

# Características del proceso de combustión en motores de encendido por compresión

## Combustion process characteristics in compression ignition engines

J. O. Araque M., S. Fygueroa S. y M. Martín V.  
GRUMOTE. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. ULA.  
Mérida 5101, Venezuela  
jaraque@ula.ve

### Resumen

*En el presente trabajo se desarrolla un programa de computación que predice la variación de presión en el interior del cilindro de motores de encendido por compresión lentos. Debido a lo complicado de los procesos reales que ocurren en el interior del cilindro en el presente análisis se emplean varias suposiciones teóricas: presión uniforme en la cámara de combustión, propiedades termodinámicas del fluido dependientes de la temperatura, comportamiento de gas ideal, transferencia de calor por convección y radiación usando el modelo propuesto por Annand, proceso de combustión completa y mezclado homogéneo. Debido a la importancia que tiene la característica de inyección en el desarrollo del proceso de combustión en estos motores con respecto a su máximo aprovechamiento de energía se estudiará el cambio en el diagrama  $p-V$  desde el comienzo de la inyección hasta el momento en que la válvula de escape comienza a abrirse. En este intervalo se puede observar si el aumento de presión encontrado en función del ángulo de giro del eje,  $dp/d\phi$ , sigue la tendencia normal esperada de acuerdo a la cantidad de combustible inyectado. Finalmente, se realiza un estudio paramétrico tomando como las principales variables que rigen el desarrollo del proceso de combustión el grado de agitación y la velocidad de preparación de la mezcla.*

**Palabras claves:** Motor de encendido por compresión, propiedades termodinámicas, razón de inyección de combustible, proceso de combustión, presión en el cilindro, transferencia de calor, grado de agitación, intensidad de mezclado, velocidad de preparación, velocidad de quemado, liberación de energía.

### Abstract

*A computer program is developed to predict the internal cylinder pressure on slow compression ignition engines. Several assumptions are considered due to the complexity of in cylinder process: combustion chamber with uniform pressure, fluid thermal properties dependence, ideal gas behavior, convection and radiation heat transfer using the Annand's model, complete combustion and homogeneous mixed. The  $p-V$  diagram development will be studied from the injection start to the exhaust valve opening time taking into account an injection profile mode. During this period will be observed the relationship between the pressure increasing each crank angle degree,  $dp/d\phi$ , as a function of rate of fuel injected. Finally, a parametric analysis working with the turbulence intensity and mixture speed preparation as main variables was done.*

**Key words:** Compression ignition engine, thermal properties, fuel injection rate, combustion process, cylinder pressure, heat transfer, turbulence degree, mixture intensity, preparation velocity, burned velocity, energy released.

### 1 Introducción

En el presente trabajo el aspecto más importante a

considerar fue el determinar si el crecimiento de la presión en el interior del cilindro del MCIA mantenía una relación acorde con la razón de suministro de combustible. Se

consideró que la cantidad de aire requerida para la combustión ya estaba ocupando el volumen de la cámara del motor. En vista de que las condiciones reales dentro de la cámara de combustión son difíciles de simular con exactitud se estudiaron los diagramas de liberación de calor y masa quemada con la finalidad de entender mejor el desarrollo del proceso de combustión. Los siguientes aspectos son señalados (Heywood, 1988) como los que determinan el adecuado crecimiento de la presión durante la combustión: razón de inyección del combustible, penetración del chorro, tamaño de gota, razón de evaporación, intercambio de calor, relación de mezclado, reacciones químicas y efectos de dilución.

Debido a la complejidad del problema real la información obtenida del diagrama p-V es la clave que contiene toda la información relacionada con el proceso de combustión. De esta manera se busca obtener información sobre dicho proceso que permita realizar análisis simplificando las dificultades asociadas con las mediciones experimentales. El proceso de combustión se estudiará empleando las ecuaciones básicas de la termodinámica.

Ensayos experimentales en MEC demuestran la existencia de condiciones de transferencia de calor que involucran convección y radiación en el interior del cilindro y por lo tanto se empleará el modelo de Annand y su aplicación se basará en el empleo de correlaciones empíricas obtenidas en experimentos con varios motores bajo considerando transferencia de calor promedio e igual hacia todas las paredes (Borman, 1987). El fluido de trabajo es tratado como una mezcla homogénea de aire y productos de combustión en equilibrio químico. El cálculo de las propiedades termodinámicas de las especies se hará empleando la rutina de Olikara y Borman (1975), que toma en cuenta la dependencia de las propiedades respecto a la presión, temperatura y relación combustible aire de la mezcla.

