

Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 2: Motores Diesel

Study of Altitude Effect on Internal Combustion Engines Operation. Part 2: Diesel Engines

Magín Lapuerta (1), Octavio Armas (1), John R. Agudelo (2) y Andrés F. Agudelo (2)

(1) Universidad de Castilla-La Mancha, Depto. de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, ETSII,

Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real-España (e-mail: magin.lapuerta@uclm.es)

(2) Universidad de Antioquia, Calle 67 N°. 53-108, A.A. 1226, Medellín-Colombia

Resumen

En este trabajo se analiza el efecto de la altitud sobre los parámetros característicos de la combustión y sobre la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) en motores diesel. Se estudiaron motores de aspiración natural y motores turboalimentados con diferentes grados de turboalimentación. Al incrementar la altitud se modifica la composición del aire atmosférico y disminuye su densidad debido a la disminución de la presión barométrica. Esto afecta la relación másica estequiométrica entre aire y combustible, por lo que el proceso de mezclado se modifica. Se encontró que las variaciones observadas sobre el desarrollo de la combustión en los motores turboalimentados son casi imperceptibles. También se muestra que hay una reducción de las emisiones de NOx con la altitud, debida principalmente a la disminución de la temperatura adiabática de combustión.

Palabras claves: *motores diesel, efecto de altitud, combustión, formación de NOx*

Abstract

This study analyzes the effect of altitude on characteristic combustion parameters and on the formation of nitrogen oxides (NOx) in diesel engines. Natural aspiration and turbocharged engines with various turbocharging levels were studied. The composition of atmospheric air changes with increases in altitude, and decreases in density due to the decrease in barometric pressure. This affects the stoichiometric mass ratio between air and fuel, modifying the mixing process. It was found that the variations observed on combustion development for

turbocharged engines are almost imperceptible. It was also shown that there was a reduction of NOx emissions with increasing altitude, primarily due to the decrease in adiabatic combustion temperature.

Keywords: diesel engines, altitude effects, combustion, NOx formation

INTRODUCCIÓN

La disminución de la presión y la temperatura atmosférica afecta la densidad del aire y su composición. Las variaciones de la densidad afectan a las prestaciones de los motores de combustión interna alternativos, ya que estos tienen sistemas de alimentación volumétricos, provocando una disminución de la presión en el cilindro a lo largo de todo el ciclo termodinámico y por tanto del rendimiento indicado. Este efecto es mayor en motores de aspiración natural que en turboalimentados, tal como se revisa en la primera parte de este trabajo. Además, la densidad y concentración de oxígeno afectan a los fenómenos locales que intervienen en la combustión y en la formación de contaminantes.

Los procesos de formación del chorro (atomización, penetración y ángulo de apertura) y de arrastre de aire al interior del frente de llama se ven igualmente afectados y por tanto también lo estará el proceso de combustión. Según Hiroyasu *et al.* (1989) y Arrègle (1998) a mayor densidad del gas en el cilindro corresponde un mayor tamaño medio de gotas en la atomización secundaria, a pesar del aumento de las fuerzas aerodinámicas. Esto se debe a que se produce una pérdida en la penetración del chorro que implica que éste sea más denso y por tanto, más sujeto a la coalescencia (choque entre diferentes gotas que dan lugar a la formación de gotas más grandes). El ángulo de apertura del chorro aumenta con el incremento de densidad del gas en el cilindro (Abramovich, 1963; Arrègle, 1998; Correas, 1998).

El tiempo de retraso, definido como el tiempo que transcurre desde que se inicia la inyección hasta que se inicia la combustión, incrementa con la altitud para motores de aspiración natural, mientras que para los turboalimentados apenas varía. Según Lizhong *et al.*, (1995), en los primeros, el inicio de la inyección ocurre en un medio con menor presión y temperatura, provocando retrasos más largos y en consecuencia mayores cargas mecánicas debido al elevado pico de presión de combustión rápida, mientras que en los turboalimentados no se ve afectado el retraso debido a que la menor contrapresión de escape favorece el incremento del régimen de giro de la turbina compensando en parte la disminución de la presión en el compresor.

Tanto la longitud característica de la llama (FL), definida como la distancia media al inyector en la que se desarrolla la llama (Turns, 1996), como el tiempo aparente de combustión (ACT), definido como el intervalo de tiempo requerido para preparar el combustible desde que es inyectado hasta que se quema a lo largo de todo el ciclo termodinámico (Fenolosa, 2003; Arrègle *et al.*, 2003), se hacen más grandes a medida que disminuye la densidad del aire.

La separación de entrada (*lift-off*) es la distancia entre el inyector y el inicio de la llama en el chorro de combustible (Dec, 1997). Dicha distancia establece la frontera entre la parte inerte, en la que el aire es arrastrado hacia el interior del chorro, y la parte reactiva, en la que el aire no puede atravesar hacia el interior por consumirse en la propia llama. Al disminuir la densidad del aire se produce un aumento de la separación de entrada, que permite un mayor flujo de entrada de aire al chorro, contribuyendo a una menor formación inicial de hollín. No obstante,

este efecto se ve ampliamente contrarrestado por la disminución de la tasa de oxidación de hollín que provoca la menor densidad del aire (García, 2004).

