

Análisis de los ciclos teóricos en motores de encendido por chispa

Theoretical cycle analysis of spark ignition engines

Martín V. María J.*, Fygueroa S. Simón J. y Araque M. Jesús O.
GRUMOTE. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes.
Av. Tulio Febres Cordero
Mérida -Venezuela.
[*mmartin@ing.ula.ve](mailto:mmartin@ing.ula.ve)

Resumen

En este trabajo se presenta un algoritmo que permite el cálculo del ciclo teórico de motores de encendido por chispa que utilizan como fluido de trabajo mezclas aire-hidrocarburo. En el análisis se toman en cuenta los cambios de composición y la variación de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo con la temperatura considerando las características de equilibrio químico y la disociación. Los resultados de la aplicación del algoritmo permiten la presentación gráfica de los diferentes procesos en un diagrama de presión-volumen y la realización de estudios paramétricos.

Palabras claves: Motor de encendido por chispa, mezclas aire-hidrocarburo, propiedades termodinámicas, equilibrio químico, disociación, diagrama presión-volumen.

Abstract

A computer program working with air-hydrocarbon mixtures is used to compute the theoretical cycles of spark ignition engines. On this study the mixture composition and the thermodynamic properties variation with temperature is taking in account considering the species chemical equilibrium and dissociation effects. The results allow to show the cycle processes on a pressure-Volume diagram and to perform parametric studies.

Key words: Spark ignition engine, air-hydrocarbon mixtures, thermodynamic properties, chemical equilibrium, dissociation, pressure-Volume diagram.

1 Introducción

Los motores de encendido por chispa transforman la energía química en mecánica según el ciclo de Otto, (Heywood, 1988). En la Fig. 1 se muestran en el plano presión volumen los cuatro procesos básicos que conforman el ciclo; en el proceso de 1 a 2 la mezcla aire-combustible se comprime adiabáticamente; en el punto 2 reacciona y se produce el proceso de combustión con suministro de calor a volumen constante de 2 a 3; proceso que además se supone sin pérdidas; el proceso de 3 a 4 corresponde a la expansión adiabática reversible de los productos de la combustión y el proceso de 4 a 1 es la cesión de calor al ambiente a volumen constante. La composición del fluido de trabajo sólo es constante durante el proceso de 1 a 2. Para poder cerrar

el ciclo se hace la suposición de que el proceso de 4 a 1 es simplemente un rechazo de calor a volumen constante.

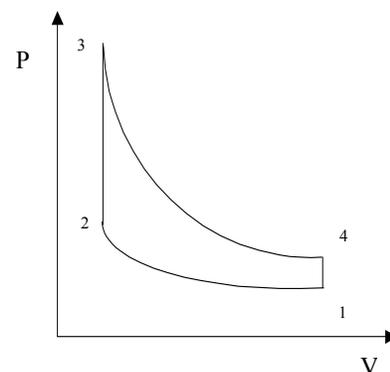


Fig. 1 Diagrama p-v del ciclo.

El fluido de trabajo del ciclo antes de la combustión es una mezcla de aire con un hidrocarburo, que se puede representar genéricamente con la fórmula química C_mH_n . Después de la combustión se convierte en una mezcla de gases, de los cuales se consideran en este análisis el dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Como la combustión es un proceso muy complejo, en este trabajo sólo se estudian las reacciones químicas finales de las fracciones másicas de los componentes del combustible. Cuando la combustión es completa en la reacción se producen dióxido de carbono y vapor de agua; cuando no lo es, además aparecen monóxido de carbono, hidrógeno y aire. El modelo no sólo analiza las mezclas estequiométricas, sino que considera varias riquezas. Para caracterizar mezclas de composición diferente se usa la relación combustible-aire relativa de la mezcla. El poder calorífico inferior del combustible se determina según el método propuesto por Arkhangel'sky y colaboradores (1971). El cálculo del ciclo permite determinar las propiedades termodinámicas durante y después de los procesos de compresión, combustión y expansión, teniendo en cuenta la variación del calor específico del fluido de trabajo con la temperatura (Benson et al, 1975), la variación de su composición durante la combustión y la expansión, así como la disociación y variación del número de moles en dichos procesos.

2 Cálculo del ciclo

2.1 Proceso de Compresión

Para el cálculo del proceso de compresión, proceso 1-2 de la Fig. 2, se divide el volumen desplazado en un cierto número de volúmenes elementales a los que se aplica la Primera Ley de la Termodinámica y la ecuación de estado para determinar sus condiciones finales; las ecuaciones se resuelven según el método de Newton-Raphson. El procedimiento seguido se muestra en la Fig. 3 que corresponde al algoritmo de cálculo de la compresión.

