópicas del mismo. Una vez captados los contornos del chorro, se hace un procesamiento digital de imágenes mediante algoritmos basados en el método de segmentación LTR (*Like-lihood Ratio Test*),⁵ los cuales permiten diferenciar entre el contorno y el fondo de la imagen.

Tabla II. Parámetros de inyección y del fluido de trabajo.

Diámetro de tobera	115-130-170-200 [i m]
Presión de inyección	300-700-1100-1300 [bar]
Temperatura de admisión (constante)	70 [°C]
Presión de admisión (constante)	1.3 [bar]

Tabla III. Parámetros de inyección, flujo másico y coeficiente de descarga

Presión de inyección [bar]	Diámetro de tobera [μm]	Flujo másico medido [g/s]	Flujo másico teórico [g/s]	C _d [-]
300	115	1,53	2,04	0,746
700	115	2,52	3,38	0,745
1100	115	3,13	4,32	0,725
1300	115	3,34	4,72	0,708
300	130	2,27	2,61	0,870
700	130	3,50	4,32	0,810
1100	130	4,05	5,52	0,734
1300	130	4,42	6,03	0,733
300	170	3,36	4,46	0,753
700	170	5,32	7,38	0,721
1100	170	6,47	9,43	0,686
1300	170	6,87	10,30	0,666
300	200	3,63	6,18	0,587
700	200	6,74	10,20	0,660
1100	200	8,53	13,10	0,653
1300	200	9,29	14,30	0,651

Desarrollo de la correlación matemática

La penetración de la fase líquida se realizó en diferentes etapas durante el transitorio, la primera etapa está en función de la raíz cuadrada del tiempo, y se inicia desde que se presenta el chorro en el volumen de control hasta el rompimiento de éste, esta fase también se conoce como longitud intacta; a este proceso se le denominará *primer régimen de rotura*. Hiroyasu y Aray⁶ establecen que el tiempo de rotura para el primer régimen puede determinarse por la siguiente expresión:

$$t_b = \frac{15,8 \rho_f d_n}{C_d \sqrt{2 \rho_a \Delta P}} \tag{1}$$

donde ρ_f es la densidad del combustible [kg/m³]; ρ_a es la densidad del fluido de trabajo [kg/m³]; C_d es el coeficiente de descarga [-]; d_n es el diámetro del orificio de la tobera [μm] y ΔP el salto de presión de inyección [Pa].

Para este estudio, la expresión anterior arroja

resultados entre 25 y 30 μs, y el valor medio en los ensayos realizados ha sido de 50 μs, para el tiempo de rotura se puede considerar la siguiente hipótesis: el tiempo de rotura está en función de la raíz cuadrada del tiempo en el instante que se inicia la inyección. A partir de esto se puede decir que la longitud líquida se incrementa hasta el segundo régimen de rotura en el tiempo t_r, después de este tiempo la longitud líquida tiene variaciones mínimas y se considera constante.

Con esta base se establece el siguiente modelo que gobierna la penetración de la fase líquida:

$$0 < t < t_r : LL(t) = \alpha \sqrt{t} \tag{2}$$

$$t > t_r : LL(t) = ct_e = LL_{max} \tag{3}$$

El modelo de penetración se ilustra en la figura 3; el coeficiente α y la penetración de la longitud líquida dependen de otros parámetros (condiciones termodinámicas del fluido de trabajo y parámetros geométricos del sistema de inyección). La correlación matemática considera los efectos del diámetro de la tobera y el coeficiente de descarga, la presión de inyección y la densidad del fluido de trabajo, ésta última similar a la presente en los modernos motores Diesel de inyección directa. Estos parámetros se han considerado suficientes para obtener una correlación adecuada que permite obtener predicciones que lleven a diseñar cámaras de combustión con la suficiente fiabilidad que se requiere en los modernos motores sobrealimentados (*Heavy Duty*).

$$\alpha \propto d_n^A \rho_a^B P_{iny}^C C_d^D \tag{4}$$

$$LL_{max} \propto d_n^E \rho_a^F P_{iny}^G C_d^H \tag{5}$$

Determinación del inicio de la inyección

El tiempo del inicio de la inyección corresponde a la suposición previa (). El tiempo t_r se presenta cuando el coeficiente entre LL y t^{1/2} es aproximadamente el 99%. El coeficiente α es calculado con los puntos correspondientes al primer régimen de rotura, como se ilustra en la figura 4.