Las emisiones contaminantes se ven afectadas con la altitud. El *Southwest Research Institute* realizó una serie de mediciones a principios de los años noventa con el fin de cuantificar las emisiones de motores diesel de trabajo pesado empleando un simulador de altitud de muestreo a volumen constante (CVS). Human *et al.*, (1990), encontraron que para una altura simulada en el CVS de 1850 msnm (metros sobre el nivel del mar), las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) se reducían en torno a un 10% respecto a 245 msnm, mientras que las de CO, HC, material particulado y aldehídos incrementaban en promedio entre 2 y 4 veces para un motor *Caterpillar* 3208 de aspiración natural y entre 1.2 y 2 veces para un motor *Cummins* NTCC-350 turboalimentado. Las emisiones del motor turboalimentado se hacían iguales a las del naturalmente aspirado cuando dejaban fijo el inicio de la inyección. Chaffin y Ullman (1994), obtuvieron una disminución en el par, tanto transitorio como estacionario a plena carga, cercano al 6,5% para una altura simulada en el CVS de 2160 msnm (Ciudad de México) respecto a 245 msnm, en un motor *Detroit* DDC serie 60 turboalimentado equipado con interenfriador (*intercooler*) y compensador para variaciones de presión barométrica. Comparando entre estas dos altitudes, las emisiones de NOx no variaron en la prueba en transitorio y disminuyeron en torno al 2% en el ensayo estacionario a 1500 rpm. Las emisiones de HC incrementaron un 35% en la prueba transitoria y se mantuvieron invariables en las pruebas estacionarias. Las emisiones de CO incrementaron un 37% en transitorio y un 30% en estacionario. Las emisiones de partículas incrementaron en torno a un 30% en la prueba transitoria. Sin embargo, la actuación del sistema electrónico de corrección por presión barométrica (DDEC II) que equipa este motor permitió que la emisión de partículas no variara con la altura en la prueba a plena carga en régimen estacionario.

Graboski y McCormick (1996) obtuvieron las mismas tendencias (incremento del material particulado, CO, HC y ninguna variación en las emisiones de NOx) sobre un motor *Detroit* DDC serie 60 turboalimentado, ensayado a 1600 msnm bajo el ciclo transitorio para motores de trabajo pesado recomendado por (*Environmental Pollution Agency*). El material particulado incrementó en un rango de 50-75% respecto a nivel del mar. Sin embargo, detectaron una ligera disminución de la fracción orgánica soluble – SOF – (20-35% a 0 msnm contra 10-15% a 1600 msnm), lo que sugiere que el incremento del material particulado está afectado por el incremento de las emisiones de hollín.

Chernich *et al.*, (1991) reportaron un incremento promedio de un 30% en la opacidad de humos en la prueba de aceleración en vacío de 170 camiones seleccionados de manera aleatoria, al pasar de 0 a 1850 msnm. En motores que incluían control electrónico, el incremento fue inferior (en torno a 20%), mientras que Chaffin y Ullman (1994) reportaron aumentos en torno al 80% al pasar de 245 msnm a 2160 msnm.

Existen muchas variables que afectan a la formación y emisión de óxidos de nitrógeno en los motores diesel. Desantes *et al.*, (1996) propusieron un método para distinguir el efecto independiente de cada variable de operación de un motor diesel sobre la formación y emisión de NOx. Corroboraron que los parámetros que más influían en la formación del óxido nítrico, con diferencia el más importante de los NOx, eran la disponibilidad de oxígeno en la llama y su temperatura. Ambos parámetros se ven afectados con la altitud, por lo que la variación en las emisiones de NOx puede explicarse a partir de las tendencias de estos dos parámetros.

En vista de lo anterior, los fabricantes han desarrollado diversos métodos para compensar el efecto de la altitud sobre sus motores, tales como la implementación de la turbo-alimentación controlada mediante compuerta de descarga (*waste-gate*) o geometrías variables, o el uso de sensores barométricos que retroalimentan a la unidad de control electrónico para que actúe ajustando los parámetros de la inyección de combustible. Asimismo, se han implementado algunos métodos de corrección por presión barométrica que no requieren el uso de sensores

adicionales. Éstos utilizan algoritmos de cálculo basados en las ecuaciones de flujo compresible a través de una obstrucción. Las entradas al algoritmo se obtienen de los sensores existentes en el motor (Olin y Maloney, 1999).

Aunque no analizó el efecto de la variación de la presión atmosférica, Rakopoulos (1991) estudió el efecto de la temperatura y la humedad ambiental sobre las prestaciones y emisiones de un motor diesel monocilíndrico de inyección directa y aspiración natural manteniendo constante la masa de combustible inyectado. Al incrementar la temperatura ambiente en 15°C (de 22 a 37°C) se producía un aumento en la concentración de NO cercana a 100 ppm, y un incremento en el dosado (relación másica combustible/ aire) en torno al 5%. El incremento en la humedad relativa disminuía la concentración de NO, aunque en menor proporción que la temperatura. La opacidad del humo incrementó simultáneamente con el aumento de la temperatura y la humedad absoluta, siendo este efecto más pronunciado para valores de alto dosado. Este trabajo también mostró que las mejores prestaciones del motor se alcanzaban en ambientes fríos y secos y las peores, en ambientes cálidos y húmedos.

En el presente trabajo se cuantifican algunos de estos efectos y se hace una estimación del efecto de la altitud sobre parámetros característicos del proceso de combustión en motores diesel de aspiración natural y turboalimentados.

