

UN MÉTODO ALTERNATIVO DE COMPENSACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ECONOMÍA DE LOS MOTORES DIESEL CUANDO FUNCIONAN EN LA ALTURA

*Luis Lastra Espinoza, Nicolai Patrakhaltsev **

Universidad Nacional de Ingeniería, Instituto de Motores de la Facultad de Ingeniería Mecánica

* Universidad Rusa de la Amistad de los Pueblos, Cátedra de Motores Combinados

RESUMEN

El desarrollo de nuevos métodos de compensación de las pérdidas de potencia y de economía de los motores Diesel en la altura mantienen vigencia, aún cuando la sobrealimentación por turbo-compresor es el método más efectivo. También es posible la compensación de las pérdidas de altitud forzando el proceso de trabajo del motor a través de la composición de la mezcla. Dicho forzamiento se basa en la intensificación de los procesos de formación de la mezcla y de la combustión introduciendo activadores a los cilindros del motor. Los ensayos experimentales se realizaron en el Instituto de Motores de Combustión Interna de la UNI.

ABSTRACT

The development of new methods for compensating the losses of Diesel motors due to the altitud are still in force, although the supercharging is the most effective method. It is also possible to compensate the losses by intensifying the mixture formation and the combustion processes by the addition of activators in the cylinders of the engine. The experimental test were carried out in the Institute of Internal Combustion Engines at Universidad Nacional de Ingeniería.

INTRODUCCIÓN

La vigencia del estudio de los problemas relacionados con el mejoramiento de los índices energéticos, económicos y ecológicos del motor Diesel cuando funciona en condiciones de altura es real, sobre todo para los países de la región andina, a la cual pertenece el Perú.

Como es sabido, cuando el motor Diesel trabaja en condiciones de altura se producen pérdidas de potencia, de economía, aumenta el humeado de los gases de escape, empeoran los índices explotacionales y disminuye su vida útil.

El método más efectivo de compensación de las pérdidas de potencia y de economía por efecto de la

altura es el empleo de la sobrealimentación. Sin embargo, su aplicación en motores Diesel aspirados, conlleva a modificaciones constructivas con costos elevados. La posibilidad de aplicar otros métodos es todavía más limitada ya que la mayoría de estos recurren al sobredimensionamiento del motor en condiciones normales, o a mantener constante la relación aire-combustible (α). La optimización del proceso de trabajo del motor Diesel mediante su forzamiento a través de la relación aire-combustible, se presenta como un método alternativo de compensación de las pérdidas de potencia y de economía en condiciones de altura, vale decir, el método que permite funcionar al motor en altura con una relación aire-combustible inferior al nivel propio de los motores Diesel.

El forzamiento del proceso de trabajo se realiza suministrando a los cilindros del motor activadores que intensifican los procesos de formación de la mezcla y de la combustión; dichos activadores pueden ser gas licuado de petróleo (GLP), soluciones acuosas, aditivos de naturaleza orgánica e inorgánicos, etc.

Los métodos de forzamiento del proceso de trabajo del motor Diesel a través de α ya son conocidos, sin embargo, no todos los sistemas de alimentación de combustible que los aplican sirven para aumentar la efectividad del funcionamiento del motor Diesel en la altura, pues no permiten realizar una conexión-desconexión del sistema de suministro de los activadores cuando el motor ha alcanzado el nivel correspondiente de altura. Estas propiedades los poseen los llamados sistemas con regulación de la presión inicial de inyección, los cuales permiten obtener la mezcla de dos combustibles distintos directamente, antes de la inyección en los cilindros del motor Diesel.