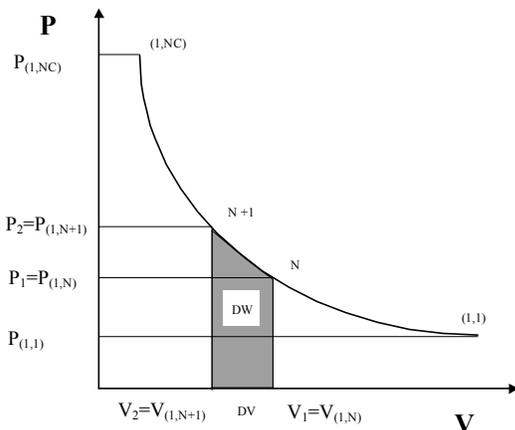


Fig. 2 Esquema de la compresión

2.2 Proceso de Combustión

El análisis de la combustión corresponde al estudio del proceso 2-3 de la figura 1, para el cual se toma como fluido de trabajo una mezcla de CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 y N_2 , cuya composición depende del grado de disociación de dicha mezcla. Para el trabajo se establece que en el equilibrio la rata de formación de H_2 y CO_2 es igual a la de formación de CO y H_2O y que la de formación de CO_2 es igual a la de formación de CO y O_2 . Las constantes de equilibrio se obtienen a partir de las funciones de Gibbs de los productos y reactantes (Benson,1977). Como la combustión de un kilomol de combustible genera los siguientes productos: $A_{(1)} CO_2$, $A_{(2)} CO$, $A_{(3)} H_2O$, $A_{(4)} H_2$, $A_{(5)} O_2$ y $A_{(6)} N_2$ y los valores de $A_{(1)}$ a $A_{(6)}$ son los kilomoles de cada substancia por kmol de combustible, se puede plantear un sistema de ecuaciones que permite determinar las cantidades presentes de cada substancia y la temperatura de la combustión por un proceso iterativo que parte del valor propuesto por Benson y sus colaboradores (1975). La temperatura final de la combustión se calcula a partir de la Primera Ley de la Termodinámica, aplicada para un proceso isocórico y adiabático, mediante el método de Newton-Raphson. En la Fig. 4 se muestra el diagrama de bloque que corresponde al algoritmo de cálculo del proceso.