PLANTEAMIENTO

La altitud sobre el nivel del mar, z , tiene un efecto importante sobre las condiciones en las que se encuentra el aire y sobre su composición. Además de las variaciones de temperatura propias de las distintas capas de la atmósfera, la presión atmosférica disminuye a medida que aumenta la altitud del punto de medida, debido a la reducción del peso de la columna que soporta por encima, reducción que se debe tanto a la menor altura de la columna como a la menor densidad, ρ , del aire que la ocupa. En un trabajo reciente (Lapuerta *et al.*, 2005), se estima el efecto de la variación de la altitud sobre las prestaciones de motores de combustión interna alternativos, encontrando que la suposición de columna triangular es más apropiada que la de columna isoterma.

En la [Figura 1](#) se presentan los resultados de presión atmosférica, fracción molar de oxígeno en el aire y concentración de oxígeno en el aire respecto al nivel del mar (subíndice 0), obtenidos con la hipótesis de columna triangular para valores de altitud en el rango habitable. Los valores de la columna triangular corresponden a una temperatura de 20 °C a cota cero con vértice en -55 °C a cota 11000 m. En esta figura la línea continua corresponde a la fracción molar, la línea discontinua a la concentración y la línea a trazos (curva inferior) a la presión atmosférica.

En cualquier caso, de los dos efectos que contribuyen a la disminución de la concentración de oxígeno con la altitud, el más importante es, con diferencia, el efecto de la presión. A pesar que los cambios en la fracción molar pueden llegar a ser inapreciables con la altura debido a la preponderancia de los movimientos convectivos macroscópicos que desplazan los gases verticalmente (Wayne, 2000), en este trabajo sí se han considerado ya que el estudio de la altitud no se refiere tanto a la dirección vertical en la atmósfera, como a la distancia vertical del terreno respecto del nivel del mar.

En el presente trabajo se estudian los efectos de la altitud sobre distintos parámetros de demostrada importancia a la hora de analizar los procesos de mezcla y combustión y los procesos de formación de contaminantes, en el caso de los motores turboalimentados, bajo el supuesto de que disponen de los sistemas de control de la presión de admisión (compuerta de

descarga, turbinas de geometría variable, etc.) necesarios para una recuperación completa de la potencia, tal y como se describe en la primera parte de este trabajo.

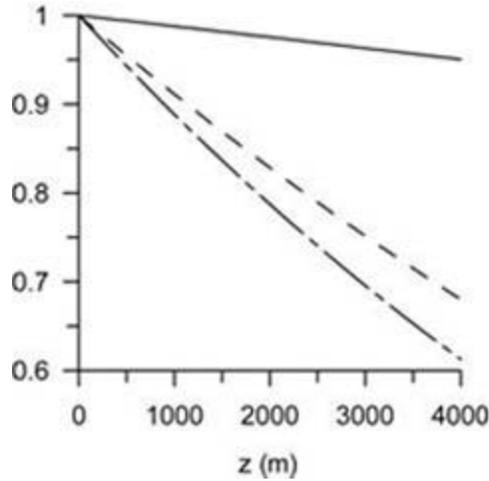


Fig. 1: Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica (p), fracción molar de oxígeno (X) y concentración de oxígeno (C), normalizados respecto al nivel del mar. $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$, $X(\text{O}_2)_0 = 0.20946$ y $C(\text{O}_2)_0 = 0.2787 \text{ kg/m}^3$

EFECTO DE LA ALTITUD

Relación combustible-aire

La reducción de la fracción molar de oxígeno con la altitud tiene como consecuencia una modificación de la relación másica estequiométrica entre aire y combustible en la combustión lo que provoca, cuando se someten a altas cotas, desajustes en la dosificación de los motores. La [Figura 2](#) muestra dicho efecto, para un gasóleo (C_nH_m) de composición típica $C_{15}H_{29}$ para la hipótesis de columna triangular. El dosado o relación combustible/aire de referencia resulta $F_{st,0} = (m_f/m_a)_{st,0} = 1/14.73$. En función de la altitud:

$$F_{st} = \left(\frac{m_f}{m_a} \right)_{st} = \frac{X_{\text{O}_2}}{n + m/4} \frac{12n + m}{PM_a} \quad (1)$$

$$\frac{F_{st}}{F_{st,0}} = \frac{X_{\text{O}_2}}{X_{\text{O}_2,0}} \quad (2)$$

donde PM_a es el peso molecular del aire.

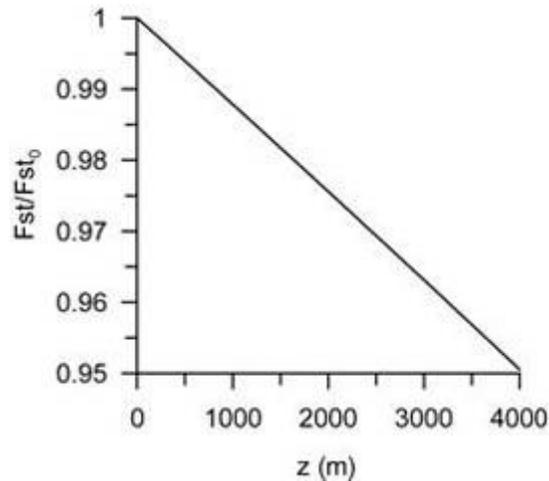


Fig. 2: Efecto de la altitud sobre la relación másica estequiométrica combustible/aire

Temperatura adiabática y oxígeno disponible

La formación de NO_x durante el proceso de combustión depende en gran medida de la temperatura y la masa de oxígeno disponible en la llama. Al ser tan rápida la combustión, apenas hay tiempo para pérdidas de energía, lo que permite que la temperatura de combustión se aproxime a la de llama adiabática. En la [Figura 3](#) se muestra el efecto de la altitud sobre la temperatura de combustión adiabática a presión constante para el mismo gasóleo del apartado anterior, calculada con un modelo de equilibrio químico implementado por el grupo de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Castilla-La Mancha (Lapuerta, 2001), que considera 35 especies y que está basado en el método de las constantes de equilibrio, para un motor de aspiración natural y diversos motores turboalimentados, con diferentes grados de turboalimentación a nivel del mar, pero todos ellos manteniendo invariable la potencia con la altitud.