Para este estudio se eligió al motor Diesel monocilíndrico RICARDO E6/TS con bomba de inyección e inyector CAV. En el banco de ensayos se instaló un sistema de simulación de condiciones de altura, que permite crear depresión en la admisión, en el escape y en el cárter del motor, mediante una mariposa de estrangulación en la admisión y la succión de los gases de escape por eyección.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Para un motor Diesel dado (y, consiguientemente, para su regulación dada según la relación aire-combustible α_0^D , en condiciones normales y funcionando con petróleo Diesel) siempre existe cierto valor "crítico" de la altura H^{cr} , que al ser sobrepasada conlleva a la alteración del nivel de humos permitido por el fabricante del motor ($B_{lim. hum.}$) (Figura 1). Entonces para valores de $H \leq H^{cr}$ no es necesario el suministro del activador. Al mismo tiempo, para la máxima altura posible de trabajo del motor sobre el nivel del mar existe el valor "crítico" de la posición de la cremallera de la bomba de inyección h^{cr} , hasta el cual es posible el funcionamiento con petróleo Diesel sin sobrepasar el nivel permisible de humeado ($B_{lim. hum.}$) y, por

consiguiente, también no es necesario el suministro del activador de los procesos de formación de la mezcla y de la combustión.

De manera que para el motor, objeto de estudio con regulación inicial de la relación aire-combustible $\alpha_{01}^D = 1,3$ a la altura de 700m. ya se alcanza el límite de humos, por lo que al conectarse el sistema de suministro de GLP como activador se produce el forzamiento del proceso de trabajo del motor con una relación aire-combustible que alcanza el valor de $\alpha_{H}^{GLP} \approx 1,05$, permitiendo que el motor funcione en condiciones de mayor altitud ($H=2250$ m), sin llegar a sobrepasar el límite de humos ($B_{lim. hum.}$).

Para el caso cuando el motor tiene una regulación inicial de la relación aire-combustible $\alpha_{02}^D = 1,8$, el límite de humos ($B_{lim. hum.}$) se alcanza a una altura crítica de $H^{cr}=3500$ m., con el consiguiente enriquecimiento de la relación aire-combustible hasta el valor de $\alpha_{H}^D = 1,27$.

A partir de este momento, el aumento posterior de la altura H hace necesario conectar el sistema de suministro del activador, gracias al cual se logra forzar el proceso de trabajo del motor, de manera que incluso a una altura de $H \geq 5000$ m., es posible el funcionamiento del motor con su suministro completo de combustible a través de la bomba de inyección, es decir, prácticamente, con una compensación total de la pérdida de potencia por efecto de la altura.

El nivel admisible de humeado debe ser un poco menor que el valor correspondiente al límite de humos ($B_{adm.} < B_{lim. hum.}$); se determina, experimentalmente, para un valor de $\alpha_0 = \alpha_{opt}^D$ es decir, para el valor que corresponde a la composición de la mezcla establecida por el fabricante del motor según el método de regulación óptima, donde:

$$\alpha_{opt}^D = K \alpha_{lim. hum.}^D \quad (1)$$

K es un coeficiente empírico, e igual a 1,1-1,15.

Podemos gráficamente determinar la altura crítica (H^{cr}) que corresponde a la disminución de la relación aire-combustible desde su valor nominal $\alpha_{0\text{nom}}^D$ hasta su valor óptimo $\alpha_{\text{óptim}}^D$.

El valor "crítico" (para una altura dada H) de la posición de la cremallera h^{cr} se determina partiendo de la condición:

$$h_H^{cr} = h_{0\text{nom}} - \frac{\Delta\alpha_H}{\alpha_{0\text{nom}}^D} h_{0\text{nom}}^D \quad (2)$$

Aquí $\Delta\alpha_H$ es la disminución posible, a una altura máxima H , de la relación aire-combustible del motor Diesel, el cual tiene a nivel del mar una relación aire-combustible nominal igual a $\alpha_{0\text{nom}}^D$.

Asumiendo que en la altura:

$$\alpha_H^D = \alpha_0^D \frac{\mu}{\sqrt{\beta}} \quad (3)$$

donde: $\mu = \frac{P_H}{P_0}$ y $\beta = \frac{T_H}{T_0}$

$$\text{Entonces: } \Delta\alpha_H = \alpha_{0\text{nom}}^D \left(1 - \frac{\mu}{\sqrt{\beta}} \right) \quad (4)$$

o también:

$$h_H^{cr} = \frac{\mu}{\sqrt{\beta}} * h_{0\text{nom}}^D \quad (5)$$

De este modo, la conexión del sistema de suministro del activador tendrá lugar si se cumple la condición:

$$H \geq H^{cr} \text{ y } h \geq h^{cr}$$

Con cargas altas el suministro del activador (por ejemplo GLP) aumenta la eficiencia del motor, por eso en el gráfico A de la figura 1, la curva $\alpha_H^{GLP} = f(H)$ está por encima de la curva $\alpha_H^D = f(H)$

Las curvas α_H^{GLP} y α_H^D en el gráfico B de la misma figura 2 tienen una disposición inversa entre sí, ya que en las cargas bajas el suministro del activador estuvo acompañado de la disminución de combustible Diesel.

