

## Estudio del efecto del volumen, la relación aire combustible y la razón de compresión en el trabajo neto y la eficiencia térmica en un ciclo Otto

ORTEGA, Francisco\*†, SANTOYO, Abraham, RODRIGUEZ, Rafael, FIGUEROA, Fernando y GARCIA, Miguel

*Coordinación de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carr Irapuato-Silao Km 12.5, C.P. 36821, Irapuato, Guanajuato, México.*

Recibido 6 de Julio, 2015; Aceptado 3 de Septiembre, 2015

### Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un modelo matemático que permite analizar el efecto del volumen, la razón aire combustible y la razón de compresión en el trabajo neto, la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible de un motor de encendido por chispa que funciona bajo el ciclo Otto. El modelo matemático se desarrolla partiendo de la primera ley de la termodinámica y utilizando el método de calores específicos variables, considerando como fluido de trabajo aire, el cual es modelado como gas ideal. Los resultados obtenidos son graficados obteniendo como conclusión que para el caso de estudio analizado la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible no es afectado por la variación del volumen. Mientras que el trabajo neto es afectado por la razón de compresión, la relación aire combustible y el volumen.

### Otto, Eficiencia, Trabajo

### Abstract

In this paper, a mathematical model to analyze the effect of volume, the air fuel ratio and the compression ratio in the net work, thermal efficiency and specific fuel consumption of a spark ignition engine operating under the Otto cycle is developed. The mathematical model is developed based on the first law of thermodynamics and using variable specific heat method, considering air as work fluid, which is modeling as an ideal gas. The results are graphed, obtaining for the case study analyzed the thermal efficiency and specific fuel consumption is not affected by the change in volume. While the net work is affected by the compression ratio, the air-fuel ratio and volume.

### Otto, Efficiency, Work, Thermal

**Citación:** ORTEGA, Francisco, SANTOYO, Abraham, RODRIGUEZ, Rafael, FIGUEROA, Fernando y GARCIA, Miguel. Estudio del efecto del volumen, la relación aire combustible y la razón de compresión en el trabajo neto y la eficiencia térmica en un ciclo Otto. Revista de Análisis Cuantitativo y Estadístico 2015, 2-4: 278-287

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: frortega@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Nomenclatura

A continuación se presenta la nomenclatura utilizada durante el desarrollo del presente caso de estudio.

$CEC$	Consumo específico de combustible
$m$	Masa total de aire y combustible
$m_f$	Masa del combustible
$P_1$	Presión en el estado 1
$q_{2-3}$	Calor del proceso 2 a 3
$q_{4-1}$	Calor del proceso 4 a 1
$q_c$	Poder calorífico del combustible
$R_a$	Constante del aire
$r$	Relación de compresión
$r_{ac}$	Relación aire-combustible
$s_1$	Entropía específica del estado 1
$s_2$	Entropía específica del estado 2
$s_3$	Entropía específica del estado 3
$s_4$	Entropía específica del estado 4
$T_1$	Temperatura del estado 1
$T_2$	Temperatura del estado 2
$T_3$	Temperatura del estado 3
$T_4$	Temperatura del estado 4
$u_1$	Energía interna del estado 1
$u_2$	Energía interna del estado 2
$u_3$	Energía interna del estado 3
$u_4$	Energía interna del estado 4
$v_1$	Volumen específico del estado 1
$v_2$	Volumen específico del estado 2
$v_3$	Volumen específico del estado 3
$v_4$	Volumen específico del estado 4
$V_c$	Volumen en el punto muerto superior
$V_d$	Volumen entre el punto muerto superior y el punto muerto inferior
$V_{pmi}$	Volumen en el punto muerto inferior
$w_{neto}$	Trabajo neto del ciclo
$\eta_t$	Eficiencia térmica del ciclo

## Introducción

Existen varias investigaciones en el ámbito de los motores de encendido por chispa que funcionan bajo el ciclo Otto pero estas investigaciones utilizan el método de calores específicos constantes por su simplicidad de aplicación, algunas de las investigaciones desarrolladas en este tema se presentan a continuación.