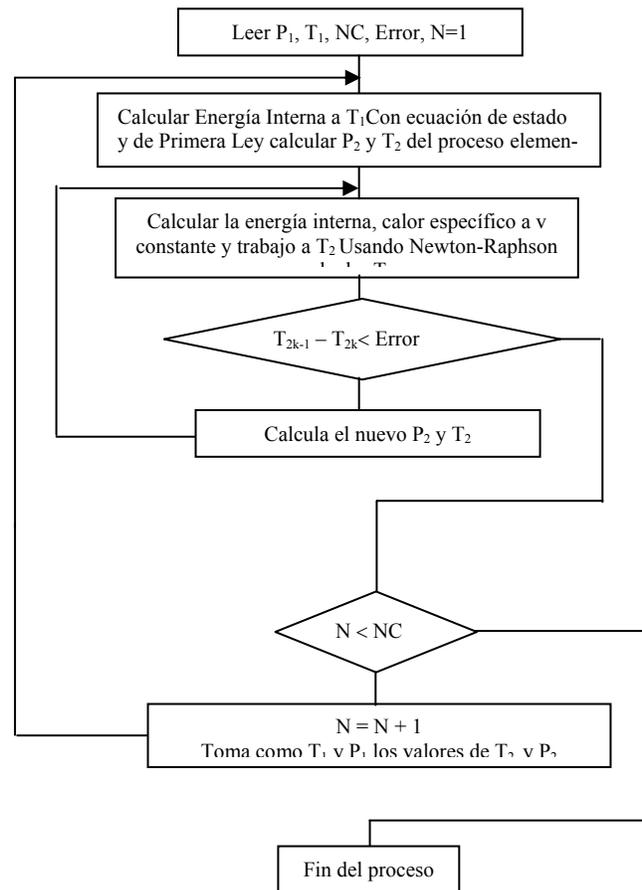


Fig. 3 Algoritmo del proceso de compresión

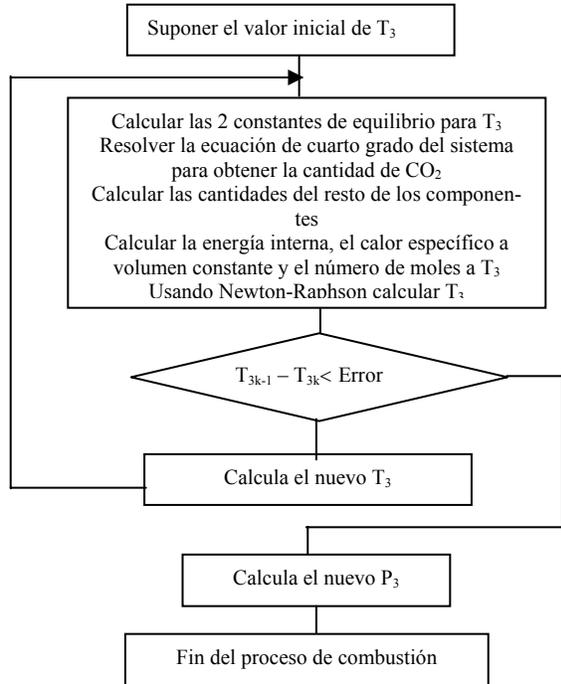


Fig. 4 Algoritmo del proceso de combustión

2.3 Proceso de Expansión

Durante parte del proceso de expansión las reacciones de combustión continúan y puesto a que los productos se hallan en equilibrio químico la composición de la mezcla varía pues cambian la presión y la temperatura. Para calcular el número de moles presente de cada componente, se sigue el mismo procedimiento que en el proceso de combustión. Para el cálculo de la temperatura se usa la Ecuación de la Primera Ley de la Termodinámica aplicada a un proceso adiabático elemental con cambio de volumen y la ecuación de estado, tomando en cuenta la composición de la mezcla. La Fig. 5 muestra el proceso de expansión elemental que permite estudiar el proceso.

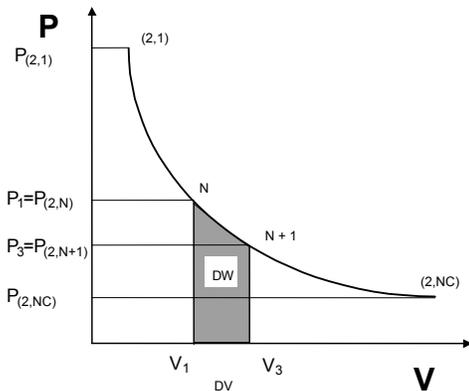


Fig. 5 Esquema de la Expansión

En la Fig. 6 se presenta el algoritmo que permite realizar los cálculos del proceso de expansión.