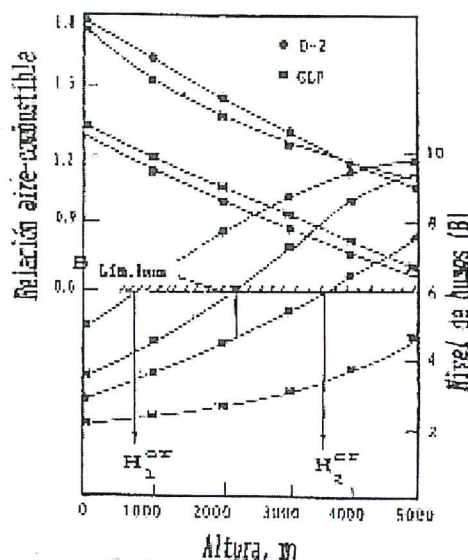


Figura 1: Variación de la relación aire-combustible y del humeado (B) del motor RICARDO, en función de la altura sobre el nivel del mar (H) durante el funcionamiento con combustible Diesel (D) y con adición del activador GLP.

Es interesante subrayar, que cuando el motor funciona con activadores, la composición de la mezcla, correspondiente al límite de humos $\alpha_{\text{lim.hum.}}$; con el incremento de H sobre el nivel del mar disminuye un poco (Figura 2). Esto está relacionado con la necesidad de reducir el suministro de combustible Diesel con el objeto de mantener constante la relación aire-combustible. Pese al empeoramiento de la calidad de la formación de la mezcla y de la combustión por efecto de la altura, el humeado disminuye, lo cual permite obtener el valor de $\alpha_{\text{lim.hum.}}$ con un enriquecimiento mayor de la mezcla. El enriquecimiento de la mezcla depende de la efectividad de los activadores.

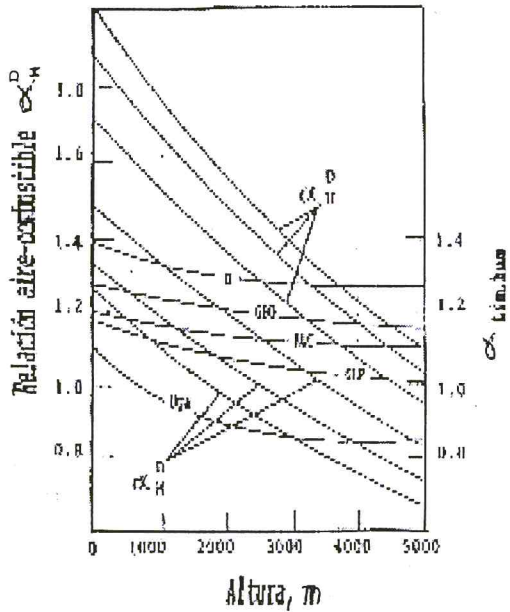


Figura 2: Variación de la relación aire-combustible α_H^D y de la relación aire-combustible correspondiente al límite de humos $\alpha_{lim.hum}$, respecto a la altura H sobre el nivel del mar cuando el motor funciona con combustible Diesel y con diferentes activadores de formación de la mezcla y de la combustión.

Los resultados del estudio, con respecto a la efectividad de diversos activadores de los procesos de formación de la mezcla y de la combustión, se pueden observar en la figura 3, para las condiciones de funcionamiento a nivel del mar.

En condiciones normales, los diferentes activadores de la formación de la mezcla y de la combustión, con un efectividad diversa, disminuyen el coeficiente de exceso de aire correspondiente al límite de humos ($\alpha_{lim.hum}$). Las uniones químico-activas como las soluciones acuosas de cloruro de bario ($BaCl_2$), así como el gas licuado de petróleo poseen una mayor efectividad.

