

Análisis de las temperaturas y de la eficiencia térmica en el ciclo de Otto

Kenry Urrecheaga y Manuel Malaver*

Abstract (*Temperatures and termic efficiency analysis of the Otto cycle*)

This paper analyzes the relation between temperatures and termic efficiency of the Otto cycle. The application of computational software helps to show the influence of compression ratio, temperatures and efficiency in that ideal thermodynamical cycle.

Resumen

Este artículo analiza la funcionalidad entre temperaturas y eficiencia térmica en el ciclo de Otto. La aplicación de programas computarizados ayuda a mostrar la influencia de la relación de compresión, las temperaturas y la eficiencia en ese ciclo termodinámico ideal.

Introducción

La termodinámica estudia entre otras cosas, los procesos de transferencia de masa y energía y es un curso fundamental en las carreras de ciencias e ingeniería. Entre las aplicaciones de la termodinámica están la generación de potencia y la refrigeración. Su estudio se hace a través del análisis de ciclos termodinámicos como los de Carnot, Rankine, Diesel, Trinkel-Sabathé y los de combustión a presión o volumen constante.

Los ciclos termodinámicos se pueden clasificar en ciclos cerrados y abiertos. En los ciclos cerrados la sustancia de trabajo se regresa a su estado inicial al final del ciclo y debe recircularse. En los ciclos abiertos la sustancia de trabajo se remueve al final de cada ciclo, en vez de recircularse. Los motores de automóviles llamados máquinas térmicas o de combustión interna, funcionan de tal manera que los gases de combustión se escapan y se reemplazan por una nueva mezcla de aire combustible al terminar cada ciclo.

El análisis de los ciclos de los motores de automóviles es complicado debido a la presencia de fenómenos como la fricción y la rapidez de los procesos de expansión-compresión que impiden establecer condiciones de equilibrio termodinámico. Si se quiere hacer manejable el estudio de un ciclo es recomendable utilizar algunas simplificaciones. Cuando al ciclo real se le eliminan todos los problemas complejos internos se obtiene un ciclo constituido por pasos

reversibles. Un ciclo con estas características recibe el nombre de ciclo ideal. El ciclo de Otto es un ciclo ideal porque todos los procesos involucrados se consideran reversibles.

Planteamiento del problema

El objetivo del presente trabajo es analizar la influencia de factores como la relación de compresión, la relación de presiones y las temperaturas sobre la eficiencia y el trabajo neto en un ciclo de Otto.

El ciclo de Otto que simula al motor de combustión interna consiste en cuatro movimientos de un pistón (Smith *et al.*, 1996), y empieza con una compresión rápida de la mezcla aire-combustible, luego la mezcla se pone en ignición y ocurre la combustión tan rápidamente que el volumen permanece casi constante y la presión se eleva. Los productos de la combustión se expanden y la temperatura y la presión disminuye. La presión cae a volumen aproximadamente constante.

Debido a la complejidad de este ciclo de potencia, los ingenieros se ven en la necesidad de trabajar con modelos idealizados, por lo que se han de establecer las siguientes aproximaciones, llamadas suposiciones de aire estándar (Cengel y Boles, 1996):

1. La sustancia de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y se comporta como un gas ideal.
2. Todos los procesos que integran el ciclo son reversibles.
3. El proceso de combustión se reemplaza por un proceso de adición térmica desde una fuente externa.
4. El proceso de escape se sustituye por un proceso de eliminación térmica que regresa la sustancia de trabajo a su estado inicial.

Con estas suposiciones el ciclo Otto teórico (Wark y Richards, 2001) se compone de los siguientes procesos reversibles (figura 1):

- (1) → (2) Compresión adiabática.
- (2) → (3) Calentamiento isométrico.
- (3) → (4) Expansión adiabática.
- (4) → (1) Enfriamiento isométrico.

