

SISTEMA PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE LOS MOTORES DIESEL EN REGIMENES DE BAJAS CARGAS Y VELOCIDADES

Guillermo Lira Cacho

Universidad Nacional de Ingeniería- Facultad de Ingeniería Mecánica
Av. Túpac Amaru 210-Rímac-Lima-Perú - email: glira@uni.edu.pe

Raúl Figueroa Reynoso

Circe Rondinel Pineda

Resumen. Se propone un sistema para mejorar la estabilidad de funcionamiento de los motores diesel en regímenes de bajas cargas y velocidades de rotación mediante el empleo de una válvula especial y sencilla denominada RND, la cual se instala en la tubería de alta presión. Esta válvula se acciona automáticamente por diferencia de presiones, lo que permite introducir adicionalmente pequeñas cantidades de combustible directamente a la línea, lo cual ayuda a estabilizar el proceso de inyección en los regímenes indicados. Se incluyen los resultados experimentales de los ensayos realizados con una bomba de inyección lineal, a la cual se le instaló la válvula RND y un sensor piezoeléctrico de presión. Los oscilogramas de la presión y la desigualdad de suministro de combustible (por ciclos) muestran la mejora de la estabilidad del funcionamiento del sistema de inyección.

Palabras llave: Estabilidad, Válvula RND, Oscilogramas de presión, Desigualdad de suministro de combustible por ciclos.

1. INTRODUCCIÓN

Los índices económicos de los motores de combustión interna en el régimen nominal y cercanos a él alcanzan sus valores óptimos; pero, en los regímenes de vacío y de cargas parciales la efectividad de funcionamiento disminuye sustancialmente. Sin embargo, los regímenes de vacío y de cargas parciales son los de mayor frecuencia durante la vida útil de los motores diesel y; durante el trabajo en estos regímenes, el consumo de combustible se incrementa considerablemente [5]. En estas condiciones, los motores diesel trabajan inestablemente, debido, principalmente, al trabajo inestable de su sistema de inyección.

Considerando estos aspectos, una alternativa para mejorar los índices de economía y de toxicidad del motor en estos regímenes, es la utilización del método de la regulación de la presión inicial en la línea de alta presión del sistema de inyección del combustible. Es preciso señalar que este sistema no requiere del rediseño del motor; sino que es adaptable a motores diesel ya existentes que tengan un sistema de inyección del tipo separado; permitiendo, además, mantener la estructura original de su sistema de inyección.

2. FUNDAMENTACION TEORICA

2.1 Análisis de los regímenes de funcionamiento de los motores de combustión interna

Los motores diesel automotrices, durante su funcionamiento, trabajan mucho tiempo con cargas parciales [2], lo que disminuye su rendimiento efectivo y aumenta el consumo específico de combustible. El trabajo en regímenes de vacío, hace que el consumo de combustible del motor aumente hasta en 20-25% con respecto al que tiene en altas cargas [1]. En la figura 1 se muestra el diagrama típico de variación de la carga (N_e) y del consumo específico de combustible (g_e) de un motor diesel de tractor durante el tiempo de funcionamiento. Se puede apreciar en la figura que durante el tiempo de funcionamiento, el motor trabaja casi un 40% del tiempo con cargas menores al 50%. El tiempo de trabajo en regímenes de vacío es aproximadamente de 20%; esto es particularmente valido para motores de tractores y de automóviles [1].