González, Rodríguez, García y Fernández (2010) analizan los resultados de investigaciones realizadas sobre el consumo de combustibles de motores de combustión interna de consumo diésel y gasolina y su variación en función de la masa y la potencia desarrollada. Se establecen correlaciones entre los índices y la influencia de las características de diseño mediante el programa STATGRAPHICS Plus 5.0, obteniendo ecuaciones de modelos ajustados. Los modelos elaborados permiten, para los automóviles que correspondan a las características de cada uno de los cuatro grupos, determinar los índices de consumo de combustible a velocidad óptima de régimen con solo contar con los valores de potencia del motor y su masa.

Por su parte Silgado y Ojeda (2012) mencionan que los ciclos de potencia son sistemas muy analizados mediante conceptos termodinámicos elementales, debido a que muchas máquinas basan su funcionamiento en ellos. Sin embargo, cuando el sistema se complica, no es posible obtener una expresión analítica que se pueda estudiar matemáticamente para obtener resultados, por lo cual es imprescindible el manejo de herramientas y técnicas de simulación. Así, la simulación de procesos es una herramienta imprescindible para el diseño y análisis de este tipo de ciclos termodinámicos, ya que permite resolver problemas de análisis, diseño y optimización.

Por lo anterior, los autores analizan dos ciclos de potencia (Otto y Carnot) con la ayuda del software UniSim Desing R390®, donde se establece las propiedades específicas de los sistemas, y se determinan las variaciones en parámetros como trabajo, calor y flujo másico sobre el desempeño del ciclo.

Mientras que Melo, Sánchez, Ferrer y Ferrer (2012) realizan un análisis del rendimiento de un motor de encendido por chispa al usar como combustible mezclas de etanol con gasolina en un 10%, 20% y 30%. Los parámetros analizados en cada experimento son el torque efectivo, la potencia efectiva, el consumo específico de combustible y las emisiones de monóxido de carbono. Los resultados obtenidos se analizan estadísticamente mediante una comparación de muestras múltiples en el software estadístico Statgraphics Centurion XV.II. El análisis es realizado con el objetivo de analizar las posibles diferencias entre los parámetros evaluados para cada combustible a una misma rpm. A partir de los resultados obtenidos se puede establecer satisfactoriamente dos porcentajes adecuados de la mezcla etanol-gasolina para ser utilizado en motores de encendido por chispa en las condiciones de Cuba y sin hacer modificaciones en el motor. Los autores concluyen que a medida que aumenta el por ciento de etanol en la mezcla con gasolina, el consumo de combustible aumenta para todos los puntos experimentales evaluados.

Malvar (2008) presenta la influencia de la razón de compresión, la razón de presiones, la relación de corte, la temperatura y eficiencia en un ciclo termodinámico dual. Los resultados obtenidos muestran que el trabajo y la eficiencia del ciclo dual es función de la alta temperatura del ciclo, la razón de compresión y la relación de corte.

El estudio de las ecuaciones deducidas es capaz de predecir las condiciones de operación que permiten maximizar el trabajo neto e incrementar la eficiencia del ciclo estudiado. Los resultados presentados muestran que para valores fijos de  $T_1$  y  $T_3$ , el trabajo neto del ciclo dual disminuye con la relación de compresión del motor. Mientras mayor sea la temperatura al final del calentamiento isobárico, mayor es el trabajo neto del ciclo estudiado. Para una relación de compresión dada, el rendimiento térmico del ciclo decrece rápidamente al aumentar la relación de cierre de admisión del motor. Como es de esperarse, la eficiencia térmica se incrementa con la relación de compresión, para una relación de corte dada. Si el valor de la relación de compresión no varía, el rendimiento térmico se mantiene constante cuando se incrementa la relación de presiones del motor. En un ciclo dual altos valores de la relación de compresión y de la temperatura máxima del ciclo incrementan el rendimiento térmico y el trabajo neto.