Debido a la no-homogeneidad de la combustión diesel una serie de trabajos han sido enfocados hacia la búsqueda de una tendencia característica de los sistemas de inyección (Krieger y Borman, 1967). Los diagramas típicos de liberación de calor en motores diesel muestran la relación entre la calidad del proceso de combustión y la cantidad de combustible listo para autoencenderse en las cercanías del PMS. Un rápido crecimiento de la velocidad de quemado se observa unos instantes después del período de retardo de inflamación, seguido de una caída de la misma. Durante este período las características de la combustión son mayormente controladas por un premezclado. Durante la carrera de expansión una larga cola en el diagrama demuestra la presencia de un proceso de combustión prolongado (Krieger, 1966), donde prevalecen las características propias de la combustión difusiva.

En este diagrama tanto la duración del proceso de liberación de calor como la máxima cantidad de calor que se libera dependen de: la temperatura del gas, la presión parcial del oxígeno, la intensidad del proceso de mezclado

y las características propias del sistema de inyección de combustible. En 1971 Whitehouse propone un modelo matemático que toma en consideración las relaciones de preparación de la mezcla y quemado del combustible para calcular la velocidad del proceso de combustión en MEC DI.

Debido al gran número de variables involucradas durante la combustión es necesario la fusión de datos experimentales y teóricos con la finalidad de entender la realidad física del fenómeno de combustión que se trata de visualizar con los procesos de simulación. Por otro lado, es importante considerar que el desarrollo de estos experimentos requieren de instrumentación costosa y delicada que debe trabajar la mayor parte del tiempo en ambientes cuyas condiciones de presión y temperatura son críticas.

Es importante tener presente que aunque los métodos de simulación permiten solventar teóricamente los problemas relacionados con la inestabilidad de las variables inherentes al proceso en estudio, esto puede subestimar el efecto real que dichas variables tienen sobre dicho proceso.

## 2 Análisis teórico

Se elaboró un programa de computación para obtener teóricamente los diagramas de variación de presión y temperatura en el interior del cilindro basado en el método de preparación de mezcla señalado en el trabajo de Whitehouse (1971). El modelo considera el área superficial de la gota como el parámetro que más influye en el proceso de combinación entre el combustible y el aire así como en su preparación final. Si la densidad del combustible es constante y el área es proporcional a la masa elevada a los dos tercios (2/3), el área superficial de las gotas estará determinada según la Ec. (1).

$$A \propto nm^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

donde:

m: es la masa de la gota

n: el número de gotas

La masa se relaciona con la masa de combustible disponible para su preparación,  $Mu$ , mediante la Ec. (2).

$$m = \frac{Mu}{n} \quad (2)$$

La cantidad de combustible inyectado,  $Mi$ , se relaciona con el número de gotas y su diámetro inicial,  $Do$ , de acuerdo a la Ec. (3).

$$Mi \propto nD_0^3 \quad (3)$$

Por lo que la superficie total de las gotas resulta proporcional al producto de la masas de combustible inyectado y disponible para su preparación, como se expresa a continuación:

$$A \propto n \left( \frac{Mu}{n} \right)^{\frac{2}{3}} \propto n^{\frac{1}{3}} Mu^{\frac{2}{3}} \propto Mi^{\frac{1}{3}} Mu^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

Por otro lado para el proceso de combustión es necesario considerar la presencia del oxígeno en el aire. Whitehouse (1971) propone una expresión para la razón de preparación de la mezcla,  $P$ , que es proporcional a la disponibilidad de oxígeno,  $P_{O_2}$ , y mediante el empleo de constantes empíricas se toma en cuenta la no-uniformidad en referencia al tamaño de las gotas. Las constantes dependen del tipo de cámara del motor (Benson y Whitehouse, 1980) y consideran el efecto de turbulencia debido a la reducción geométrica de volumen durante el funcionamiento de MEC rápidos y lentos. El modelo de preparación en cuestión se presenta en la Ec. (5).

$$P = K M_i^{(1-x)} M_u^x P_{O_2}^m \quad (5)$$

donde,  $x$ ,  $m$  y  $K$  son constantes empíricas para varios motores.