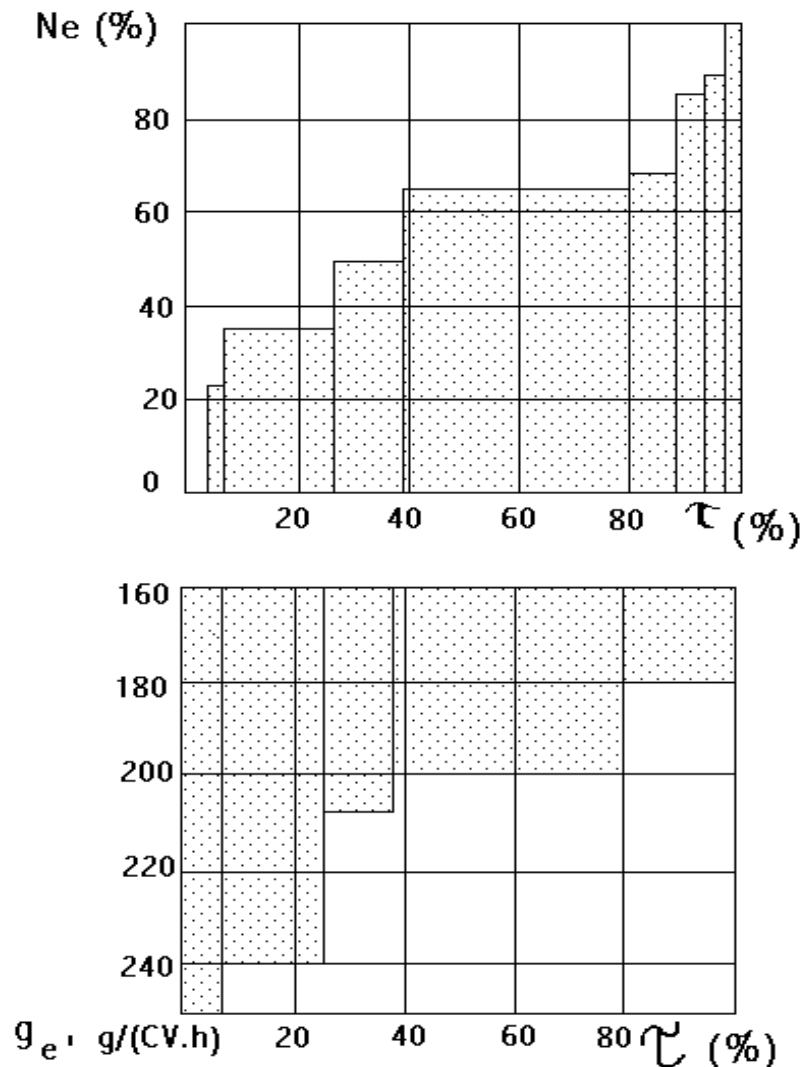


Figura 1 -Variación de la carga (N_e) y de la economía de combustible (g_e) de un motor diesel de tractor durante su funcionamiento (τ : tiempo), [2].

Gran importancia para la performance del motor del vehículo, tiene la estabilidad de funcionamiento en vacío y a baja velocidad de rotación del cigüeñal. Estos regímenes tienen

lugar durante el calentamiento del motor, en caso de paradas cortas, al realizar cambios de velocidad, etc. Por otro lado, para asegurar el funcionamiento más económico del motor, se debe tender a disminuir la velocidad de rotación mínima estable durante el servicio[2].

La economía del combustible influye mucho en el costo de operación de las motores; por lo tanto, es importante el diseño y aplicación de diferentes métodos y medios para mejorar la economía de combustible del motor durante su explotación. También es de suma importancia el mejoramiento de los índices ecológicos de los motores diesel en los regímenes de cargas parciales. La economía del motor diesel puede empeorar mucho más si es que estos regímenes son transitorios o inestables.

2.2 Particularidades del trabajo del sistema de inyección diesel

Los sistemas de inyección del tipo separado, los cuales están conformados por una bomba de inyección, una línea de alta presión (LAP) y un inyector cerrado son los más apropiados para diferentes motores diesel automotrices. Sin embargo, este tipo de sistemas presenta algunas características negativas; por ejemplo, al disminuir la carga, las posibilidades de corrección decrecen (dg_{sc}/dn y dM_e/dn aumentan). Si el motor diesel no posee métodos de corrección de las características de suministro de combustible, pierde su capacidad de adaptabilidad ($K_m = Me_{max}/Me_{nom}$), e incluso éste puede llegar a ser menor que la unidad [4]. En este caso, tenemos que emplear reguladores más complejos y, por lo tanto, más costosos.

Si no se tienen estos métodos de regulación, el motor trabaja inestablemente, con desigualdad de suministro cíclico de combustible por cilindros y por ciclos, con inestabilidad de la velocidad y de carga, disminuyendo el rendimiento y aumentando el consumo de combustible [4].

Si el motor trabaja con bajas cargas y baja velocidad de rotación, el tiempo de inyección aumenta y el proceso de inyección se torna inestable e intermitente debido a que el levantamiento de la aguja es inestable (ver fig.2).