Carranza y Romero (2009) presentan un estudio comparativo de algunas características y parámetros de desempeño de un motor de combustión interna operando con gasolina y con gas natural. Se implementa el software Stanjan® para la determinación de la composición de productos de combustión y el cálculo de las temperaturas de llama. Para el cálculo de otros parámetros de desempeño, como la presión media efectiva indicada, se lleva a cabo la simulación de un motor, mediante el software Engine Simulation Program®. Los autores concluyen que las emisiones  $CO_2$  y  $CO$  generadas (en porcentaje volumétrico) por la operación de un motor con gas natural, son menores que en su operación con gasolina, bajo similares relaciones aire-combustible. El índice de emisión de contaminantes por unidad de masa de combustible para el  $CO_2$  y  $CO$ , resulta favorable a la utilización de gas natural en comparación con la gasolina.

El consumo específico de combustible es menor para la gasolina, por lo tanto, para motores que generen similar trabajo indicado, la generación global de contaminantes sería mayor para el GNV que para la gasolina. La presión media efectiva indicada para un motor operando con gas natural es menor que la presión media efectiva indicada del mismo motor operando con gasolina, lo que indica que ocurre una reducción de potencia cuando se emplea gas natural.

Espinoza y Lara (2009) realizan un estudio experimental donde se compara el desgaste ocurrido en un motor de 1.3 litros usando gasolina y gas natural vehicular (GNV) para las condiciones de velocidad variable y arranque-calentamiento. El desgaste se mide indirectamente mediante la cuantificación de las partículas metálicas contaminantes del lubricante, proveniente del desgaste de las piezas internas del motor. Las partículas de desgaste se miden con un espectrómetro de emisión. Las muestras de lubricantes se toman y analizan cada cinco horas de operación. El estudio se basa en el análisis de las concentraciones de hierro, plomo, cobre, aluminio y sílice. Los resultados evidencian que la velocidad de contaminación del aceite por partículas de desgaste de Fe, Pb, Cu y Al es mayor utilizando gasolina que GNV en porcentajes de 447%, 910%, 129% y 142% para velocidad variable y de 240%, 630%, 203% y 71% en condición de arranque y calentamiento. los resultados muestran que el motor produce menor concentración de metales de desgaste en el lubricante cuando opera con GNV como combustible que cuando utiliza gasolina, igualmente, se observa que la condición de velocidad variable del motor produce mayor desgaste que la condición de arranque y calentamiento, lo cual evidencia que las condiciones de lubricación son críticas durante los procesos de aceleración que en el calentamiento.

Debido a la mayor viscosidad del lubricante durante la prueba de calentamiento con respecto a la de velocidad variable. Los resultados evidencian que la velocidad de contaminación del aceite por partículas de desgaste de Fe, Pb, Cu y Al es mayor utilizando gasolina que GNV en porcentajes de 447%, 910%, 129% y 142% para velocidad variable y de 240%, 630%, 203% y 71% en condición de arranque y calentamiento. El GNV, como combustible en motores duales, produce menor desgaste que la gasolina, garantizando mayor vida útil tanto al motor como al lubricante, independientemente de la condición de operación del equipo.

Silgado Correa y Ojeda (2012) describen al ciclo Otto como el ideal para los motores encendidos por chispa que admiten una mezcla de aire combustible que se comprime para poder reaccionar con la adición de calor. Por su parte González y Hernández (n.d.) concluyen al ciclo Otto como la realización de 4 procesos cuasi-estáticos que comprenden una compresión adiabática, un aumento isocoro de la temperatura y presión, una expansión adiabática con un descenso de la temperatura y finalmente un descenso isocoro de la temperatura y presión. Romero Morales (2012) presenta al ciclo en cuatro tiempos que corresponden a la carrera de admisión de la mezcla, carrera de compresión de la mezcla, la chispa al final de esta carrera que enciende la mezcla liberando energía y una carrera de escape expulsando los gases generados por la explosión.