Las condiciones locales de combustión también se ven afectadas por la altitud. En los motores diesel turboalimentados actuales, la mayor parte del proceso de combustión (salvo a condiciones de cargas muy bajas) es por difusión, situación bajo la cual la llama se desarrolla en condiciones aproximadamente estequiométricas (Dec, 1997). Al aumentar la altitud, la concentración de oxígeno en dichas llamas estequiométricas disminuye, al igual que la temperatura de combustión adiabática, pudiendo afectar la formación de óxidos de nitrógeno y otros contaminantes.

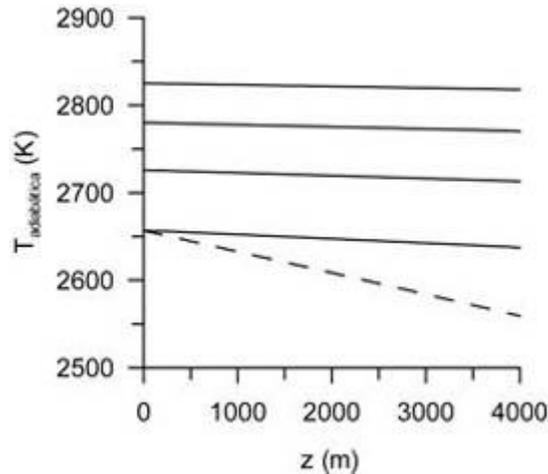


Fig. 3: Efecto de la altitud sobre la temperatura de combustión adiabática a presión constante para un motor de aspiración natural y uno turboalimentado

En esta figura la línea a trazos corresponde al motor de aspiración natural. Las líneas continuas, de inferior a superior, corresponden a un motor turboalimentado con grados de turboalimentación de 1, 1.5, 2 y 2.5, respectivamente.

En la [Figura 4](#) se observa el efecto de la altitud sobre la disponibilidad de oxígeno de una llama estequiométrica, calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 Y_{O_2, llama} &= \frac{m_{O_2}}{m_a + m_f} = \frac{m_a \cdot Y_{O_2, a}}{m_a + m_f} \\
 &= \frac{Y_{O_2, a}}{1 + \left(\frac{m_f}{m_a}\right)_{st}} = \frac{\frac{PM_{O_2}}{PM_a} \cdot X_{O_2}}{1 + F_{st}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Normalizando con las condiciones al nivel del mar, y combinando con la ecuación (2):

donde m es masa, y los subíndices indican: a : aire, f : combustible. Las tendencias mostradas en las [Figuras 3](#) y [4](#) permiten explicar las reducciones en las emisiones de NOx con la altitud reportadas en la literatura revisada. Los combustibles oxigenados, como el biodiesel, serían de mayor interés a mayor altitud, ya que pueden cumplir un papel importante de sustitución de las carencias de oxígeno aéreo y modificar las condiciones de estequiometría del proceso, y por tanto las de la mezcla.

$$\frac{Y_{O_2, llama}}{Y_{O_2, llama, 0}} = \frac{\frac{X_{O_2}}{1 + F_{st}}}{\frac{X_{O_2, 0}}{1 + F_{st, 0}}} = \frac{\frac{1}{F_{st, 0}} + 1}{\frac{1}{F_{st, 0}} \frac{X_{O_2, 0}}{X_{O_2}} + 1} \quad (4)$$

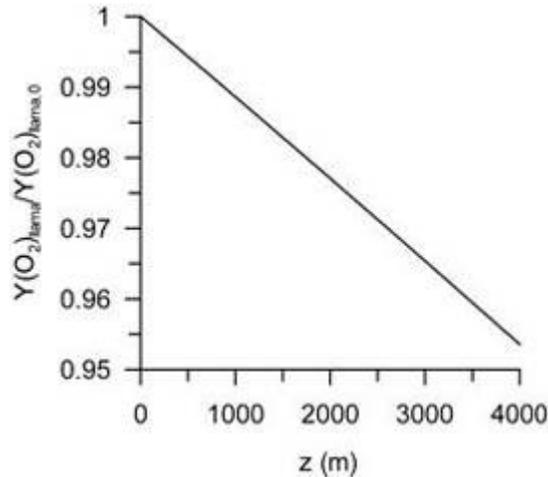


Fig. 4: Efecto de la altitud sobre la fracción másica de oxígeno disponible en la llama estequiométrica. $Y(O_2)_{llama,0} = 0.21673$

Tiempo de retraso

El tiempo de retraso se ha calculado usando la correlación (5), sugerida por Wolfer (Heywood, 1988), debido a que ésta fue obtenida empleando un sistema de inyección similar al de los motores diesel, y a que el combustible usado tenía un número de cetano similar al empleado para determinar el efecto de la relación combustible-aire y las presiones y temperaturas en el momento de la inyección fueron similares a las calculadas en este trabajo (proceso de compresión politrópico con exponente politrópico 1.35 y relación de compresión volumétrica típica de 17:1).

