

LEYES DE SEMEJANZA DE LOS MOTORES DIESEL MODERNOS

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de tendencias y leyes de semejanza de los motores Diesel 2003 para vehículos de carga. Para esto se compilaron y procesaron las especificaciones de motores comerciales de diferentes fabricantes. Se examinan las relaciones entre los parámetros de desempeño, las dimensiones y la geometría de estos motores. Los resultados del análisis de las leyes de semejanza muestran una excelente correlación entre el momento torsor máximo y la cilindrada. La correlación entre la máxima potencia dividida por la velocidad del pistón y la cilindrada muestra ser importante para tener en cuenta al momento de valorar un nuevo diseño de motor.

PALABRAS CLAVES: leyes de semejanza, tendencias de motores Diesel, desempeño.

ABSTRACT

In this paper results drawn from the study of trends and scaling laws applied to 2003 heavy duty Diesel engines are presented. To this effect technical data of different commercial engines were compiled and processed. Relationships between performance parameters, dimensions, and geometry for Diesel engines are examined. Results demonstrate an excellent correlation between engine displacement and maximum torque. Correlation between power divided by piston speed and engine displacement is a fair parameter to keep in mind to assess a new engine design.

KEYWORDS: scaling laws, Diesel engine trends, performance.

1. INTRODUCCIÓN

En las etapas de desarrollo y modelado de los mecanismos y sistemas de los motores, es útil atender la evolución de los parámetros de explotación y constructivos de los mismos, desde la perspectiva de las leyes de semejanza. A partir de los fundamentos termodinámicos se pueden obtener correlaciones de los parámetros geométricos como la cilindrada, el área del pistón, el número de cilindros, la relación diámetro sobre carrera y la relación de compresión, en las combinaciones apropiadas, con los parámetros de desempeño del motor como son el momento torsor máximo, la potencia y la presión media efectiva. También las leyes de la fluidodinámica y ciencia de materiales generan relaciones limitantes para los parámetros de régimen como la presión media efectiva, las revoluciones y las velocidades del pistón.

Los motores geoméricamente semejantes tienen iguales rendimientos teóricos termodinámico, mecánico y efectivo, igual consumo teórico específico de combustible, iguales son también las cargas térmicas (gradiente de calor por unidad de superficie enfriada), la potencia específica, los esfuerzos debidos a las fuerzas de los gases y a las fuerzas de inercia, las cargas específicas sobre los rodamientos y la masa constructiva del motor (la masa dividida por la suma de los cuadrados del diámetro de los cilindros). El perfeccionamiento de los

CARLOS ALBERTO ROMERO PIEDRAHITA

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Profesor Titular
Escuela de Tecnología Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
cromero@utp.edu.co

YAMID ALBERTO CARRANZA SÁNCHEZ

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Escuela de Tecnología Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
yamidc@utp.edu.co

motores modernos, acompañado de la integración al motor de novedosas alternativas constructivas y tecnológicas puede hacer que las leyes de semejanza correspondientes a los motores clásicos sufran distorsiones de alguna importancia.

En el presente trabajo se reportan los resultados de la confrontación de las funciones relativas a los parámetros de desempeño como el momento torsor y la potencia efectiva en relación con la cilindrada, con las funciones obtenidas luego de procesar información de motores Diesel modernos para vehículos de carga, disponible en la base de datos de la revista *Off Highway Engineering* [4], en la cual se especifican diversos motores Diesel para servicio pesado con aplicaciones como camiones, accionamientos industriales y estacionarios, maquinaria para construcción, agricultura y grupos electrógenos.

También se relacionan los valores de los diámetros de los cilindros con las revoluciones nominales de los motores y de la potencia específica en función del diámetro de los cilindros, como parámetros de referencia requeridos al momento de realizar el diseño conceptual de los motores Diesel.