Zhao, Lin y Chen (2007), concluyen que los factores que afectan el rendimiento del motor de ciclo Otto son: las propiedades del combustible utilizado durante el ciclo del motor como es el poder calorífico, las pérdidas de calor que es transferido por las paredes del cilindro donde ocurre el ciclo dentro del motor y la eficiencia en los procesos de compresión y expansión de la mezcla de aire combustible.

Urrecheaga y Malaver (2003), determinan que el factor que influye en la eficiencia del ciclo es la relación de compresión de la mezcla de aire combustible, es decir, entre mayor sea la relación mayor será la eficiencia del motor. Por su parte Patiño G. (2003) comenta que los motores de encendido por chispa que no usan gasolina sino que usan gas los factores que afectan la eficiencia del ciclo son: la densidad del gas utilizado además de los accesorios utilizados para convertir los motores de gasolina a gas debido a la obstrucción al flujo de aire, al igual que otros autores se dedujo que con la relación de compresión se aumenta la eficiencia del motor.

Los motores de encendido por chispa ampliamente empleados en el sector automotriz por tal motivo es importante conocer sus condiciones óptimas de funcionamiento. El presente trabajo analiza el efecto que el volumen del motor, la relación aire combustible y la razón de compresión tienen en la eficiencia térmica, el trabajo neto y el consumo específico de combustible de un motor de encendido por chispa que funciona bajo el ciclo Otto.

El modelo matemático desarrollado parte de la primera ley de la termodinámica y utiliza el método de calores específicos variables, a diferencia de los modelos que se analizan en la literatura donde el trabajo neto y la eficiencia térmica son analizadas empleando el método de calores específicos constantes. El presente trabajo presenta resultados más exactos debido a que el método de calores específicos variables considera el efecto de la temperatura en las propiedades termodinámicas en los distintos estados termodinámicos presentes en el sistema, a diferencia del método de calores específicos constantes que no considera el efecto de la temperatura en las propiedades termodinámicas. El modelo desarrollado es resuelto numéricamente mediante la ayuda del software Engineering Equation Solver (EES).

## Método

El método utilizado para crear el modelo matemático consiste en utilizar el método de calores específicos variables, se utiliza este método para considerar la variación de las propiedades termodinámicas en función de la temperatura. Se considera que el fluido de trabajo es aire el cual es modelado utilizando la suposición de aire estándar, considerando el fluido de trabajo como un gas ideal.

El diagrama termodinámico  $P-v$  de una máquina de encendido por chispa que funciona bajo el ciclo Otto se presenta en el Figura 1, mientras que el Figura 2 presenta el diagrama termodinámico  $T-s$  para una máquina de encendido de chispa que funciona bajo el ciclo Otto.

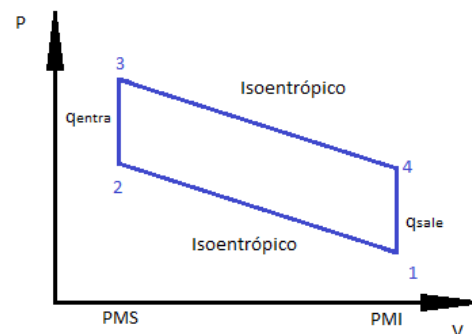


Figura 1 Diagrama termodinámico P-v

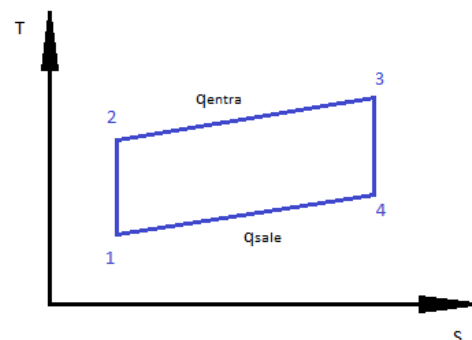


Figura 2 Diagrama termodinámico T-s

Se considera que el motor de encendido por chispa estudiado funciona bajo el ciclo Otto y que dicho motor es de cuatro tiempos.