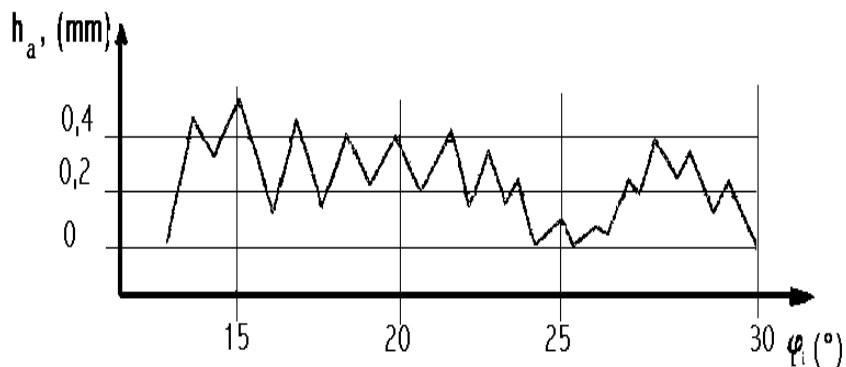


Figura 2- La característica del levantamiento de la aguja del inyector de un motor diesel (4 tiempos, 6 cilindros ,DxS=250x340 mm) para bajas velocidades de rotación [4].

Un parámetro muy importante que influye en el proceso de suministro de combustible, especialmente en los regímenes de bajas cargas, es la presión residual del combustible en la línea de alta presión (p_{res}), es decir, la presión remanente después de haber finalizado la inyección. Durante el trabajo estable del motor, la presión residual del ciclo ($p_{res.i}$) es la presión inicial del siguiente ciclo ($p_{inic.i+1}$); entonces, si las presiones residuales varían ($p_{res.1}$, $p_{res.2}$, $p_{res.3}$, etc.) tendremos también variaciones en los valores de la presión inicial y, por ende,

del consumo del combustible, puesto que este parámetro es función directa de la presión inicial.

Se sabe que al disminuir la velocidad de rotación, se incrementa el tiempo de inyección y disminuye el consumo de combustible [4] (ver fig.3). En los regímenes de cargas parciales, al inyectar pequeños consumos cíclicos de combustible, y con la disminución de la velocidad de rotación, aumentará el tiempo de duración de la inyección y disminuirá la presión de inyección.

El análisis de las características de inyección demuestra que al disminuir el suministro cíclico de combustible, la duración de la inyección decrece; los instantes reales de inyección cambian en correspondencia con la variación de las fases geométricas (se retrasa el inicio y se adelanta el fin de la inyección) y las presiones máximas de inyección disminuyen [2].

En los regímenes de bajas cargas y de bajas velocidades, la presión de los gases dentro del cilindro también disminuye; esto último sumado a la disminución de presión de inyección, en estos regímenes, hacen que el proceso de pulverización de combustible sea deficiente. Si la presión en el cilindro disminuye, el diámetro de las gotas (partículas) de combustible crece, empeorando el proceso de pulverización. La disminución de la presión de inyección también hace crecer el diámetro de las partículas (gotas) de combustible; por lo tanto, al disminuir la presión de inyección, el diámetro medio de las partículas de combustible pulverizadas crece, y la calidad de formación de la mezcla empeora [4].

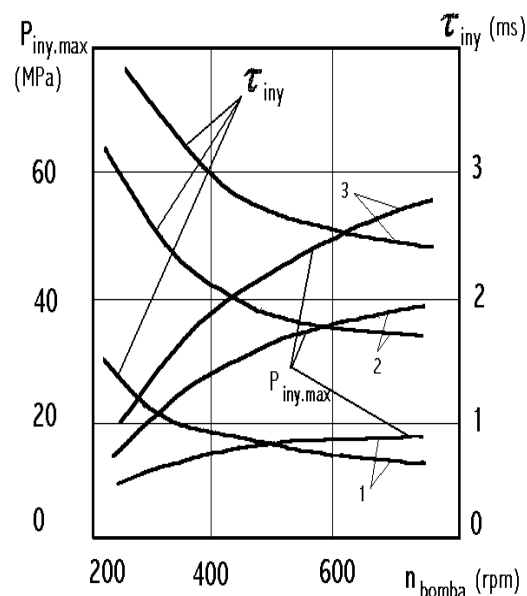


Figura 3- Variación de la presión de inyección de combustible y la duración de la inyección en función de la velocidad de rotación y del volumen de suministro cíclico [4]: 1.- $V_{sc} = 40 \text{ mm}^3$; 2.- $V_{sc} = 20 \text{ mm}^3$; 3.- $V_{sc} = 160 \text{ mm}^3$.