Aparte de las consideraciones de desempeño exigidas a los motores modernos, resultaría importante tener un análisis de tendencia de las emisiones y del consumo específico de combustible, basado en alguna ley

fundamental de los motores. Sin embargo, en el aspecto ambiental, lo que ocurre actualmente es una reducción de la masa de los contaminantes principales: NO_x y material particulado MP, impulsada por las exigencias de las entidades reguladoras a nivel mundial (por ejemplo Environmental Protection Agency EPA en EE.UU.), y también una lenta disminución del consumo de combustible producto de la combinación de diferentes medidas constructivas y tecnológicas (control de la cantidad y forma de dosificación, la elevación de las presiones de inyección, el enfriamiento de los gases recirculados), no estando sujetas a relaciones de escalado.

2. LEYES DE ESCALADO

El momento torsor máximo en un motor está dado por la cantidad de combustible que puede ser quemado dentro del cilindro del motor, la cual es limitada por la cantidad de aire presente en la mezcla. Como es relativamente fácil aumentar la cantidad de combustible inyectado al cilindro, la cantidad máxima del flujo de aire está limitada por los efectos de choque en las válvulas y la configuración de los ductos de admisión.

El aumento del número de cilindros para una misma cilindrada permite que varios aspectos mejoren el desempeño del motor. En primer lugar, con un valor constante de la relación carrera sobre diámetro, S/D , el incremento del número de cilindros reduce la longitud de la carrera, lo que permite que el motor trabaje a mayores revoluciones manteniendo óptimo el valor de la velocidad media máxima del pistón (limitada por el choque de flujos a cerca de 15 m/s) y se incremente la potencia. En segundo lugar, con el aumento del número de cilindros aumenta la frecuencia de los pulsos de potencia y se reduce la magnitud de cada pulso producido del momento torsor, mejorando así la suavidad del motor. El tamaño global por unidad de potencia producida (volumen específico) se reduce también, lo mismo que la masa específica.

La relación S/D influye sobre la salida del motor. Los motores modernos Diesel tienen relaciones entre 1,0 y 1,2. Para una cilindrada dada, una carrera más corta disminuye la fricción del motor, más apreciablemente a elevadas velocidades, incrementando la máxima potencia del mismo. Este es el caso de los motores Diesel, en los que la relación S/D presenta una tendencia a la disminución.

Aumentando el número de válvulas por cilindro para un diámetro de cilindro dado mejora el llenado del motor. Las configuraciones más comunes son dos válvulas por cilindro y cuatro válvulas por cilindro. Aumentando el número de válvulas se aumenta el área de admisión. Como puede mostrarse con el modelo unidimensional para flujo compresible a través de un orificio, el flujo másico de aire aumenta proporcionalmente con el aumento del área de admisión efectiva:

$$\dot{m} = \frac{A_E P_o}{\sqrt{RT_o}} \left\{ \frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P}{P_o} \right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_o} \right)^{(k+1)/k} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

Donde el área efectiva de restricción del flujo es A_E y el aire es modelado como un gas ideal con constante del gas R y relación de calores específicos k . La presión y temperatura totales antes de la restricción son P_o y T_o , respectivamente, mientras que P es la presión en la restricción. Esta ecuación da la velocidad de flujo de aire desde medias hasta altas velocidades del motor.

2.1 Presión media efectiva.

Aunque el momento torsor y la potencia determinan las características del motor y su habilidad para realizar trabajo, estos parámetros dependen de la geometría del motor y, especialmente, de su tamaño. La medida normalizada estándar del desempeño del motor se obtiene dividiendo el trabajo realizado por ciclo por el volumen barrido. Este parámetro se conoce como la presión media efectiva p_e :

$$P_e = \frac{L_e}{V_h \cdot i} = \frac{\tau \cdot N_e}{V_h \cdot i \cdot n \cdot 2} = \frac{\pi \cdot \tau \cdot M_e}{V_h \cdot i} \quad (2)$$

Donde:

- L_e : es el trabajo realizado en el ciclo
- V_h : es el volumen de trabajo del cilindro
- i : es el número de cilindros
- N_e : es la potencia indicada del motor de i cilindros
- n : es el número de revoluciones por segundo
- τ : es el número de tiempos del motor
- M_e : es el momento torsor efectivo

Mucha de la tecnología de los motores actuales se enfoca a mejorar el llenado del motor con el consecuente mejoramiento del rendimiento volumétrico. La presión media efectiva p_e puede también ser expresada por:

$$P_e = \eta_m \eta_i \eta_v \rho_{ao} \left(\frac{m_c}{l_o} \right) H_u \quad (3)$$