Para el cálculo de la velocidad de la reacción química se usa una expresión de Arrhenius (Benson y Whitehouse, 1980) la cual permite evaluar el periodo de retraso a la inflamación. Esta es proporcional a la velocidad del gas, la densidad del oxígeno, la masa de combustible sin quemar y la energía de activación,  $E_a$ , según se muestra en la Ec. (6). En esta expresión el término  $\int (P-R) d\alpha$  es la diferencia entre la razón de preparación,  $P$ , y la velocidad de quemado,  $R$ , la cual permite determinar que cantidad de combustible se quema en función del ángulo de giro del eje del motor. Cuando  $\int P d\alpha$  es mayor que  $\int R d\alpha$  significa que se tiene suficiente masa de combustible para mantener la reacción química, en caso contrario el proceso de combustión es mayormente controlado por la velocidad de preparación.

$$RR = \frac{K P_{O_2}}{N\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_a}{R_u T}\right) \int (P-R) d\alpha \quad (6)$$

Finalmente, para el cálculo del cambio de temperatura en el interior del cilindro se requiere de la aplicación de la Primera Ley de La Termodinámica, con la cual se determina el cambio de temperatura del gas en el interior del cilindro con respecto al tiempo,  $dT/dt$ .

$$\frac{dm_u}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \sum h_i \dot{m}_i \quad (7)$$

La Ec. (7) debe ser transformada para considerar las especies participantes y la dependencia que tienen sus propiedades termodinámicas con respecto a  $T$ ,  $p$  y  $\phi$ . Su solución aparece en trabajos de investigación (Foster, 1985; Heywood, 1988), la expresión final que muestra el cambio de temperatura en el cilindro,  $dT/dt$ , en función de las variables  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  y  $E$  (Ecs. 8 a 12) se presenta en la Ec. (13). Durante el proceso de combustión se considero la formación de varios productos en función de la riqueza de la mezcla y para el cálculo de las propiedades termodinámicas se empleó la rutina de Olikara y Borman (1975) que considera la presencia de 12 especies en equilibrio químico:  $H$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $H_2$ ,  $OH$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  y  $Ar$ .

$$A = D - RT \quad (8)$$

$$B = u + D \quad (9)$$

$$C = \left(\frac{\partial u}{\partial \phi}\right) + \left(\frac{D}{R}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial \phi}\right) \quad (10)$$

$$D = p \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right) \left[1 - \left(\frac{p}{R}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial p}\right)\right]^{-1} \quad (11)$$

$$E = 1 + \left(\frac{T}{R}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right) \quad (12)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{A\dot{V}/V - B\dot{m}/m - C\dot{F} + (Q + h_i \dot{m}_i / m)}{\partial u / \partial T + DE/T} \quad (13)$$

### 3 Patrones para el estudio paramétrico

El análisis esta basado en información tomada del trabajo presentado por Whitehouse (1971), en el cual se utilizan datos empíricos sobre coeficientes experimentales que toman en cuenta la disponibilidad de oxígeno,  $m$ , la cantidad de masa de combustible preparada,  $x$ , y el grado de agitación,  $K$ , correspondientes a varios motores Diesel.

En el trabajo el autor atribuye que las diferencias entre los valores de los diferentes coeficientes son debidas a la variación en el movimiento del aire, efectos de torbellino y giro, presentes en las diversas cámaras de combustión. Las constantes químicas de las reacciones así como los valores de energía de activación usados en la expresión de Arrhenius fueron tomados de Kenneth, (1986).

El programa de computación se utilizó para simular varias condiciones características dentro de la cámara de combustión del MCIA que permitieran analizar el efecto que tienen los cambios en: el tiempo de inyección, la relación combustible aire, la intensidad del movimiento del aire y la velocidad de preparación; sobre el desarrollo y comportamiento de las curvas de: presión, temperatura, combustible inyectado y velocidad de preparación del combustible en el interior del cilindro del motor.

### 4 Resultados teóricos

Las Figs. 1 y 2 muestran el perfil del calor liberado de acuerdo a la cantidad de combustible inyectado, antes del punto muerto superior, su crecimiento es muy lento, pero repentinamente la cantidad de calor liberado aumenta superando el perfil de la velocidad de preparación. Alcanza su máximo valor cerca del PMS y luego decae para alcanzar el perfil de preparación. Como consecuencia la figura 3 muestra que los máximos valores de  $p$  y  $T$  se consiguen en la cercanía del PMS, con un ligero desplazamiento de  $T_{m\acute{a}x}$ , respecto al valor de presión máxima,  $P_{m\acute{a}x}$ .

Los máximos crecimientos de presión y temperatura,  $dp/d\phi$  y  $dT/d\phi$  se alcanzan entre el instante de encendido y pocos grados después del PMS, demostrándose la estrecha relación que existe entre la acumulación de combustible

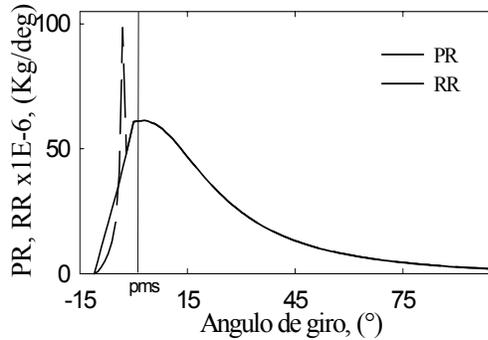


Fig. 1. Velocidades de preparación y de quemado del combustible inyectado.