3. REGULACION DE LA PRESION INICIAL DE INYECCION

Si se quisiera mejorar las características del motor, durante los diferentes regímenes, es posible, por ejemplo, utilizar en el sistema de inyección diferentes válvulas correctoras para obtener una presión inicial y/o una presión residual constantes. Pero el uso de este método tiene un aspecto negativo, debido a que no se pueden regular la presión residual y presión inicial independientemente.

En los sistemas de regulación de la presión inicial, es posible y conveniente obtener una presión inicial alta, para así mejorar las características de inyección y de consumo de combustible. Pero, simultáneamente, sería necesario que la presión residual sea baja y mucho menor que la presión inicial para finalizar correctamente el proceso de inyección. Sin embargo, esto no siempre es posible obtener.

3.1 Aumento de la estabilidad del funcionamiento del motor

La curva característica del consumo de combustible específico (g_e) en función de la velocidad de rotación presentan la tendencia no lineal, tal como se muestra en la figura 4. El aumento de la estabilidad de los regímenes de trabajo del motor diesel con su consumidor, puede estabilizar la velocidad de rotación del cigüeñal, y, por tanto, disminuir el consumo del combustible [5].

Si el motor trabaja inestablemente en el rango de velocidad ($\Delta n = n_1 - n_2$), su consumo específico de combustible varía en el rango ($g_{e1} - g_{e2}$), entonces el consumo específico medio es $g_{e.med}$. Si la velocidad de rotación del cigüeñal es estable y permanece en n_{med} constante, entonces el consumo de combustible es $g_{e.med}^1$, que es menor que $g_{e.med}$, por tanto el consumo de combustible disminuye (ver fig. 4-a). Así, $g_{e.med}^1 < g_{e.med}$.

Una dependencia análoga en la economía del motor se da si la carga es estable (ver la fig. 4-b) [5]; esto es muy importante, sobretodo, para los regímenes de bajas cargas. Si el motor trabaja variando de la carga en el tramo $p_{e1} - p_{e2}$, entonces su consumo de combustible específico varía desde $g_{e1} - g_{e2}$, y su consumo de combustible es $g_{e.med}$. Si el motor trabaja con carga media constante $p_{e.med}$ su consumo específico de combustible será $g_{e.med}^1$ que es menor que $g_{e.med}$. Así, se tiene que $g_{e.med}^1 < g_{e.med}$.

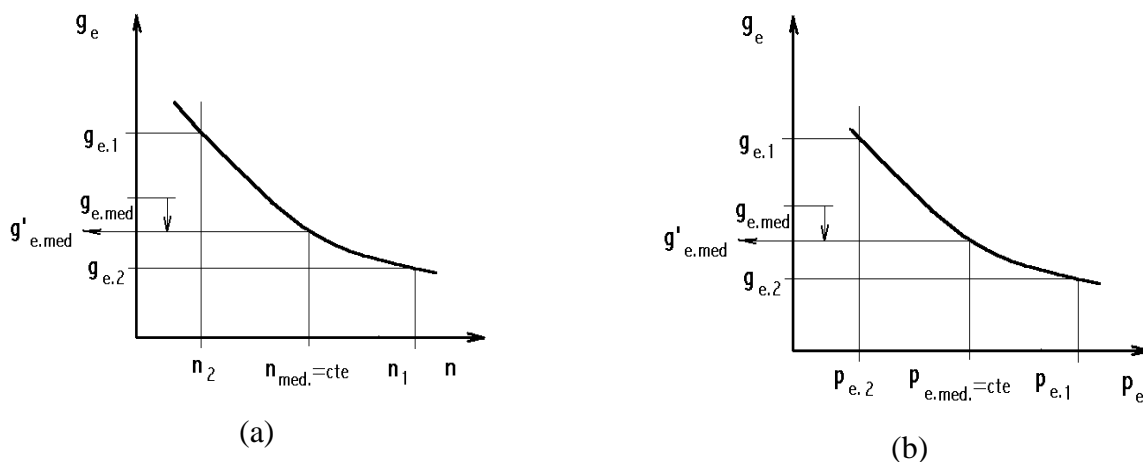


Figura 4- Influencia de la estabilidad de la velocidad de rotación del cigüeñal (n)(curva a) y de la carga (p_e)(curva b) en el consumo específico de combustible (g_e).