$$t_{ret} = A_1 \cdot p^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) \quad (5)$$

donde los valores de las constantes son: $A_1 = 0.44 \text{ ms} \cdot \text{atm}^n$, $n = 1.19$ y $E_A/R = 4650 \text{ K}$ (Heywood, 1988), y donde presión y temperatura se refieren a las condiciones de compresión, identificadas a continuación con el subíndice *comp*. Normalizando la ecuación (5) respecto al nivel del mar se obtiene:

$$\frac{t_{ret}}{t_{ret,0}} = \left(\frac{P_{comp}}{P_{comp,0}} \right)^{-n} \cdot \frac{\exp\left(\frac{E_A}{RT_{comp}}\right)}{\exp\left(\frac{E_A}{RT_{comp,0}}\right)} \quad (6)$$

$$= \left(\frac{P_{comp}}{P_{comp,0}} \right)^{-n} \cdot \exp\left[\frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{comp}} - \frac{1}{T_{comp,0}} \right) \right]$$

Tal y como muestra la [Figura 5](#), el tiempo de retraso del motor de aspiración natural aumenta con la altitud, mientras que en el motor turboalimentado, que mantiene invariable la potencia con la altitud, tiende a disminuir, cualquiera que sea la relación de compresión del turbocompresor a nivel del mar, debido a que mantiene aproximadamente constante la presión y la temperatura en el momento de la inyección. En esta figura la línea a trazos corresponde al motor de aspiración natural. Las líneas continuas, de inferior a superior, corresponden a un motor turboalimentado con grados de turboalimentación de 1, 1.5, 2 y 2.5, respectivamente.

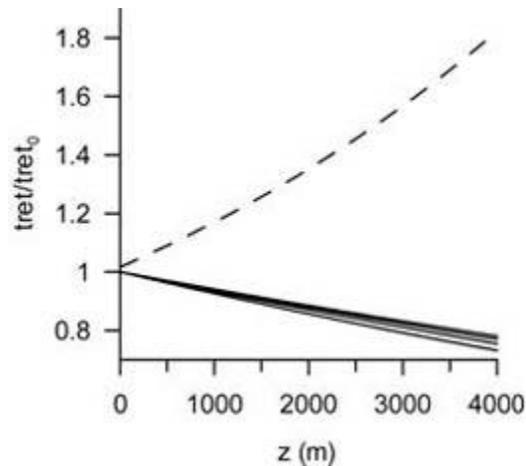


Fig. 5: Efecto de la altitud sobre el tiempo de retraso

Tiempo aparente de combustión y longitud de llama

El tiempo aparente de combustión (ACT) se ha calculado a partir de la expresión obtenida por Arrègle et al., (2003):

$$ACT_i = k_1 \left[\rho^{0.5} \cdot u_0 \cdot Y_{O_2}^{0.5} \cdot \phi_0^{-1} \right]_{POI_i \rightarrow POC_i}^{-1} \quad (7)$$

donde k_1 es una constante de proporcionalidad, r es la densidad del gas en la cámara, u_0 es la velocidad del chorro a la salida del inyector y f_0 el diámetro del inyector. El

subíndice $POI_i \rightarrow POC_i$ indica que el cálculo se realiza desde el inicio de la inyección hasta el final de la combustión. Si se dejan constantes los parámetros de inyección u_0 y f_0 y se

normaliza el tiempo de combustión aparente respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión (despreciando la variación del peso molecular del aire con la altitud):

$$\frac{ACT}{ACT_0} = \left(\left(\frac{P_{comp,0}}{P_{comp}} \right) \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,0}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{X_{O_2,0}}{X_{O_2}} \right)^{0.5}$$

$$= \left(\left(\frac{P_{adm,0}}{P_{adm}} \right) \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,0}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{X_{O_2,0}}{X_{O_2}} \right)^{0.5} \quad (8)$$

En la [Figura 6](#) se muestra el efecto de la altitud sobre el ACT, observándose un incremento más pronunciado en los motores de aspiración natural que en los turboalimentados (en esta ocasión independientemente del grado de turboalimentación). En esta figura la línea a trazos corresponde a un motor de aspiración natural y la continua a uno turboalimentado.

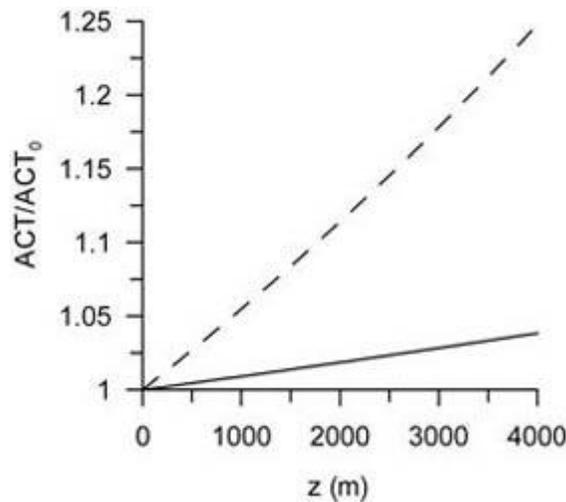


Fig. 6: Efecto de la altitud sobre el tiempo de combustión aparente (ACT)