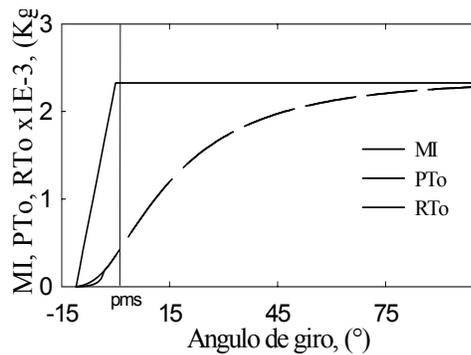


Fig. 2. Proporción entre las masas de combustible inyectado total, preparado para autoencenderse y quemado.

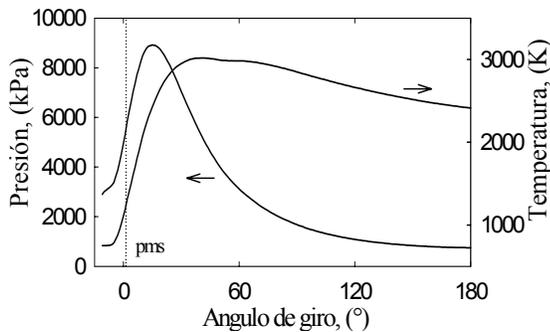


Fig.3 Variación de p y T en el cilindro.

antes del encendido, su razón de preparación y el desarrollo del proceso de combustión.

En las Figs. 4, 5 y 6 se observa la fuerte relación que existe entre la cantidad de combustible que esta listo para quemarse y el crecimiento acelerado de la presión y temperatura, se nota un desarrollo muy rápido de la combustión en la medida que la mezcla de trabajo en el interior del cilindro alcanza una riqueza próxima al valor estequiométrico. En la figura 6 se puede ver como los máximos valores de p y T se desplazan hacia el PMS en la medida que  $\phi$  aumenta, observándose con esto un aumento en la razón  $dp/d\phi$ , lo cual indica una mejora en la velocidad del proceso de combustión.

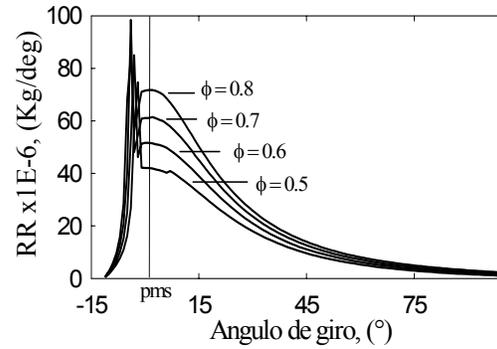


Fig. 4. Velocidad de preparación vs.  $\phi$ .

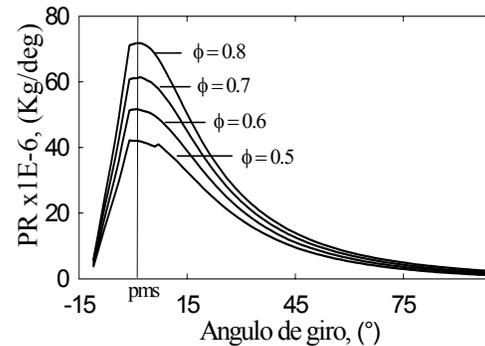


Fig. 5. Velocidad de quemado en función de  $\phi$ .

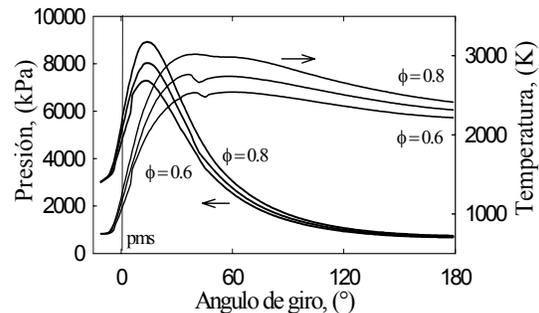


Fig. 6. Variación de p y T en función de  $\phi$ .