3.2 Método de regulación de la presión inicial de inyección

Desde hace más de dos décadas, diversas instituciones científicas y fabricantes de motores de todo el mundo vienen investigando y diseñando sistemas de alimentación de combustible con regulación de la presión inicial denominados sistemas con RND (siglas en

ruso de la regulación de la presión inicial). El principio fundamental de estos sistemas radica en que la presión inicial no dependa de la presión residual sino de su regulación.

El interés de crear sistemas con RND radica fundamentalmente en lo siguiente:

- El incremento de la presión inicial (en ciclos sucesivos de inyección) puede incrementar el suministro cíclico de combustible, el ángulo de avance de la inyección y la velocidad de suministro de combustible en la fase inicial de inyección. Para que esto sea satisfactorio es necesario cambiar algo la ley de suministro. Por ejemplo, el momento en que se alcanza la presión máxima se desplaza con la presión inicial y, para suministros constantes se reduce la duración de la inyección.
- La disminución de la presión residual favorece la finalización brusca del proceso de inyección, reduciendo así su duración y la posibilidad de goteo.
- El incremento de la presión inicial de inyección, permite estabilizar el proceso de inyección y disminuir la desigualdad de suministro cíclico por cilindros y por ciclos.
- Los sistemas con RND permiten aumentar la potencia de los motores y mejorar su economía en un amplio rango de velocidades y de cargas, incrementando el coeficiente de adaptabilidad y disminuir la velocidad mínima estable de funcionamiento.

Otra peculiaridad importante de los sistemas con RND radica en que la presión inicial se gobierna separadamente de la presión residual, permitiendo perfeccionar sus dispositivos independientemente uno del otro.

El grado de influencia de la presión inicial en el proceso de suministro de combustible depende, ante todo de la relación del volumen de suministro cíclico de combustible con respecto al volumen de la línea de impulsión; por lo tanto, la efectividad del empleo de los sistemas con RND crece con la disminución de la carga [6].

3.3 Funcionamiento de la válvula RND

Después de finalizado el proceso de inyección, la presión en la línea de impulsión cae bruscamente, alcanzando valores inclusive menores que la atmosférica; esta presión residual en la tubería vendrá a ser la inicial del siguiente ciclo de inyección.

Esta válvula funciona de la siguiente manera [3]: después del final de la inyección, cuando la válvula impelente 2, con su anillo de descarga, caen en su asiento; se forma en la línea de alta presión 3 una onda de depresión, abriéndose la válvula de retención 4 (válvula RND) y, por diferencia de presiones, el combustible complementario, proveniente de la línea de baja presión 5, ingresa a la línea de alta presión (ver fig. 5). Debido a que la onda de depresión recorre la línea 3 varias veces, hasta amortiguarse y, correspondientemente, varias veces se abre la válvula RND, el combustible complementario proveniente de la línea de baja presión, ingresa en pequeñas cantidades, en función a los niveles de depresión.

Debido a la estructura de la válvula RND, el suministro de combustible a la línea 3 ocurre sólo durante el movimiento de la válvula en la dirección de apertura, es decir, mientras la presión del combustible complementario es mayor que en la línea de alta presión. Tan pronto la presión en la línea de inyección alcanza valores mayores que la presión del combustible complementario, la válvula se cierra y se interrumpe el flujo. Sin embargo, debido al rozamiento y a la inercia de la válvula RND es inevitable pequeños retornos de la línea de alta presión.

Una importante peculiaridad de esta válvula es que cuando disminuye la carga (disminuye el suministro cíclico de combustible) permite un mayor ingreso de combustible

complementario a la línea de inyección; esto debido a que crece la intensidad y la amplitud de la onda de depresión, por acción del anillo de descarga de la válvula impelente [6].