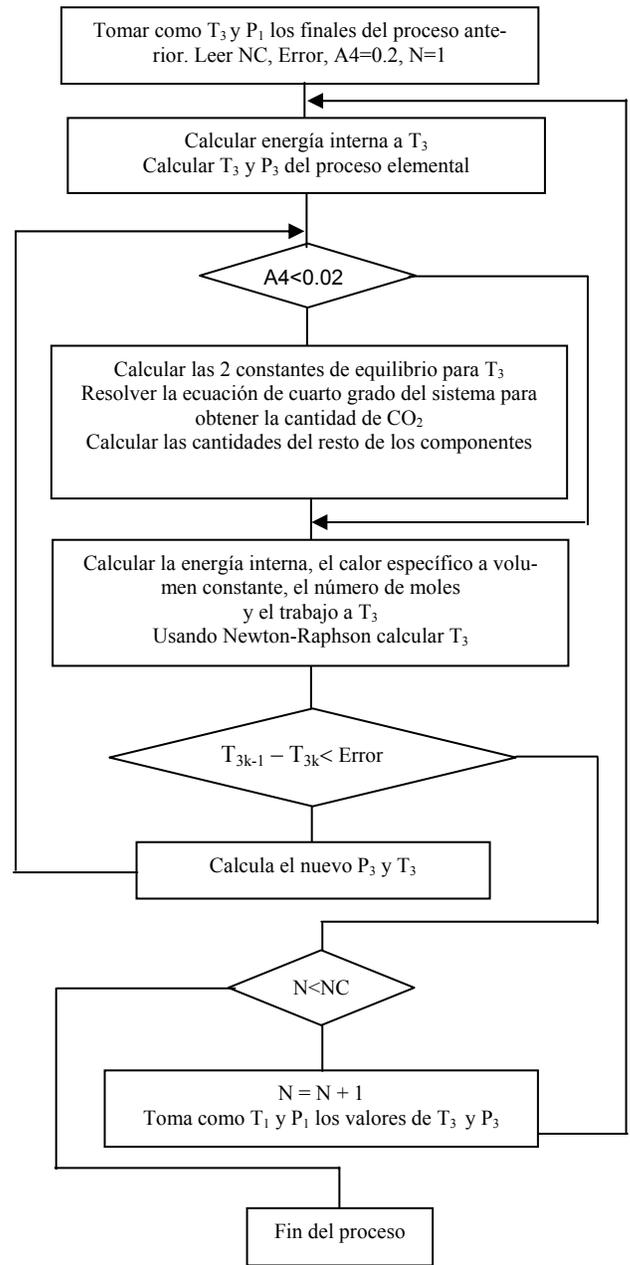


Fig. 6 Algoritmo del proceso de expansión

2.4 Cálculos finales

Luego se realizan los cálculos finales, a saber, la determinación de la presión media indicada del motor, eficiencia, potencia indicada para un régimen de giro determinado y el consumo específico de combustible para diferentes valores de la relación de compresión y de la relación combustible aire relativa.

3 Resultados

El análisis se hizo a un motor con las siguientes características; diámetro del pistón, D , 0.0824 m; carrera, c , 0.076 m; relación de compresión, r_c , variando entre 7 y 13; relación combustible aire relativa, F_r , variando entre 0.7 y 1.25, combustible C_8H_{18} , presión final de admisión, p_{in} , 101.3 kPa; Temperatura final de admisión, T_{in} , 298 K. En la Fig. 7 se muestra el diagrama p-V del ciclo para una r_c de 7 y una F_r de 1.

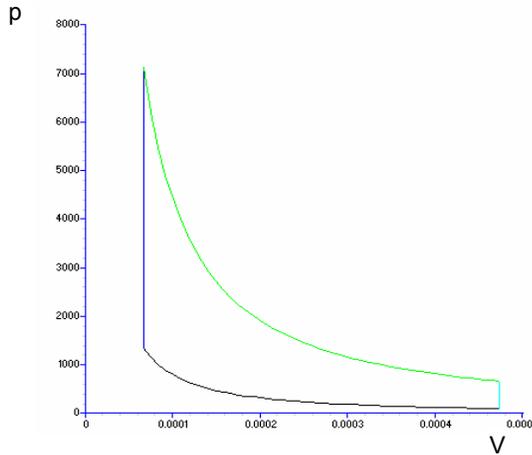


Fig. 7 Diagrama p-V del ciclo.

En las figuras 8 y 9 se presenta la variación de la composición de algunos los productos durante la expansión para una mezcla con $F_r = 1.25$ como una función de la posición del pistón, o lo que es lo mismo, del volumen para un motor con $r_c = 7$.

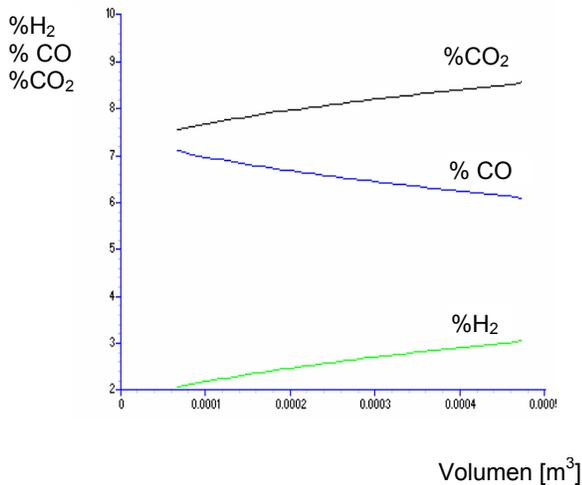


Fig. 8 Composición de los productos durante la expansión para $F_r=1.25$.