Donde:

- η_m : es el rendimiento mecánico
- η_i : es el rendimiento indicado
- η_v : es el rendimiento volumétrico
- ρ_{ao} : es la densidad del aire
- m_c : es la masa de combustible
- l_o : es la masa de aire
- H_u : es el poder calorífico inferior

2.2 Momento torsor y potencia efectiva

Para un motor optimizado dado, el momento torsor efectivo máximo $M_{em\acute{a}x}$ está relacionado o escalado con la cilindrada según la relación:

$$M_{em\acute{a}x} = \frac{P_{em\acute{a}x}}{\pi \cdot \tau} V_h \cdot i \quad (4)$$

La potencia efectiva máxima, $N_{em\acute{a}x}$, se relaciona con la cilindrada, $V_h \cdot i$, mediante la presión media efectiva como se muestra en la expresión (5). La pendiente de esta línea, la potencia específica o potencia litro (kW/l) se usa ampliamente como medida normalizada del desempeño del motor:

$$N_{em\acute{a}x} = \frac{2 \cdot p_{eN} \cdot n_N}{\tau} V_h \cdot i \quad (5)$$

Donde:

p_{eN} : es la presión media efectiva a potencia máxima

n_N : es el número de revoluciones a potencia máxima

Sin embargo, la velocidad del motor a la potencia máxima es también una variable en la ecuación. Es la máxima velocidad media del pistón la que está limitada por la física (choque del flujo del aire durante la admisión), antes que las revoluciones del motor. La velocidad media del pistón está dada por:

$$v_{pm} = 2 \cdot S \cdot n \quad (6)$$

Donde:

S : es la carrera del pistón.

Combinando las ecuaciones (5) y (6), la potencia efectiva máxima queda en función de la velocidad media del pistón y el área total de pistones F_p ($F_p = F \cdot i$, siendo F el área por pistón):

$$N_{em\acute{a}x} = \frac{P_{eN} \cdot v_{pm} \cdot F_p}{\tau} \quad (7)$$

Como el valor máximo de la velocidad del pistón está limitado por el choque de flujos de aire, se puede dejar la relación únicamente en términos de la potencia y el área total de pistones.

Con la base de datos disponible en la revista *Off Highway Engineering* [4], se examinó la relación entre la potencia máxima dividida por la velocidad media del pistón, $N_{em\acute{a}x}/v_{pm}$, y el área total de pistones:

$$\frac{N_{em\acute{a}x}}{v_{pm}} = \frac{P_{eN}}{\tau} F_p \quad (8)$$

De acuerdo a la ecuación (8) la relación debería dar una gráfica lineal con una pendiente igual a la presión media efectiva alcanzada a la potencia máxima p_{eN} .

3. DIÁMETRO, POTENCIA ESPECÍFICA Y RELACIÓN DE COMPRESIÓN

Resulta útil llevar a cabo la correlación de variables geométricas y de régimen con el fin de establecer las tendencias de desarrollo de los motores. Ya en el estado de diseño de los motores modernos debe partirse de las tendencias competitivas de los mismos, y también, considerar las políticas de la sociedad en el campo de materias primas, la conservación del medio ambiente, etc.

En la tarea técnica de diseño de un motor suelen venir especificadas las exigencias mínimas o parámetros mínimos iniciales de diseño y entre ellos los funcionales importantes son: la potencia efectiva y las revoluciones a las que se quiere alcanzar esta potencia, el momento tursor efectivo máximo y las revoluciones a las que este debe alcanzarse, el número de cilindros y el mínimo consumo específico de combustible.

Se suelen observar tres etapas en el diseño de concepto del motor:

1. La determinación de las revoluciones de potencia máxima deben venir especificadas en la tarea técnica. A partir de estas revoluciones y basándose en las tendencias se selecciona de manera previa el diámetro de los cilindros.
2. Con el diámetro previo es posible considerar las tendencias de la potencia específica. La cilindrada total puede ser entonces estimada a partir de la potencia específica y la potencia total requerida.
3. Dividiendo la cilindrada total por el número de cilindros se puede obtener el volumen de trabajo de cada cilindro. Teniendo en cuenta la tendencia de la relación S/D se selecciona la carrera.