### Modelo Matemático

A continuación se describe el modelo matemático realizado para analizar el caso de estudio planteado. Dicho modelo se realiza partiendo de la primera ley de la termodinámica y utilizando el método de calores específicos variables.

El caso de estudio a analizar consiste en un motor de combustión interna que trabaja bajo el ciclo Otto, utilizando gasolina como combustible, se considera, que el motor es de cuatro tiempos, de cuatro pistones y de 1.6 a 5.0 litros. El aire entra a  $P_1=101$  kPa y una temperatura  $T_1 = 320$  K al comienzo del proceso de compresión. El motor usa gasolina con un poder calorífico 33,000 kJ/kg.

La relación de compresión ( $r$ ) es definida por la Ecuación (1)

$$r = \frac{v_1}{v_2} \quad (1)$$

Los volúmenes específicos de los distintos estados termodinámicos del ciclo se relacionan por las Ecuaciones (2) y (3).

$$v_1 = v_4 \quad (2)$$

$$v_2 = v_3 \quad (3)$$

Las entropías específicas de los distintos estados termodinámicos del ciclo se relacionan por las Ecuaciones (4) y (5).

$$s_1 = s_2 \quad (4)$$

$$s_3 = s_4 \quad (5)$$

La eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) para un ciclo Otto de aire estándar se calcula por la Ecuación (6).

$$\eta_t = \frac{w_{neto}}{q_{2-3}} \quad (6)$$

Donde el trabajo neto ( $w_{neto}$ ) es determinado por la Ecuación (7).

$$w_{neto} = q_{2-3} - q_{4-1} \quad (7)$$

El calor que entra al sistema es definido por el calor del proceso 2 a 3 ( $q_{2-3}$ ), el cual se determina por la Ecuación (8) y el calor que sale del sistema es definido por el calor del proceso 4 a 1 ( $q_{4-1}$ ), determinado por la Ecuación (9)

$$q_{2-3} = m_f q_c \quad (8)$$

$$q_{4-1} = m(u_4 - u_1) \quad (9)$$

La masa total de aire y combustible ( $m$ ) se determina aplicando la Ecuación (10), el poder calorífico del combustible ( $q_c$ ) es un dato de entrada al sistema el cual depende del combustible utilizado, la masa del combustible ( $m_f$ ) es calculada por la Ecuación (11) y las energías internas específicas de los estados 1 y 4 ( $u_1$  y  $u_4$ ) son determinadas mediante tablas de propiedades termodinámicas.

$$P_1 = \frac{mR_a T_1}{V_{pmi}} \quad (10)$$

$$r_{ac} = \frac{m - m_f}{m_f} \quad (11)$$

El volumen en el punto muerto inferior ( $V_{pmi}$ ) se determina por la Ecuación (12).

$$V_{pmi} = V_c + V_d \quad (12)$$

$V_c$  es determinado por la Ecuación (13) y  $V_d$  es un dato de entrada del caso de estudio.

$$r = \frac{V_c + V_d}{V_c} \tag{13}$$

Finalmente la energía interna específica del estado 3 ( $u_3$ ) es calculada por la Ecuación (14), mientras que la energía interna específica del estado 2 ( $u_2$ ) se determina mediante la utilización de tablas termodinámicas.

$$q_{2-3} = m(u_3 - u_2) \tag{14}$$

Finalmente el consumo específico de combustible se determina por la Ecuación (15).