Como se observa en la figura 2, si el motor a nivel del mar tiene la relación aire-combustible regulado para valores $\alpha_{0 nom}^D = 1,7$, el suministro de GLP le permite funcionar hasta una altura de 4500m sobre el nivel del mar sin exceder el límite de humos, aún cuando $\alpha_{lim.hum}^{GLP}$ alcanza el valor de 1,0, propio de los motores de encendido por chispa.

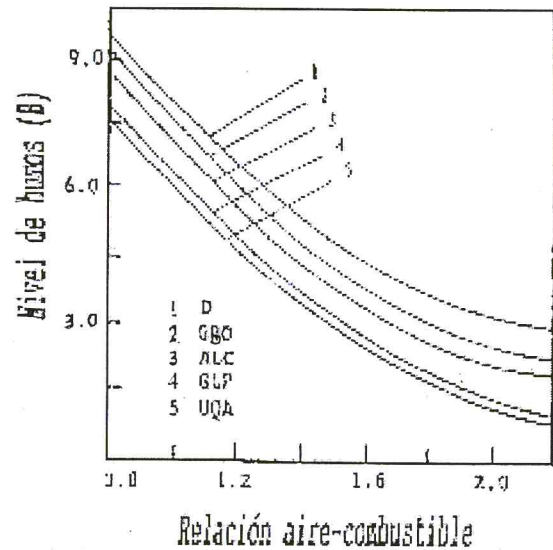


Figura 3: Variación del nivel de humos (B) en función de la relación aire-combustible (α) para condiciones atmosféricas normales ($H=0$), cuando se emplean diferentes activadores; GBO gasolina de bajo octanaje; ALC alcohol; GLP gas licuado de petróleo; UQA uniones químico-activas; D combustible Diesel D2.

En la figura 4, con la ayuda de la característica de carga, se demuestra la posibilidad del forzamiento del motor Diesel a través de la relación aire-combustible (α), cuando las condiciones de su funcionamiento corresponden a una altura de 2000 m. En estas condiciones el motor funciona con petróleo Diesel, llegando la presión media efectiva del motor (p_e) a tener el valor de 0,48 Mpa, cuando el nivel de humos alcanza el límite dado de B_{opt} (punto A). La conexión del sistema de suministro del activador, en una cantidad aproximada de 20% de todo el suministro cíclico de combustible, conduce al motor a un funcionamiento con menor nivel de humos (punto D). Esto posibilita el forzamiento posterior (en la altura) del motor, lográndose que la presión media efectiva alcance el valor de $P_e \approx 0,58$ MPa, valor incluso mayor al que tiene el motor en el régimen nominal y en condiciones normales. En la misma figura 4 se ve que el empleo de GLP en calidad de activador de la formación de la mezcla y de la combustión reduce considerablemente el nivel de humos y mejora la eficiencia del motor, ya que disminuye el consumo específico efectivo de calor (q_c).

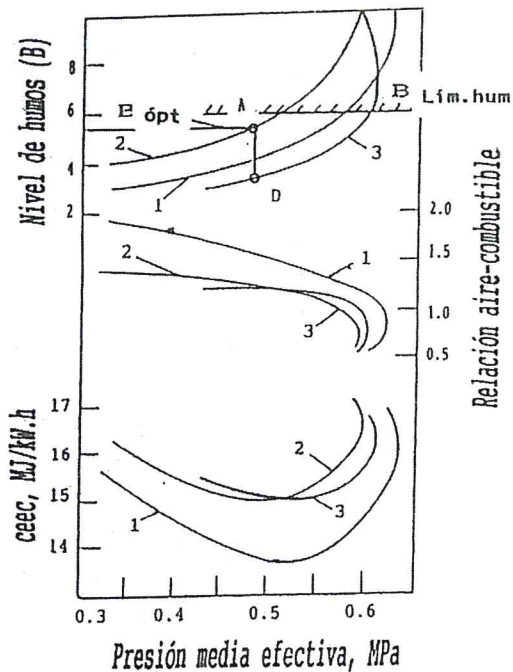


Figura 4: Característica de carga del motor RICARDO para los índices de humeado (B), de la composición de la mezcla (α), del gasto del activador GLP(X) y del consumo específico de calor (q_e) cuando funciona con combustible Diesel a nivel del mar (1) y a la altura de 2000 m. (2). Así mismo, cuando funciona con adición de X (% en masa) del activador GLP a la misma altura (3).