Si bien la relación de compresión puede seleccionarse a partir de las tendencias constructivas de los motores y de desarrollo de los combustibles, suele acudir a la tendencia potencia contra relación de compresión, para seleccionar el valor de esta, correspondiente al motor en la etapa de diseño.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS

La figura 1 ilustra el comportamiento del momento tursor máximo con el incremento de la cilindrada. Debido a que el factor de correlación para la regresión lineal tiene un valor $r=0,90$, obtenido a partir del coeficiente de determinación $r^2=0,808$, valor que indica fuerte relación lineal entre las variables $M_{em\acute{a}x}$ y $V_h \cdot i$, se reafirma lo establecido por la ecuación (4). Con la pendiente $p_{em\acute{a}x}/(\pi \cdot \tau)$ en la mencionada ecuación, y de acuerdo a la regresión de la figura 1, se establece que la presión media efectiva máxima (a $M_{em\acute{a}x}$) de los motores Diesel modernos tiene un valor promedio $p_{em\acute{a}x}=2,23MPa$.

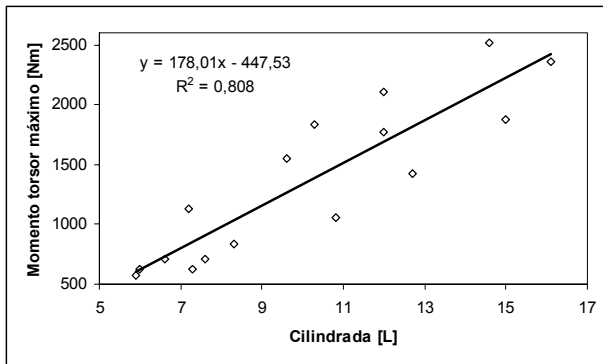


Figura 1. Comportamiento del momento torsor máximo en función de la cilindrada.

La figura 2 presenta el comportamiento de la potencia máxima con el aumento de la cilindrada. El factor de correlación para la regresión lineal $r=0,86$ evidencia una correlación fuerte entre las dos variables, y su menor magnitud respecto al factor de correlación obtenido para M_e vs. $V_{h,i}$ puede explicarse por la influencia variable de las revoluciones sobre el rendimiento volumétrico. **La pendiente de la recta, factor de escala, corresponde al factor de trucaje $p_{eN} \cdot n_N$ y constituye para los motores Diesel modernos de cuatro tiempos 2680 MPa/min.** Este factor habla de la disponibilidad de potencia de un motor de una cilindrada dada, que bien, según las características de aplicación, puede realizarse para realizar un momento torsor o para garantizar un régimen de revoluciones demandado. La presión media efectiva es una medida de la capacidad de trabajo del motor y, según el factor de trucaje, si ella se aumenta, el régimen debe disminuir.

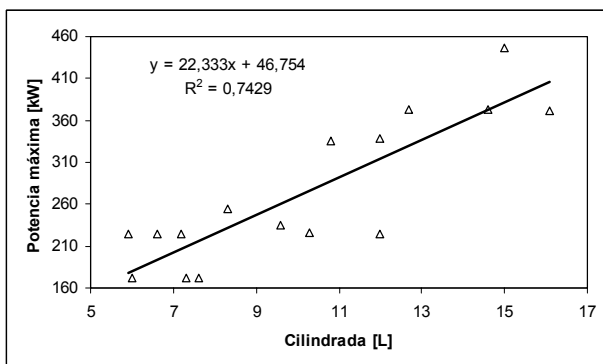


Figura 2. Comportamiento de la potencia máxima en función de la cilindrada.

La figura 3 indica el comportamiento conjunto entre las variables potencia sobre velocidad media y área total de pistones. El coeficiente de correlación $r=0,77$, indica que el grado de relación lineal, esperado por la expresión (8), es moderado. La pendiente de la ecuación (8) es claramente un indicativo de la presión media efectiva a potencia máxima cuyo valor calculado es $p_{eN}=1,78\text{MPa}$.