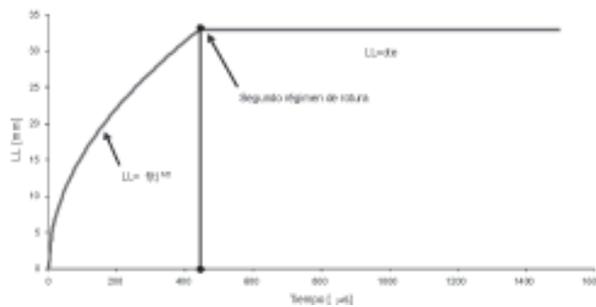
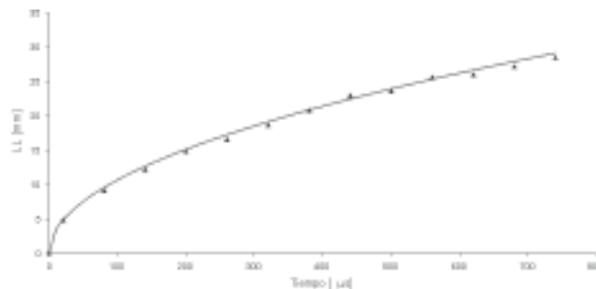


Fig. 3. Fases del comportamiento del modelo considerado.

Fig. 4. Determinación del coeficiente α y del tiempo de inicio de la inyección.

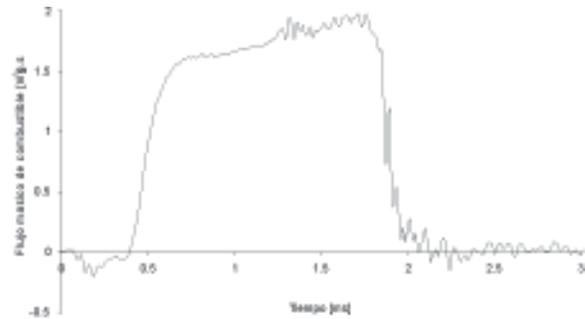
Determinación del coeficiente de descarga (C_d)

El coeficiente de descarga se ha determinado para cada orificio de tobera y presión de inyección en base a la siguiente expresión:

$$C_d = \frac{m_t}{A_n \sqrt{2\Delta P \rho_f}} \quad (6)$$

El coeficiente de descarga representa la relación entre el flujo másico inyectado y el flujo másico teórico, teniendo como base la ecuación de Bernoulli. La cantidad real de combustible inyectado (tasa de inyección, figura 5) se obtiene mediante un tasímetro de tipo tubo (EVI-IAV).

El método de medida para determinar la tasa de inyección es el siguiente: se inyecta combustible en el interior de un tubo que contiene ya un volumen determinado de éste, así se produce un incremento de presión al momento de la descarga, la cual es proporcional al incremento de la masa inyectada. El rango del incremento de presión en el tasímetro corresponde a la cantidad de masa de combustible inyectado,³ el flujo másico medio de combustible suministrado corresponde al área su-

Fig. 5. Ejemplo de una tasa de inyección para una tobera de $115 \mu\text{m}$ y una presión de inyección de 300 bar.

perficial dividida por la duración de la inyección. Cabe destacar que el área superficial se ha calculado mediante el método de integración trapezoidal.

Los resultados obtenidos de variar la presión de inyección y el diámetro de la tobera permiten definir el coeficiente de descarga para cada punto experimentado, estos resultados se muestran en la tabla III.

Resultados y correlación matemática

Los resultados experimentales desarrollados han permitido obtener la siguiente correlación matemática para: $0 < t < t_i$:

$$LL(t) = 6.47 d_n^{0.56} \rho_a^{-0.27} P_{iny}^{0.23} C_d^{0.08} t^{1/2} \quad (7)$$

En las figuras 6, 7, 8 y 9 se representa la máxima penetración de la fase líquida del chorro; asimismo, se comparan los resultados experimentales y la correlación matemática obtenida. En las gráficas se muestra una clara dependencia entre las curvas teóricas y los puntos experimentales, obteniéndose que el coeficiente del modelo es de 93.3%, lo cual significa que sólo el 6.7% de los experimentos no se interpreta por el modelo propuesto. Según el modelo, lo anterior demuestra que la penetración de la fase líquida del chorro depende principalmente del diámetro de la tobera, cuyo exponente es el más significativo ($d_n^{0.56}$). La densidad del fluido de trabajo en la cámara de inyección y la presión de inyección, ambos tienen una influencia determinante. Al incrementar la presión