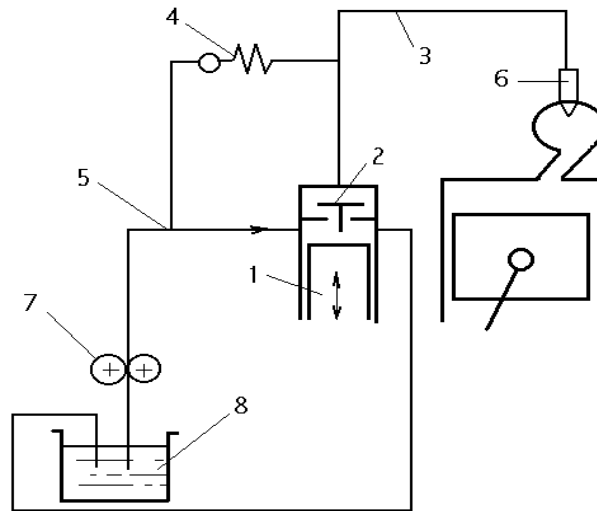


Figura 5- Válvula RND: 1- bomba de inyección; 2 - válvula impelente; 3 - LAP; 4 - válvula RND; 5 - LBP; 6 - inyector; 7 - bomba de baja presión; 8 - tanque de combustible.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para demostrar la mayor estabilidad del funcionamiento del sistema de inyección diesel en los regímenes de bajas cargas y bajas velocidades al instalarse la válvula RND, se obtuvieron los oscilogramas de presión de ciclos sucesivos, para poder así obtener las variaciones de presión y del suministro cíclico de combustible durante una determinada cantidad de ciclos de inyección. Para ello se instaló un sensor piezoeléctrico en la tubería de alta presión, junto a la válvula RND, en las cercanías del racor de la bomba de inyección.

Para realizar los ensayos se utilizó un banco de pruebas con un sistema de inyección diesel del tipo lineal y separado, el cual estaba constituido por

Bomba de inyección

- Marca	Bosch
- Tipo	lineal (código PE 6 A80 C312 LS2044)
- Número de secciones	6
- Diámetro del émbolo buzo	8 mm
- Carrera efectiva de la cremallera	6 mm (de 6 a 12 mm)

Inyector

- Marca	Bosch
- Tipo	de tetón
- Presión de apertura	175 bar

La visualización de la señal del sensor se realizó con un osciloscopio, utilizando la interface serial para la conexión con una PC. Cabe mencionar que la señal captada por el sensor de presión era la derivada de la presión en función del tiempo ($dp/d\tau$), por lo que fue necesario el procesamiento matemático de la señal, para lo cual se elaboró un pequeño programa en MATLAB (versión 4.2 b).

En las figuras 6 y 7 se muestran los oscilogramas de presión y en las figuras 8 y 9 los histogramas de caudal de combustible de ciclos sucesivos de inyección, con y sin válvula RND, respectivamente.

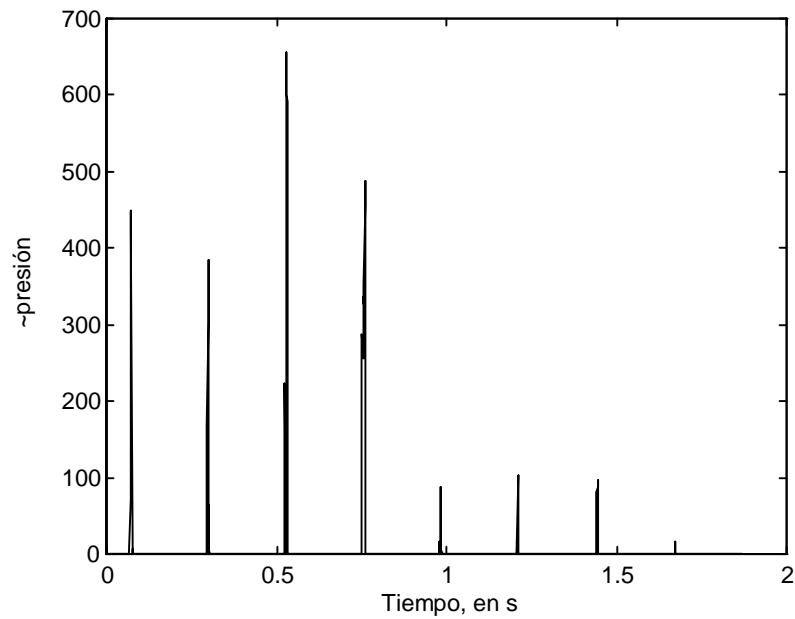


Figura 6- Oscilograma de presión, sin RND, para $n=300$ rpm y $h_{\text{cremallera}}=7$ mm.