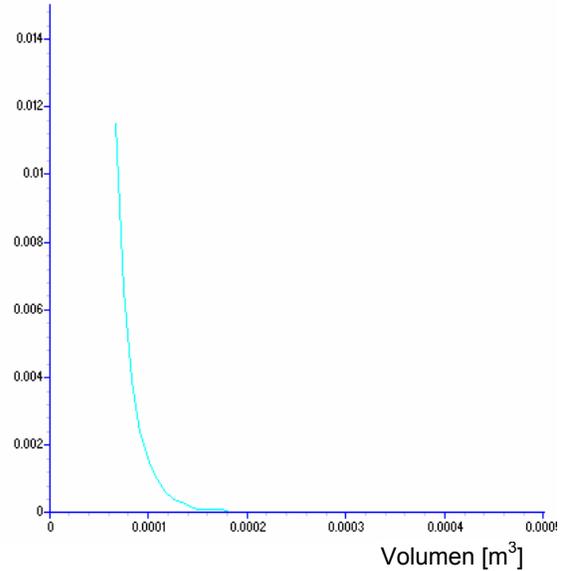


Fig. 9. Composición de los productos durante la expansión para $F_r=1.25$.

Las figuras 10 y 11 se muestran los porcentajes presentes de nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua durante la expansión, para una mezcla estequiométrica; en ellas puede observarse que los contenidos de N_2 y CO_2 aumentan al producirse el proceso, mientras que los de CO y O_2 disminuyen

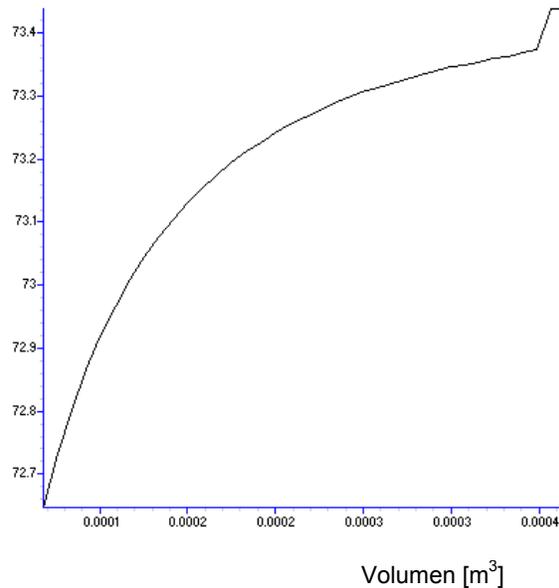


Fig. 10 Composición de los productos durante la expansión para $F_r=1$

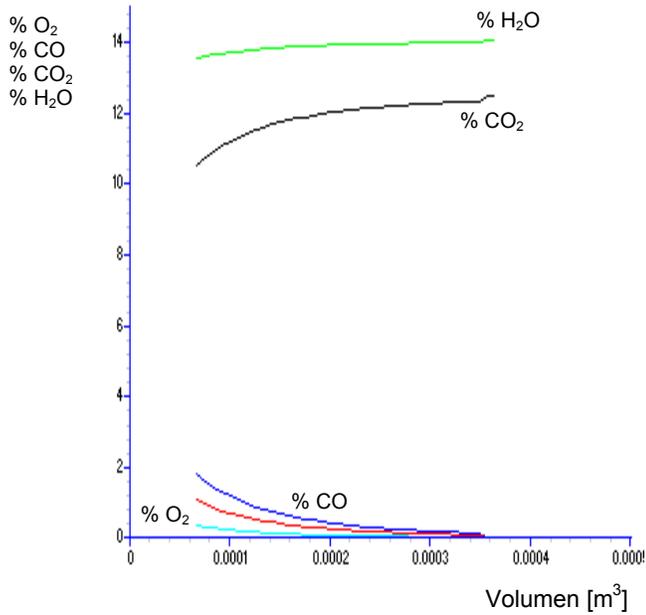


Fig. 11 Composición de los productos durante la expansión para $F_r=1$

4 Conclusiones

El cálculo del ciclo mediante un programa de computación ilustra de manera rápida su comportamiento del mismo cuando varían los parámetros termodinámicos.

El programa permite encontrar fácilmente la composición de los productos en cualquier instante de la expansión.

El programa permite efectuar estudios paramétricos si se considera la variación de la relación de compresión, la riqueza o las condiciones iniciales.

Referencias

- Arkhangelsky, V., Khovakh, M., Stephanov, Y., Rusov, V., Vihert, M. y Voinov, A., 1971, *Motor Vehicle Engines*, Mir Publishers, Moscú.
- Benson, R., 1977, *Advanced Engineering Thermodynamics*, Pergamon Press. Oxford.
- Benson, R.S., Annand, W. y Baruah, P., 1975, "A Simulation Model Including Intake and Exhaust Systems for a Single Cilinder Four Stroke Cycle Spark Ignition Engine", *International Journal of Mechanical Science*, Vol 17, No. 2, pp. 97-124.
- Heywood, J.B., 1988, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill Inc., New York..