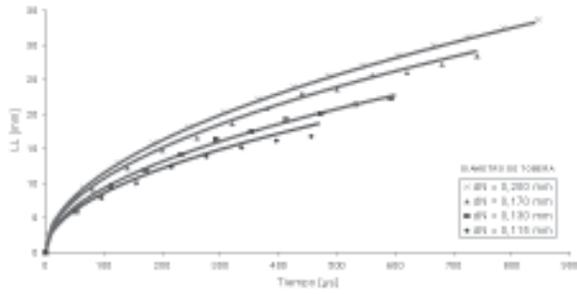


Fig. 6. Comparación modelo-experimento, $P_{iny}=300$ bar, $\rho_a=26$ kg/m³ y $T_g=906$ K.

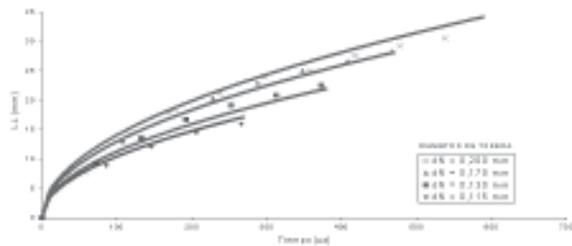


Fig. 7. Comparación modelo-experimento, $P_{iny}=700$ bar, $\rho_a=26$ kg/m³ y $T_g=906$ K.

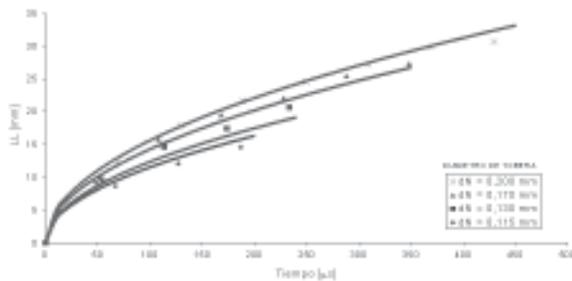


Fig. 8. Comparación modelo-experimento, $P_{iny}=1100$ bar, $\rho_a=26$ kg/m³ y $T_g=906$ K.

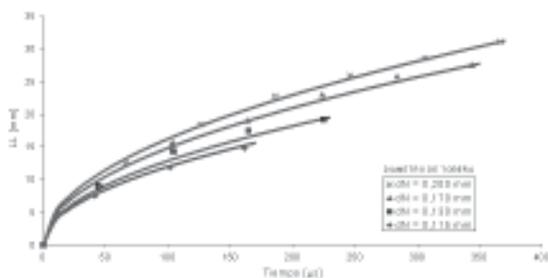


Fig. 9. Comparación modelo-experimento, $P_{iny}=1300$ bar, $\rho_a=26$ kg/m³ y $T_g=906$ K.

de inyección aumenta considerablemente la velocidad de penetración ($P_{iny}^{0.23}$), esto debido a que la velocidad del combustible al salir de la tobera se incrementa con la presión de las gotas hasta alcanzar su rompimiento. La densidad elevada del fluido de trabajo en la cámara ocasiona mucha resistencia en la penetración de la fase líquida, ocasionando una reducción en la penetración del chorro ($\rho_a^{-0.27}$). El exponente encontrado en esta correlación ($\rho_a^{-0.27}$) es muy cercano al reportado por Dent en sus investigaciones,⁷ el cual se representa en la siguiente correlación:

$$LL(t) \propto \rho_a^{-0.25} t^{1/2} \quad (8)$$

Por otro lado, se demuestra que el coeficiente de descarga es prácticamente insignificante ($C_d^{0.08}$) para efectos de predicción del comportamiento de la fase líquida del chorro antes del segundo régimen de rotura.