$$CEC = \frac{m_f}{w_{neto}} \cdot 1000 \cdot 3600 \tag{15}$$

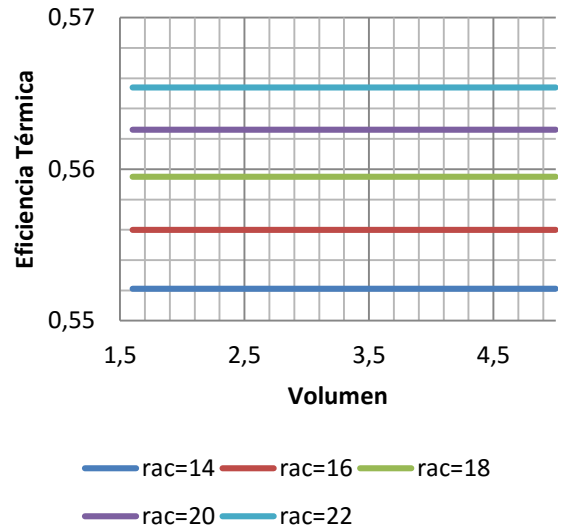
Las Ecuaciones (1) a (15) determinan el modelo matemático del caso de estudio analizado.

**Resultados**

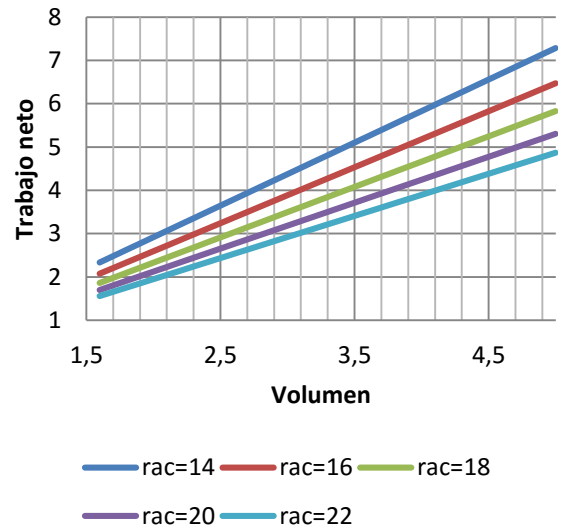
El modelo matemático desarrollado es modelado en el software Engineering Equation Solver (EES). Para resolver el modelo matemático se considera que las condiciones iniciales del sistema son:  $P_1 = 101$  kPa,  $T_1 = 320$  K,  $q_c = 33,000$  kJ/kg y el volumen se varía de 1.6 L a 5 L.

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran la variación del trabajo neto, la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible respectivamente, dichas Figuras son creadas manteniendo constante la razón de compresión en 12 y variando la relación aire combustible en un rango de 14 a 22.

La Figura 3 muestra que el volumen no incluye en la eficiencia térmica pero cuando la razón aire combustible aumenta la eficiencia térmica también se incrementa.



**Figura 3** Eficiencia térmica en función del volumen para una razón de compresión de 12



**Figura 4** Trabajo neto en función del volumen para una razón de compresión de 12

La Figura 4 muestra que el trabajo neto aumenta conforme se incrementa el volumen y además se incrementa conforme la relación aire combustible disminuye.

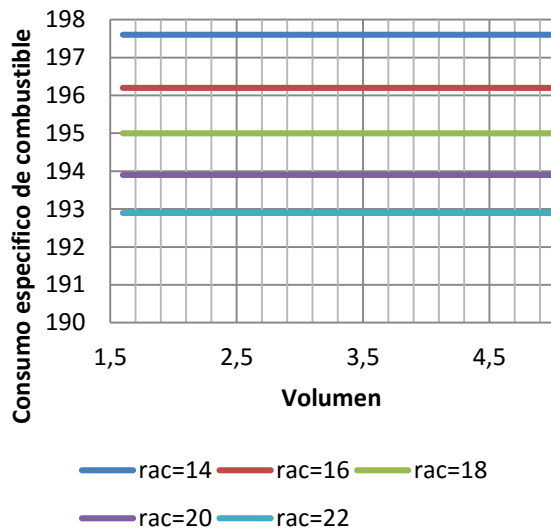


Figura 5 Consumo específico de combustible en función del volumen para una razón de compresión de 12

La Figura 5 muestra que el consumo específico de combustible no se ve afectado por el volumen pero se incrementa conforme disminuye la relación aire combustible

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la variación del trabajo neto, la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible del caso de estudio analizado, dichas Figuras son creadas manteniendo constante la relación aire combustible en 16 y variando la razón de compresión en un rango de 8 a 16.