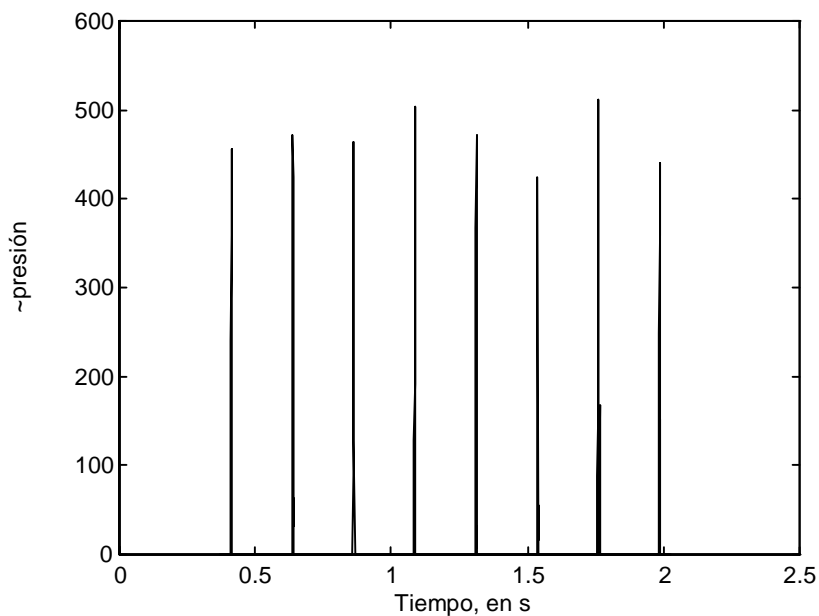


Figura 7- Oscilograma de presión, con RND, para $n=300$ rpm y $h_{\text{cremallera}}=7$ mm.

Del análisis de las figuras anteriores se puede concluir, que para las mismas condiciones de funcionamiento del sistema de inyección (velocidad de rotación y posición de la cremallera), el proceso de inyección mejora con la instalación de la válvula RND, no sólo en cuanto al suministro promedio sino también en uniformidad de suministro (menor desigualdad) y mayor nivel de presiones.

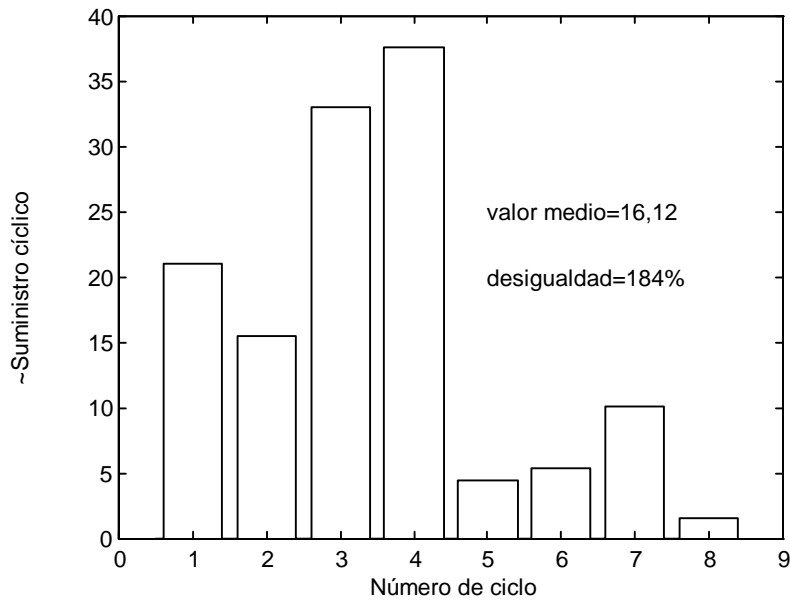


Figura 8- Histograma del suministro cíclico, sin RND, para n=300 rpm y $h_{\text{cremallera}}=7$ mm.