La longitud de llama se ha calculado usando la ecuación (9) sugerida por Fenolosa (2003):

$$FL = k_2 \cdot \left(\frac{m_a}{m_f} \right)_{st} \cdot \left(\frac{Y_{O_2, adm}}{Y_{O_2}} \right) \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho} \right)^{0.5} \quad (9)$$

donde k_2 es una constante de proporcionalidad, m es masa, Y_{O_2} es la fracción másica de oxígeno en el gas de la cámara (que puede ser inferior a la del aire admitido $Y_{O_2, adm}$ en el caso de existir recirculación de gases de escape, EGR), r_f la densidad del combustible líquido, y f_0 el diámetro del inyector. Si se dejan constantes los parámetros r_f y f_0 y se normaliza el tiempo de combustión aparente respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión, que sería válida incluso ante la presencia de EGR ya que el cociente de fracciones másicas de oxígeno no se modificaría con la altitud:

$$\frac{FL}{FL_0} = \left(\left(\frac{P_{comp,\rho}}{P_{comp}} \right) \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,\rho}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{F_{st,\rho}}{F_{st}} \right)^{0.5}$$

$$= \left(\left(\frac{P_{adm,\rho}}{P_{adm}} \right) \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,\rho}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{F_{st,\rho}}{F_{st}} \right)^{0.5} \quad (10)$$

En la [Figura 7](#) se muestra el efecto de la altitud sobre este parámetro. Se observa que mientras que en los motores de aspiración natural la llama tiende a aumentar su longitud, en los motores turboalimentados disminuye ligeramente. En esta figura la línea a trazos corresponde a un motor de aspiración natural y la continua a uno turboalimentado.

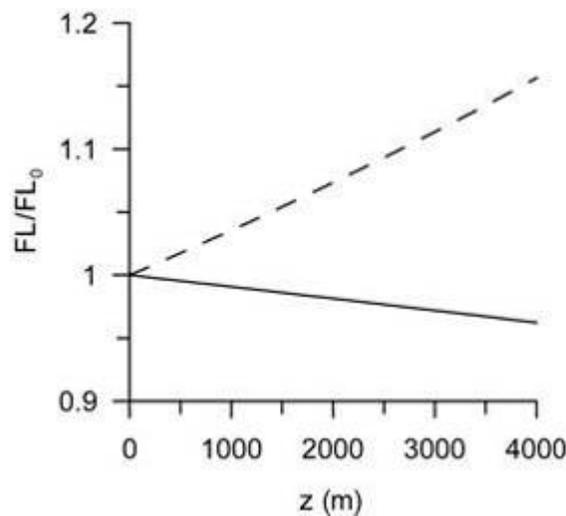


Fig. 7: Efecto de la altitud sobre la longitud de llama

Separación de entrada

La separación de entrada se ha calculado a partir de la expresión (11), sugerida por García (2004).

$$LOL = k_3 \cdot T^{-3.103} \cdot \rho^{-1.378} \quad (11)$$

donde k_3 es una constante de proporcionalidad, y T y ρ son la temperatura y densidad de los gases en el cilindro en el momento de la inyección. Normalizando la ecuación (11) respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{LOL}{LOL_0} &= \left(\frac{P_{comp}}{P_{comp,0}} \right)^{-1.378} \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,0}} \right)^{-1.725} \\ &= \left(\frac{P_{adm}}{P_{adm,0}} \right)^{-1.378} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,0}} \right)^{-1.725} \end{aligned} \quad (12)$$

En la [Figura 8](#) se muestra el efecto de la altitud sobre la separación de entrada, observándose un incremento pronunciado en los motores de aspiración natural, consecuencia de la menor temperatura y presión de compresión, y una pequeña disminución en los turboalimentados, como consecuencia de los mencionados mecanismos de corrección para la recuperación de potencia. En esta figura la línea a trazos corresponde a un motor de aspiración natural y la continua a uno turboalimentado.