CONCLUSIONES

La investigación llevada a cabo permitió llegar a las siguientes conclusiones:

Es posible y real el forzamiento del proceso de trabajo del motor Diesel a través de la composición de la mezcla α . Dicho forzamiento puede realizarse gracias a la intensificación de los procesos de formación de la mezcla y de la combustión mediante la inyección a los cilindros del motor de combustible Diesel con adición de activadores, los mismos que pueden ser GLP, alcohol, aditivos orgánicos e inorgánicos, gasolinas de bajo octanaje, etc.

El suministro de los activadores se realiza con la ayuda de las válvulas de regulación de la presión inicial de inyección (RND), ubicados muy cerca de los inyectores, es decir, antes del proceso de la inyección al cilindro del motor Diesel. Este medio permite conectar-desconectar el sistema de suministro de los activadores de acuerdo con el método elegido de regulación del motor basado en

los parámetros de la altura "crítica" y de la posición "crítica" de la cremallera de la bomba de inyección.

NOMENCLATURA

- α Relación aire-combustible.
- α_o^D Relación aire-combustible a nivel del mar cuando el motor funciona con combustible Diesel.
- α_H Relación aire-combustible a una altura dada.
- α_H^D Relación aire-combustible a una altura dada cuando el motor funciona con combustible Diesel.
- $\alpha_{\text{ópt}}^D$ Relación aire-combustible correspondiente al régimen óptimo de funcionamiento del motor, cuando funciona con combustible Diesel.
- $h_{o\text{nom}}$ Posición de la cremallera de la bomba de inyección a nivel del mar y en el régimen nominal del motor, mm.
- $h_{H\text{cr}}$ Posición de la cremallera correspondiente a la altura crítica, mm.
- $\Delta\alpha_H$ Disminución de la relación aire-combustible a una altura máxima H.
- P Presión barométrica a nivel del mar, mm de mercurio.
- P_H Presión barométrica a una altura dada, mm de mercurio.
- T_o Temperatura atmosférica a nivel del mar, °K.
- T_H Temperatura atmosférica a una altura dada, °K.
- H Altura de funcionamiento del motor, m.
- H_{cr} Altura crítica de funcionamiento del motor, m.
- GLP Gas licuado de petróleo.
- α_H^{GLP} Relación aire-combustible a una altura dada cuando se suministra GLP.
- B Nivel de humos, unidades Bosch.
- q_e Calor específico efectivo del combustible, MJ/kW.h.
- $\alpha_{\text{lim.hum.}}$ Relación aire-combustible correspondiente al régimen de funcionamiento del motor en el límite de humos.
- D Combustible Diesel D-2.
- ALC Alcohol.
- UQA Uniones químico-activas.
- $B_{\text{lim.hum.}}$ Límite de humos en unidades Bosch.
- $\alpha_{o\text{nom}}^D$ Relación aire-combustible a nivel del mar cuando el motor funciona con combustible Diesel en régimen nominal.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Lastra, E. L. A.**, "Desarrollo de métodos alternativos de organización del proceso de trabajo del motor Diesel en condiciones de altura para aumentar la efectividad, economía y mejorar las cualidades ecológicas de los vehículos". (en ruso), Ph. D. Tesis, Universidad rusa de la Amistad de los Pueblos, Moscú, 1993.
2. **Lira, C. G. y Lastra, E. L. A.**, "Empleo del gas licuado de petróleo en los motores Diesel", X Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Ramas Afines, Lima, 1991.
3. **Ludeña, L. A.**, "Estudio sobre la influencia de la altura en los motores de combustión interna", *TECNIA*, Vol. 3, págs. 1-5, Lima, 1986.
4. **Patrakhaltsev, N. N.**, "Sistema de alimentación del combustible Diesel con regulación de la presión inicial de inyección", (en ruso), *Revista Dvigatelstroenie*, Vol. 8, págs. 32-35, Moscú, 1980.