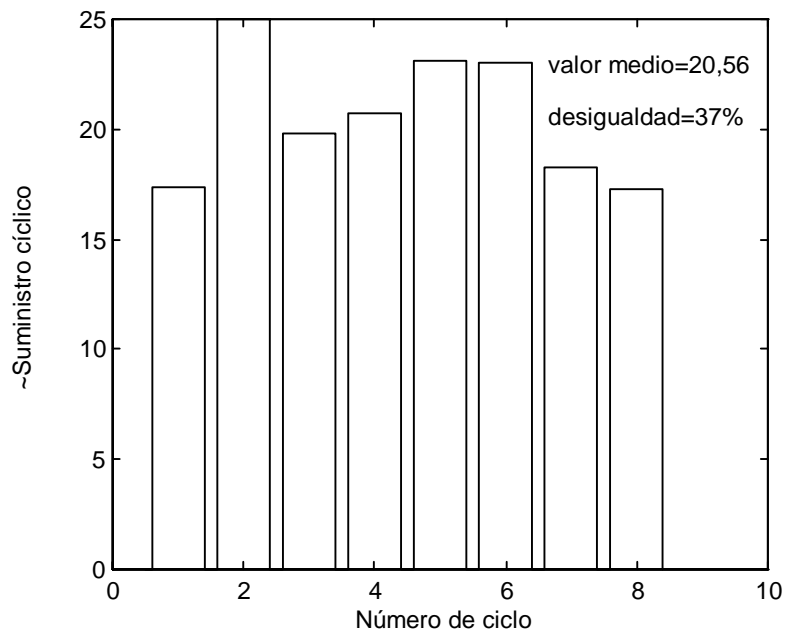


Figura 9- Histograma del suministro cíclico, con RND, para n = 300 rpm y $h_{\text{cremallera}} = 7$ mm.

Para evaluar la desigualdad de suministro de combustible por ciclos (inestabilidad del suministro), se utilizó la siguiente fórmula

$$\delta = 2(g_{sc.max} - g_{sc.min}) / (g_{sc.max} + g_{sc.min}) \quad (1)$$

donde: $g_{sc.max}$ y $g_{sc.min}$ son los suministros cíclicos máximo y mínimo, respectivamente, en varios ciclos sucesivos; en este trabajo se considero 8 puntos sucesivos.

Para las condiciones experimentales de funcionamiento de $n=300\text{ rpm}$ y posición de la cremallera igual a 7 mm , las que corresponden a la velocidad de ralentí y a 12% de carga, la desigualdad del suministro bajó de 184 a 37% al instalarse la válvula RND, mientras que el suministro cíclico aumentó en 25%.

5. CONCLUSIONES

1. El sistema de regulación de la presión inicial de inyección (RND) permite que el proceso de inyección sea más estable, principalmente, en los regímenes de bajas cargas y velocidades, que son precisamente los de mayor frecuencia en el trabajo de los motores automotrices.
2. La mayor estabilidad del funcionamiento del sistema de inyección con la válvula RND se manifiesta en una menor desigualdad del suministro cíclico de combustible, en un mayor suministro cíclico promedio y en un mayor nivel promedio de presiones, factores que indudablemente mejoran la pulverización de combustible, la formación de la mezcla aire - combustible y, por ende, mejoran los índices de potencia, economía de combustible y toxicidad de los gases de escape del motor.
3. El sistema RND es un dispositivo muy sencillo, que se puede instalar sin necesidad de hacer modificaciones constructivas al motor o al sistema de inyección.

REFERENCIAS

1. Coval, I.A., Simson, A.E., Lushichki, Y.V., “*Disminución de combustible en explotación de motores*”, Construcción de motores, N° 1, Moscú - Rusia, 1980, pp 31-39 (en ruso).
2. Jóvaj, M.S., “*Motores de automóvil*”, Editorial MIR, Moscú - Rusia, 1982.
3. Lira Cacho, J.G., Valenzuela, O.D., “*Influencia de la regulación de la presión inicial de inyección sobre los parámetros de funcionamiento de las bombas de inyección lineales*”, Memorias X CONIMERA, Lima - Perú, 1991, pp C3 1-16.
4. Orlin, A.S., “*Sistemas de motores de émbolos y combinados- Motores de combustión interna*”, Moscú - Rusia, 1985, pp 456 (en ruso)
5. Patrakhaltsev, N.N., “*Aumento de la estabilidad de trabajo del motor diesel en regímenes equiponderantes - Aumento de la economía y de la efectividad de los motores de émbolos y de turbinas*”, Editorial de URAP, Moscú - Rusia, pp 55-60 (en ruso).
6. Patrakhaltsev, N.N., Lira Cacho, J.G., Lastra Espinoza, L.A., “*Tópicos Selectos de Motores de Combustión Interna*”, Editorial IMCI-UNI, Lima - Perú, pp 73 - 74.

ABSTRAC

This work proposes a system to improve the stability of Diesel engines operating in the presence of low loads and speed rates. The system employs a special and simple valve, called RND, which is installed at the high-pressure side of the line and can be actuated automatically using pressure difference. Such an RND-valve, actually a regulator of the initial pressure, permits the additional injection of small amounts of fuel directly to the line, making stable the injection process for the indicated rates. Experimental results in form of oscillograms were obtained testing a linear injection pump with an RND-valve and a piezoelectric pressure sensor. The pressure oscillograms and the inequality fuel supply per cycle histograms show the improvement the stability of the injection system.