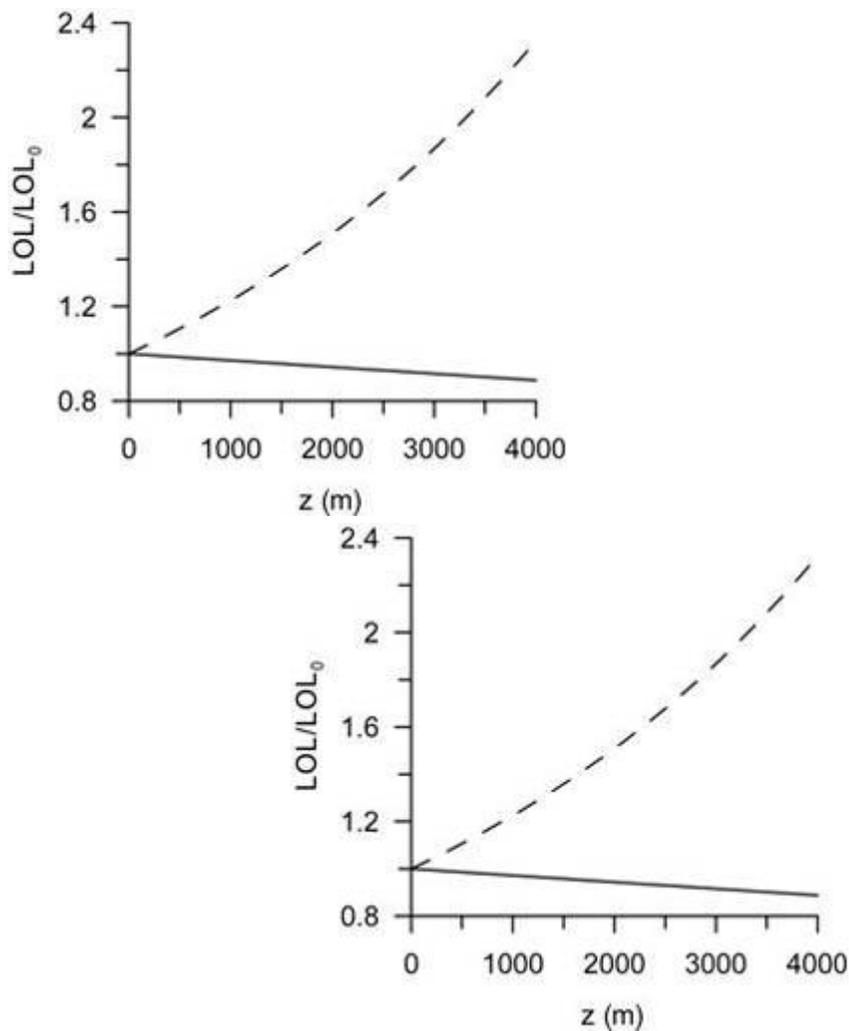


Fig. 8: Efecto de la altitud sobre la separación de entrada

Efecto sobre las emisiones de NOx

Como se justificó arriba, tanto la temperatura de combustión adiabática como la disponibilidad de oxígeno estequiométrico en la llama, ambas función de la altitud, pueden afectar a la formación de NOx. La dependencia de estas emisiones con la temperatura de combustión adiabática ha sido estudiada por muchos autores (Ahmad y Plee, 1983; Iida y Watanabe, 1990; Desantes *et al.*, 1996), quienes sugieren una expresión de tipo Arrhenius:

$$NOx = A_2 \cdot e^{-B \left[\frac{1}{T_{adiab}} \right]} \quad (13)$$

donde A es una constante, B es la relación entre la energía de activación y la constante universal de los gases y T_{adiab} , es la temperatura de combustión adiabática. Normalizando esta última ecuación respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{NOx}{NOx_0} = e^{B \left[\frac{1}{T_{adiab_0}} - \frac{1}{T_{adiab}} \right]} \quad (14)$$

Ahmad y Plee (1983) han encontrado valores de $B=285000$ J/mol, mientras que Iida y Watanabe (1990) sugieren $B=586000$ J/mol y Desantes *et al.* (1996) han encontrado que B puede variar entre 144000 y 403000 J/mol según se varíe la temperatura o la presión inicial.

En la [Figura 9](#) se muestra la variación de las emisiones de NOx con la altitud calculados a partir de la ecuación (14), tomando $B=144000$ J/mol. Los resultados coinciden con los obtenidos experimentalmente por Human *et al.* (1990), Chaffin y Ullman (1994) y Graboski y McCormick (1996), según los cuales en motores de aspiración natural se obtienen disminuciones en las emisiones de NOx en torno al 11% para alturas de 1850 msnm, mientras que para motores turboalimentados las máximas reducciones estaban en torno a 2% para alturas de 1600 y 2160 msnm. En esta figura la línea a trazos corresponde al motor de aspiración natural. Las líneas continuas, de inferior a superior, corresponden a un motor turboalimentado con grados de turboalimentación de 1, 1.5, 2 y 2.5, respectivamente.

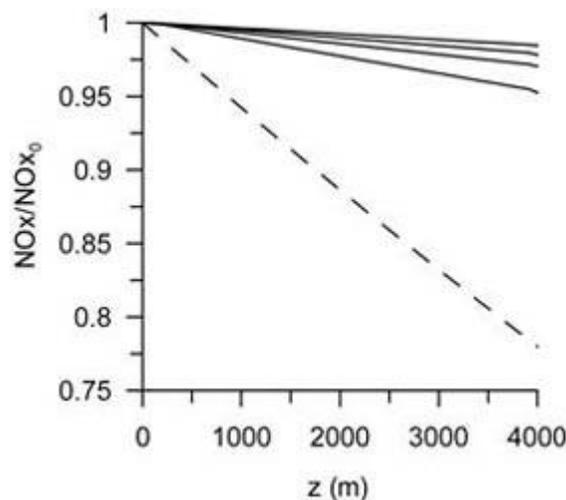


Fig. 9: Efecto de la altitud sobre las emisiones de NOx

De los resultados obtenidos en la [Figura 9](#) se comprueba que con diferencia el efecto más importante en la emisión de NOx con la altitud es la temperatura de combustión adiabática, ya que ésta permite explicar por sí sola los resultados experimentales encontrados en la literatura.

CONCLUSIONES

Para estudiar el efecto de la altitud sobre los procesos de combustión y de formación de contaminantes en un motor diesel, no basta con tener en cuenta las variaciones de la presión y de la temperatura ambiental, sino también las de la composición del aire.

La composición del aire afecta a la relación estequiométrica combustible/aire, y como consecuencia, a las condiciones de la mezcla en la cámara de combustión necesarias para la combustión por difusión, dominante en motores diesel. Estas condiciones de mezcla pueden observarse a través de parámetros como la longitud de la llama, la concentración de oxígeno en la llama o la duración de la combustión.

Las variaciones estimadas sobre el desarrollo de la combustión al variar la altitud son casi inapreciables en el caso de motores turbo-alimentados. Además, las ligeras reducciones del tiempo de retraso se compensan con los tiempos algo más largos de duración de la combustión.

La reducción de las emisiones de NOx con la altitud se debe principalmente a la disminución de la temperatura de combustión adiabática, y en menor medida, a la presencia de oxígeno en la llama. Las estimaciones realizadas de ambas variables, y de su efecto sobre la emisión de NOx demuestran que la variación de la temperatura justifica por sí sola las reducciones observadas.