Conclusiones

Los efectos del diámetro de la tobera, coeficiente de descarga, presión de inyección y densidad del fluido de trabajo sobre la penetración de la fase líquida en segundo régimen de rotura fueron investigados utilizando un motor de experimentación con accesos ópticos en la culata. Esta instalación de última generación permite la aplicación de diferentes técnicas ópticas. La técnica de ombroscopía se utilizó en el desarrollo de este trabajo para estudiar el fenómeno transitorio. Esta investigación se ha desarrollado en condiciones termodinámicas similares a las existentes en los modernos motores *Heavy Duty common rail* de inyección directa.

Las tendencias observadas en los efectos de estos parámetros sobre la penetración de la fase líquida del chorro Diesel evaporado son:

a) El diámetro de la tobera es el parámetro de mayor influencia sobre la máxima penetración de la fase líquida. Un decremento en el diámetro de la tobera causa una disminución en la penetración, y la aparición inmediata del segundo régimen de rotura ocasionando un acortamiento en la fase líquida.

b) El incremento de la presión de inyección

provoca penetración inmediata y rompimiento prematuro de las gotas formadoras del chorro, esto se debe principalmente a los efectos de cavitación en la salida de la tobera.

c) La densidad del fluido de trabajo en la cámara de combustión causa una reducción en la penetración de la fase líquida y un retraso al segundo régimen de rotura. Este comportamiento se debe al arrastre aerodinámico que se presenta entre el fluido de trabajo y el fluido activo, provocando, en tiempos relativamente cortos, un incremento en la tasa de evaporación de las gotas que integran el chorro.

d) El coeficiente de descarga es el parámetro de menor importancia sobre la penetración de la fase líquida. Este parámetro tiene mayor incidencia en el fenómeno de cavitación, y, por lo tanto, en la velocidad de las gotas del chorro; sin embargo, no es significativo el efecto que tiene sobre la máxima penetración de la fase líquida.

Resumen

En el presente trabajo se ha caracterizado el comportamiento macroscópico de la penetración de la fase líquida de chorros Diesel evaporados. El principal objetivo de esta investigación es establecer una correlación que permita predecir el comportamiento de la penetración de la fase líquida en segundo régimen de rotura bajo diferentes condiciones termodinámicas (densidad y temperatura del gas en la cámara de combustión) y parámetros de inyección (presión de inyección y diámetro del orificio de la tobera).

Palabras clave: Cámara de inyección, Inyección directa, Longitud líquida, Motor térmico, Tiempo de rotura.

Abstract

In the present work the macroscopic behavior of the liquid length penetration on evaporating diesel sprays has been characterized. The main objective of this research is to establish a correlation that allows the prediction of the liquid length penetration behavior in second break-up time

under different thermodynamic conditions (gas density and temperature in the combustion chamber) and injection parameters (injection pressure and nozzle hole diameter).

Keywords: Injection chamber, Direct injection, Liquid length, Thermal engine, Break-up time.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo de investigación ha sido posible gracias al apoyo brindado por el Promep, a través del proyecto P/103.5/04/1372.

Referencias

1. S. Martínez. «Development of an Experimental Set-up for Study of the Evaporated Diesel Sprays on Inert and Reactive Atmosphere» PhD Theses, UPV, Spain, 2003.
2. V. Bermúdez, J. M. García, E. Juliá and S. Martínez. «Engine with Optically Accessible Cylinder Head: A Research Tool for Injection and Combustion Processes». SAE technical paper 2003-01-1110, 2003.
3. V. R. Bermúdez, S. Martínez and E. Watel. «Liquid Length of Evaporating Diesel Spray Before Thermodynamic Effects in the Combustion Chamber». SIA Innovations Technologiques, 2003.
4. J. M. Desantes, J. M. Pastor, S. Martínez and J. M. Riesco. «Experimental Characterization of the Liquid Phase Penetration on Evaporating Diesel Sprays». SAE technical paper 2005-01-2095.
5. J. V. Pastor, J. Arrègle and A. Palomares. «Diesel Spray Image Segmentation with a Likelihood Ratio Test» Applied Optics 40, 1-10, 2001.
6. H. Hiroyasu and M. Aray. «Development and Use of a Spray Combustion Modelling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions». Proceedings of the Fifth International Automotive Propulsion Systems Symposium, pp 264-288, Warrendale, Pa, 1980.
7. J. C. Dent. «A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration», SAE technical paper 710571, 1971.

Recepción: 14 de julio de 2004
Aceptación: 25 de enero de 2006