Desarrollo

Un factor muy importante en el análisis de los ciclos es la eficiencia térmica (Manrique y Cárdenas, 1981). De acuerdo con las aproximaciones realizadas, para un ciclo Otto se tiene que:

* A quien debe enviarse toda la correspondencia:
Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Calle 10, Edificio Raymo, La Urbina, Caracas, Venezuela. Tel.: 242 2118.
Correo electrónico: agujero1@hotmail.com

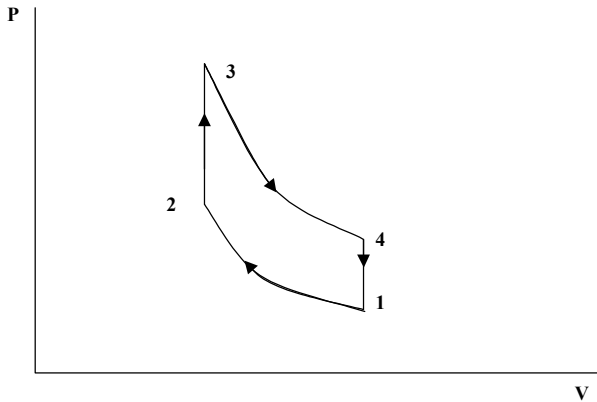


Figura 1. Ciclo de Otto periódico, donde P = presión; V = volumen.

El trabajo total está dado por:

$$W_{\text{total}} = W_{1 \rightarrow 2} + W_{3 \rightarrow 4} \quad (1)$$

donde $W_{1 \rightarrow 2}$ (figura 1) es $W_{1 \rightarrow 2} = C_V(T_2 - T_1)$ (2)

$$W_{3 \rightarrow 4} = C_V(T_4 - T_3) \quad (3)$$

por lo que $W_{\text{total}} = C_V(T_2 - T_1) + C_V(T_4 - T_3)$ (4)

La expresión para la eficiencia térmica estará dada por:

$$\eta = - \frac{W_{\text{total}}}{Q_{2 \rightarrow 3}} \quad (5)$$

$Q_{2 \rightarrow 3}$ es la energía térmica en el ciclo.

Entonces $Q_{2 \rightarrow 3} = \Delta U = C_V(T_3 - T_2)$ (6)

Reemplazando en la expresión para la eficiencia (5) queda

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = r^{\gamma-1} \quad (8)$$

donde $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ (9)

y $r = \frac{V_1}{V_2}$ (10)

en la cual r es la relación de compresión del motor.

La expresión para la eficiencia puede escribirse como:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (11)$$

Metodología

Utilizando el software suministrado por Cengel y Boles (1996) que permite estudiar ciclos de potencia de vapor y de

gas de diversas complejidades, efectuar estudios de combustión de diversos combustibles en sistemas cerrados y abiertos y evaluar propiedades de mezclas de vapor de aire-agua, de refrigerantes y diferentes gases se analizó la influencia de la relación de compresión, relación de presiones y temperatura máxima en la eficiencia y el trabajo neto en un ciclo Otto de aire estándar. Las relaciones de compresión y presión variaron de 2 a 14 y los valores de temperatura máxima estaban comprendidos entre 1,000 y 2,000 K.

La temperatura al inicio del proceso de compresión en el ciclo Otto era de 290 K. Se consideró que las capacidades térmicas variaban con la temperatura (tabla 1).

Análisis

En la tabla 1 se observa que para un ciclo Otto el trabajo neto aumenta a medida que aumenta la relación de compresión, alcanza un máximo que corresponde a un punto de trabajo óptimo del sistema y luego empieza a disminuir. Es interesante mencionar el hecho de que muchos textos de Termodinámica (por ejemplo: Burghardt, 1984; Van Wylen *et al.*, 2000) no hacen referencia a este comportamiento.

En general, los textos universitarios de Termodinámica mencionan que en un ciclo Otto la eficiencia aumenta con la relación de compresión y crece si aumenta la relación de capacidades caloríficas.