En las Figs. 7, 8 y 9 se observa la clara tendencia entre el aumento en la intensidad de movimiento del aire y la reducción en el tiempo requerido para preparar la mezcla combustible aire, lo cual produce un mejor desarrollo de la presión y temperatura dentro del cilindro debido a la mayor disponibilidad de combustible en la cámara de combustión. A mayor índice de intensidad mayor preparación de la mezcla y mayor velocidad en el proceso de combustión. Igualmente se observa la disminución en el aprovechamiento de energía para valores de K bajos debido al aumento en la temperatura de los gases de escape.

## 5. Conclusiones

- Un adecuado proceso de mezclado con una alta velocidad de preparación asegura el desarrollo de ciclos de producción de potencia con alta eficiencia, máximos

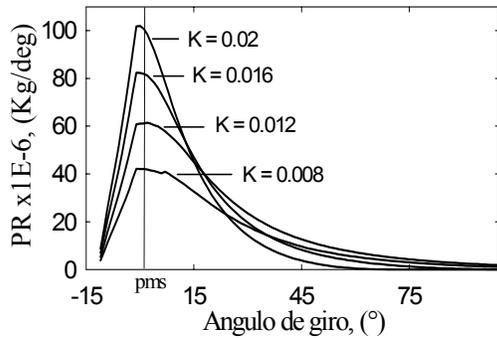


Fig. 7. Velocidad de preparación vs. K.

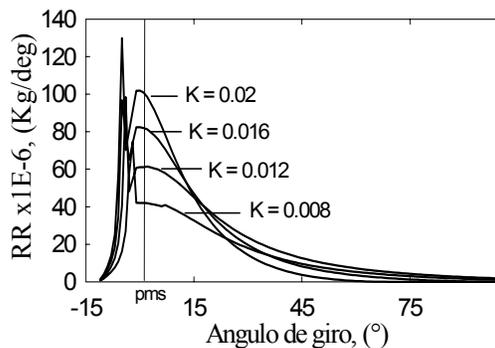


Fig. 8. Velocidad de quemado vs. K.

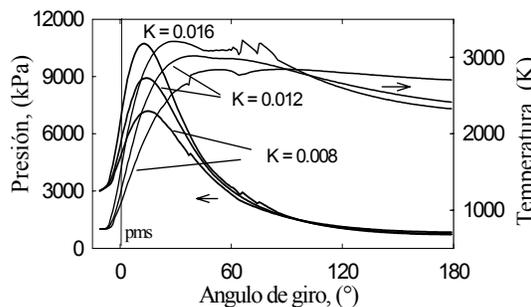


Fig. 9. Variación de p y T en función de K.

valores de presión y temperatura en el cilindro y bajas temperaturas en los gases de escape.

- A mayor cantidad de combustible inyectado mejor será el crecimiento de presión y temperatura en la cámara de

combustión, aunque el empleo de cámaras de combustión con elevados coeficientes de mezclado es deseable.

- El proceso de combustión en motores diesel depende de varios factores entre los cuales los más importantes son: la razón de inyección, la penetración del chorro, el tamaño de las gotas, la razón de evaporación, la relación de calor liberado, la relación de mezclado combustible aire, las reacciones químicas y los efectos de dilución.
- La eficiencia del proceso de combustión en MEC depende altamente de la facilidad con que el combustible inyectado encuentre y se mezcle adecuadamente con el oxígeno.

## Referencias

- Benson RS and Whitehouse ND, (1980), Internal combustion engines, Pergamon Press, Vol. 1 and 2.
- Borman GL, (1987), Internal combustion engine heat transfer, Pergamon Journals Ltd, Prog. Energy Combustion, Vol. 13.
- Foster DE, (1985), An overview of zero-dimensional thermodynamic models for IC engine data analysis, SAE Paper 852070,
- Heywood JB, (1988), Internal combustion engines fundamentals, Mc Graw Hill.
- JANAF, (1971), Thermochemical tables, Second Edition, The Dow Chemical Co, Midland, Michigan.
- Kenneth KK, (1986), Principles of combustion, John Wiley & Son.
- Krieger RB, (1966) Applications of engine combustion models. An introduction overview, General Motors Research Laboratory, Michigan.
- Krieger RB and Borman GL, (1967), The computational apparent heat release for internal combustion engines, ASME 66-WA/DGP-4.
- Olikara C and Borman GL, (1975), A computer program for calculating properties of equilibrium combustion products with some applications to I. C. engines, Automotive Engineering Congress and Exposition, Detroit, Michigan, Pub. 750468.
- Whitehouse N D and Way RJ, (1971), A simple method for the calculation of heat release rate in diesel engines based on the fuel injection rate, SAE Paper 710134.