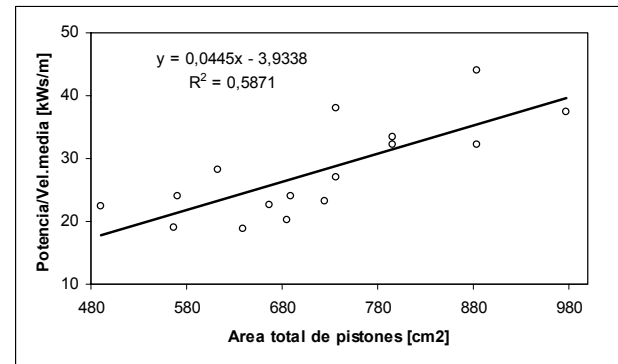


Figura 3. Comportamiento de la potencia sobre velocidad media en función del área total de pistones.

En las figuras 4, 5 y 6 se presentan las tendencias diámetro vs. revoluciones, potencia específica vs. diámetro, y potencia máxima vs. relación de compresión, respectivamente.

La figura 4 presenta la tendencia del calibre o diámetro del pistón en relación a la velocidad del motor a potencia máxima. El coeficiente de correlación $r=0,77$, permite inferir una correlación lineal moderada entre las variables diámetro y revoluciones. Se observa una tendencia marcada en la construcción de motores de cilindros de menor diámetro para mayores regímenes de velocidad.

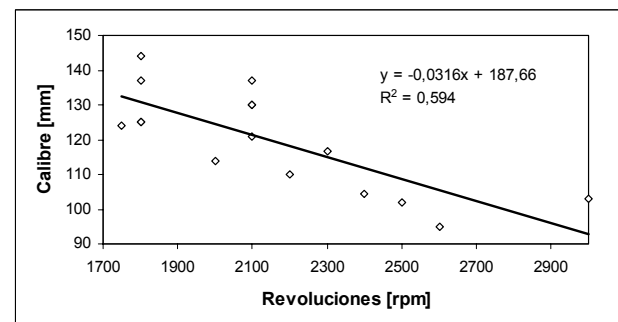


Figura 4. Tendencia del diámetro de los motores Diesel en función de las revoluciones a potencia máxima.

Durante la mayor parte del rango de operación, los motores Diesel trabajan con mezclas pobres, es decir, con excesos de aire, los cuales se han venido reduciendo. Así, la utilización de la cilindrada requerida para una potencia dada en un motor Diesel se ha ido acercando a la cilindrada requerida por un motor a gasolina de similar potencia.

La optimización del proceso de combustión, la inyección electrónica de alta presión, la sobrealimentación, el control de la ley de inyección, la inyección piloto, los filtros para material particulado, los catalizadores de oxidación, los catalizadores para óxidos de nitrógeno y los mejoramientos de las especificaciones de los combustibles (como la oxigenación del combustible y la reducción de los porcentajes de azufre y aromáticos) han

sido las tecnologías que en la última década han permitido el mejoramiento del desempeño global de los motores Diesel y, en particular, de la utilización de la cilindrada.

La figura 5 presenta el comportamiento de la potencia específica o potencia por litro en función del diámetro, evidenciándose una mejor utilización de la cilindrada para motores de diámetros pequeños. Se puede afirmar que diámetros menores permiten un desempeño de la combustión más cercano al homogéneo justificado en el menor tamaño de la cámara de combustión, la reducción de la distancia recorrida por la llama y del tiempo de quemado, y la disminución del área de transferencia de calor. En relación con la potencia específica en los motores a gasolina con valores cercanos a 49 kW/l [1], la de los motores Diesel se ha ido acercando, pero continúa siendo menor.

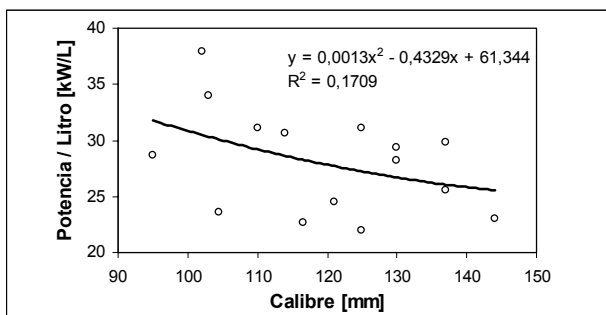


Figura 5. Tendencia de la potencia específica o potencia/litro en función del diámetro de los motores Diesel.