NOMENCLATURA

Subíndices

A_1	Constante para el cálculo del tiempo de retraso
A_2	Constante para el cálculo de las emisiones de NOx
ACT	Tiempo aparente de combustión
B	Constante para el cálculo de las emisiones de NOx
E_A	Energía de activación
EGR	Recirculación de gases de escape
F	Relación másica combustible/aire
FL	Longitud característica de llama
k_1	Constante para calcular el tiempo aparente de combustión
k_2	Constante para calcular la longitud de llama
k_3	Constante para calcular la separación de entrada
LOL	Separación de entrada

n	Constante empírica para calcular el tiempo de retraso
p	Presión
PM	Peso molecular
POC	Punto de finalización de la combustión
POI	Punto de inicio de la inyección
R	Constante universal de los gases
T	Temperatura
t_{ret}	Tiempo de retraso
u_0	Velocidad del chorro a la salida del inyector
X_{O_2}	Fracción molar de oxígeno en el aire
Y_{O_2}	Fracción másica de oxígeno en el aire
z	Altitud sobre el nivel del mar
ϕ_0	Diámetro de la tobera del inyector
ρ	Densidad
π	Relación de compresión del turbo
a	Aire
<i>adiab</i>	Adiabático
<i>adm</i>	Admisión
<i>comp</i>	Compresión
f	Combustible
m	Átomos de carbono en el combustible
n	Átomos de hidrógeno en el combustible
st	Estequiométrico
0	A nivel del mar

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) por su financiación de una Red Temática entre universidades españolas y colombianas, y al Ministerio de Educación, Cultura y Deportes de España por la financiación de la estancia posdoctoral de John R. Agudelo en la Universidad de Castilla-La Mancha.

REFERENCIAS

Abramovich, G. N., *The theory of turbulent jets*, MIT Press, Massachusetts, USA (1963).

Ahmad, T y S. L Plee, SAE Paper 831734, (1983).

Arrègle, J., *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros diesel*. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia SPUPV 98.2140 (1998).

Arrègle, J., J. J López, J. M García y C Fenollosa. *Development of a zero-dimensional diesel combustion model. Part 1: Analysis of the quasi-steady diffusion combustion phase*. Applied Thermal Engineering, 23, 1301-1317 (2003).

Correas, D., *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel isoterma*, Tesis doctoral, Depto. de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, España (1998).

Chaffin, C. A y T. L Ullman, *Effects of increased altitude on heavy-duty diesel engine emissions*. SAE Paper 940669 (1994).

Chernich, D. J., P. E Jacobs y J. D Kowalski, *A comparison of heavy-duty diesel truck engine smoke opacities at high altitude and at sea level*, SAE Paper 911671 (1991).

Dec, J. E., *Conceptual model of DI Diesel combustion based on laser-sheet imaging*, SAE Paper 970873 (1997).

Desantes, J. M., M Lapuerta y J. M Salavert, *Study on independent effects of diesel engine operating conditions on nitric oxide formation and emissions through schematical combustion simulation*, Proc. Instn. Mech. Engrs, Vol. 210. D02894, 71-80 (1996).

Fenollosa, C., *Aportación a la descripción fenomenológica del proceso de combustión por difusión diesel*, Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, España (2003).

García, J. M., *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*, Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, España (2004).

Graboski, M. S. y R. L McCormick, *Effect of diesel fuel chemistry on regulated emissions at high altitude*, SAE Paper 961947 (1996).

Heywood, J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, Nueva York, USA (1988).

Hiroyasu, H., M Arai y M Tabata, *Empirical equations for the Sauter mean diameter of a Diesel spray*, SAE Paper 890464 (1989).

Human, D. M., T. L Ullman y T. M Baines, *Simulation of high altitude effects on heavy-duty diesel emissions*, SAE paper 900883 (1990).

Iida, N y J Watanabe, *Surrounding gas condition effect on NOx and particulate. Diagnosis and modelling of combustion in internal combustion engines*, COMODIA 90, Kyoto, Japan (1990).

Lapuerta, M., J. J Hernández, F Tinaut y A Horrillo, *Composición en equilibrio y propiedades termodinámicas de los productos de combustión de un hidrocarburo oxigenado y nitrosulfurado*, Información Tecnológica, 12 (3) 43-52 (2001).

Lapuerta, M., O Armas y J. R Agudelo, *Estudio del efecto de la altitud sobre las prestaciones de motores de combustión interna*, Memorias del IV congreso nacional de ingeniería termodinámica, La Rioja, España (2005).

Lizhong, S., S. Yungang, Y. Wensheng y X. Junding, *Combustion process of diesel engines at regions with different altitudes*, SAE Paper 950857 (1995).

Olin, P. M. y P. J Maloney, *Barometric pressure estimator for production engine control and diagnostics*, SAE Paper 1999-01-0206 (1999).

Rakopoulos, C. D., *Influence of ambient temperature and humidity on the performance and emissions of nitric oxide and smoke of high speed diesel engines in the Athens/Greece region*, Energy Conversion and Management, 31 (5), 447-458 (1991).

Turns, S. R., *An introduction to combustion. Concepts and applications*, McGraw-Hill, Nueva York, USA (1996).

Wayne, R., *Chemistry of Atmospheres*, Oxford University Press, Tercera edición, Oxford, Inglaterra (2000).



Todo el contenido de esta revista, excepto dónde está identificado, está bajo una [Licencia Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Monseñor Subercaseaux 667

La Serena - Chile

Tel.: (56-51) 2551158

Fax: (56-51) 2551158



citrevistas@gmail.com