La Figura 6 muestra que para cada una de las razones de compresión graficadas la eficiencia térmica no se ve afectada por el volumen, ya que se mantiene constante en todo el rango analizado, pero si se ve afectada por la razón de compresión y aumenta conforme aumenta la razón de compresión. La Figura 7 muestra que el trabajo neto si se ve afectado por el volumen y aumenta conforme el volumen aumenta, además que también se incrementa conforme la razón de compresión aumenta.

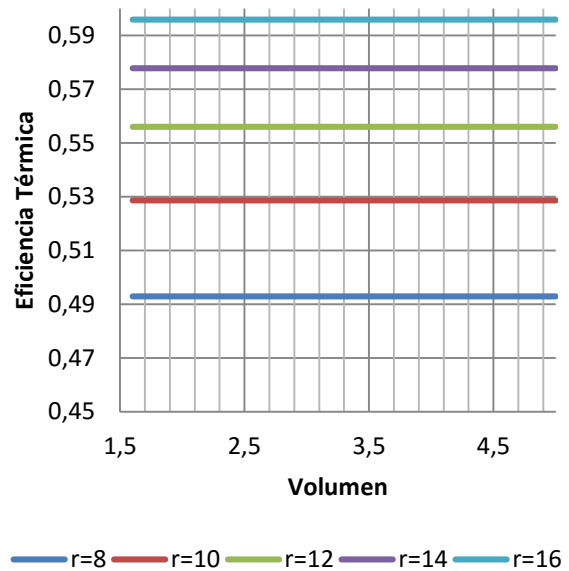


Figura 6 Eficiencia térmica en función del volumen para una razón aire combustible de 16

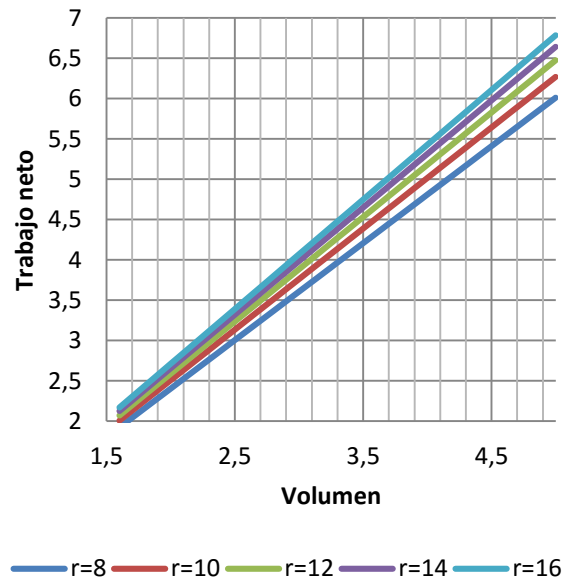
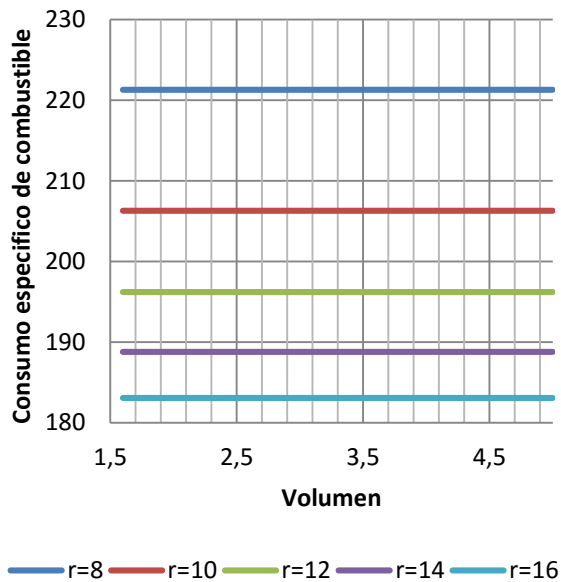


Figura 7 Trabajo neto en función del volumen para una razón aire combustible de 16





**Figura 8** Consumo específico de combustible en función del volumen para una razón aire combustible de 16

La Figura 8 muestra que el consumo específico de combustible no se ve afectado por el incremento de volumen ya que este se mantiene constante para todo el rango de volumen analizado, pero se ve afectado por la razón de compresión debido a que entre más pequeña sea la razón de compresión el consumo específico de combustible se incrementa.