La gráfica 6 presenta el comportamiento entre la potencia máxima y la relación de compresión. Debe interpretarse como un indicativo de las tendencias de relaciones de compresión utilizadas en los rangos dados de potencia máxima. Se observa que para potencias mayores la tendencia es el empleo de relaciones de compresión bajas. Si bien el incremento en la potencia máxima de los motores puede lograrse por la vía del aumento en la relación de compresión, en los motores modernos esta posibilidad es minimizada al recurrir a las ventajas de la implementación de sistemas controlados de sobrealimentación, inyección y combustión.

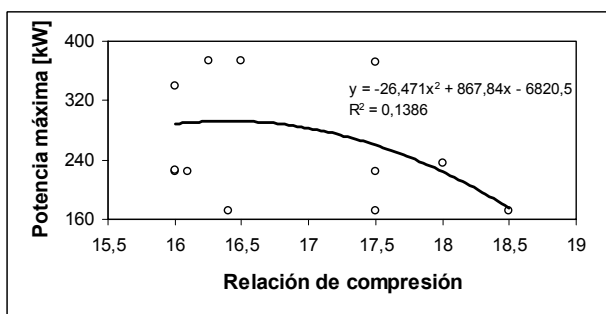


Figura 6. Tendencia de la potencia máxima en función de la relación de compresión.

5. CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de las leyes de escalado demuestran una excelente correlación entre el momento torsor máximo y la potencia máxima con la cilindrada, reafirmando el modelo teórico. Las relaciones obtenidas pueden utilizarse para predecir los parámetros de desempeño de un motor moderno, una vez conocida su cilindrada a partir de las expresiones:

$$M_{em\acute{a}x} = 178,01 \cdot V_h \cdot i - 447,53 \quad \text{y} \quad N_{em\acute{a}x} = 22,333 \cdot V_h \cdot i + 46,754$$

Para los motores Diesel modernos de cuatro tiempos el factor de trucaje $p_{eN} \cdot n_N$ constituye 2680 Mpa/min.

La presión media efectiva de los motores Diesel modernos de cuatro tiempos, a momento torsor máximo, tiene un valor de 2,23 Mpa.

La presión media efectiva de los motores Diesel modernos de cuatro tiempos, a potencia máxima, tiene un valor de 1,78 Mpa, relacionado con el factor de escala de la expresión $N_{em\acute{a}x} / v_{pN} = 0,0445 \cdot F_p - 3,9338$, cuyo coeficiente de correlación lineal es moderado.

A partir de las especificaciones de los motores Diesel para vehículos de carga, se han podido reconstruir las gráficas de tendencia diámetro vs. Revoluciones, potencia específica vs. diámetro, y relación de compresión vs. potencia máxima; muy útiles en las etapas iniciales del diseño conceptual.

La EPA en el 2001 aprobó un límite de NO_x de 0,02 g/HP-h y de material particulado de 0,01 g/HP-h, límites que se esperan alcanzar en pleno para todos los vehículos para el año 2007. Para los motores analizados el consumo específico de combustible está en 204,5 g/kWh.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] DALE, M. Ch; HEYWOOD, J. B. Performance Scaling of Spark-Ignition Engines: Correlation and Historical Analysis of Production Engine Data. SAE paper 2000-01-0565. SAE. Warrendale, 2000.

[2] LÓPEZ, J. M., BURÓN, J. M., GÓMEZ, F. y ROMERO, H. J. Una comparativa histórica sobre el diseño de motores de encendido provocado. Automotive Engineering International en español. Abril/Junio 2004. Páginas 35-38.

[3] ROMERO P., Carlos Alberto. Fundamentos de construcción de motores de combustión interna. Universidad Tecnológica de Pereira. 2003.

[4] MAHLE. 2003 Heavy-Duty Diesel Engines: North American Availability & Specifications. SAE Off Highway Engineering. 2003.