## Conclusiones

El volumen de un motor que funciona bajo el ciclo Otto no afecta la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible del caso de estudio analizado. Sin embargo la eficiencia térmica aumenta conforme se incrementa la razón de compresión. De la misma forma el consumo específico de combustible se ve afectado por la razón de compresión, esto debido a que al incrementar la razón de compresión el consumo específico de combustible disminuye.

La eficiencia térmica aumenta conforme se incrementa la relación aire combustible, mientras que el consumo específico de combustible disminuye conforme aumenta la relación aire combustible.

La eficiencia térmica es más sensible a la variación de la razón de compresión que a la relación aire combustible, debido a que debido a que la eficiencia térmica sufre cambios más grandes conforme cambia la relación de compresión que si cambia la relación aire combustible.

El trabajo neto se ve afectado por la razón de compresión, por el volumen y por la relación aire combustible, al aumentar la razón de compresión el trabajo neto crece, al incrementar el volumen el trabajo neto aumenta y al aumentar la relación aire combustible el trabajo neto disminuye.

## Referencias

Carranza Y. y Romero C., (2009), Estudio teórico comparativo de características termodinámicas del desempeño de un motor de combustión operando con gasolina y con gas natural, *Scientia et Technica*, Universidad Tecnológica de Pereira, 15(41), 99-104.

Espinoza H. y Lara Y., (2009), Estudio comparativo del desgaste en un motor de encendido por chispa usando gasolina y gas natural como combustible, *Científica*, ESIME-IPN, 13(1), 3-8.

González E. y Hernández R. (n.d.), Dos problemas de termodinámica clásica, XI Coloquio Annual de Termodinámica, recuperado el 09 de Julio de 2014, de: [http://www.math.umb.edu/~eduardo/Papers\\_files/termo.pdf](http://www.math.umb.edu/~eduardo/Papers_files/termo.pdf)

González R., Rodríguez Y., García Y. y Fernández L. (2010), Consumo de combustible de los motores de combustión interna, Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Universidad Agraria de La Habana, 19(1), 1-6.

Malaver M., (2008), Análisis de las temperaturas, la eficiencia térmica y el trabajo neto en un ciclo dual, Educación Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 19(2), 1-10.

Melo E., Sánchez Y., Ferrer Na. y Ferrer No., (2012), Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina, Ingeniería Energética, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cujae, 33(2), 94 –102.

Patiño, G. (2003), Estudio de los factores que inciden en el desempeño de motores de encendido provocado (MEP) convertidos a gas natural, pp.3-116.

Romero L. (2012) Descripción, funcionamiento y mantenimiento del motor inyectado 2.0 VW, Tesis de Ingeniería Mecánico Electricista, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

Silgado K. y Ojeda K. (2012). Análisis termodinámico de ciclos de potencia, INGENIATOR, Revista virtual de los programas de ingeniería, Vol.3, No.4, pp.100-109.

Silgado K. y Ojeda K. (2012), Análisis termodinámico de ciclos de potencia, Ingeniator, Universidad de San Buenaventura, 2(4), 100-109.

Urrecheaga, K. y Malaver, M., (2003), Análisis de las temperaturas y de la eficiencia térmica en el ciclo de Otto, Educ. quím., 14(3) 138-141, 2003.

Zhao Y., Lin B. y Chen J., (2007), Optimum Criteria on the Important Parameters of an Irreversible Otto Heat Engine With the Temperature-Dependent Heat Capacities of the Working Fluid, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 129, pp. 349-354.