Se puede entonces determinar una relación óptima de compresión r_{opt} para que un motor de Otto suministre un trabajo máximo. Considerando que la variación de las capacidades caloríficas es lenta y que el aire tiene capacidades caloríficas constantes cuyos valores se determinan a temperatura ambiente, esto es a 300 K (Cengel y Boles, 1996), de acuerdo con la ecuación (4):

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[\left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) + \left(\frac{T_4}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \right) \right] \quad (12)$$

Por (8) y $\left(\frac{T_3}{T_4} \right) = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$ (13)

se encuentra que: $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ (14)

y la ecuación (12) queda como:

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 + \left(\frac{T_3}{T_2} - \frac{T_3}{T_1} \right) \right] \quad (15)$$

Expresando (15) en términos de r , que es la relación de compresión:

$$W_{\text{neto}} = C_V T_1 \left[\left(r^{\gamma-1} - 1 \right) + r^{1-\gamma} \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_3}{T_1} \right] \quad (16)$$

Tabla 1.

Relación de compresión $r = V_1/V_2$	Trabajo neto W_{neto} (kJ/kg)	Eficiencia (%) n	Trabajo neto W_{neto} (kJ/kg)	Eficiencia (%) n	Trabajo neto W_{neto} (kJ/kg)	Eficiencia (%) n	Trabajo neto W_{neto} (kJ/kg)	Eficiencia (%) n
	$T_{\text{max}} = 1,000 \text{ K}$		$T_{\text{max}} = 1,500 \text{ K}$		$T_{\text{max}} = 1,700 \text{ K}$		$T_{\text{max}} = 2,000 \text{ K}$	
2	110.6	22.78	201.6	21.61	238	21.3	292.7	20.85
4	161.8	40.61	328.4	38.91	395.2	38.36	495.6	37.65
6	164.5	49.09	369.1	47.29	451.4	46.67	574.9	45.87
8	154.5	54.36	383.4	52.55	475.7	51.92	614.2	51.08
10	139.6	58.05	386.1	56.28	485.5	55.64	634.9	54.8
12	123	60.84	382.9	29.11	487.8	58.48	645.7	57.63
14	105.9	63.04	376.4	61.36	485.9	60.73	650.5	59.89
16	88.5	64.85	367.9	63.21	484.1	62.59	651.3	61.75

En el punto de trabajo máximo se tiene que:

$$\frac{d W_{\text{neto}}}{dr} = 0 \tag{17}$$

luego:

$$\frac{d W_{\text{neto}}}{dr} = C_v T_1 \left[(\gamma - 1) r^{\gamma - 1 - 1} + (1 - \gamma) r^{1 - \gamma - 1} \frac{T_3}{T_1} \right] = 0 \tag{18}$$

por lo que:

$$r_{\text{opt}} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2}(\gamma - 1)} \tag{19}$$

La relación de compresión también puede expresarse como:

$$r = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \tag{20}$$

En el punto máximo se obtiene que:

$$\left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{1}{2}(\gamma - 1)} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \tag{21}$$

$$\text{por lo que: } T_2 = (T_3 T_1)^{\frac{1}{2}} \tag{22}$$

lo que significa que en el ciclo Otto ideal (cerrado) el trabajo máximo se tiene cuando la temperatura al final de la compresión es la media geométrica de las temperaturas al inicio del ciclo y al final del calentamiento isométrico.

En la figura 2 se observa que un aumento de la temperatura máxima ocasiona que los valores de relación de compresión para los que se alcanza el trabajo máximo estén desplazados hacia valores mayores de relación de compresión, como es de esperarse de acuerdo con la ecuación (19).

Lo mismo puede verse en la tabla 1. En efecto, para $T_{\text{máx}} = 1,700 \text{ K}$ corresponde un valor de $r_{\text{máx}} = 12$. En la figura 3 se muestra la variación de la eficiencia térmica vs. la relación de compresión. Para los valores de temperatura máxima considerados, la eficiencia aumenta con la relación de compresión, como es de esperarse, pero el valor de la eficiencia se empieza a nivelar a partir de un valor de relación de compresión de aproximadamente 8.

Conclusiones

El software utilizado es capaz de predecir las condiciones de operación que permiten obtener un trabajo neto óptimo e incrementar la eficiencia del ciclo estudiado.

Para valores fijos de T_1 y T_3 , el trabajo neto del ciclo Otto

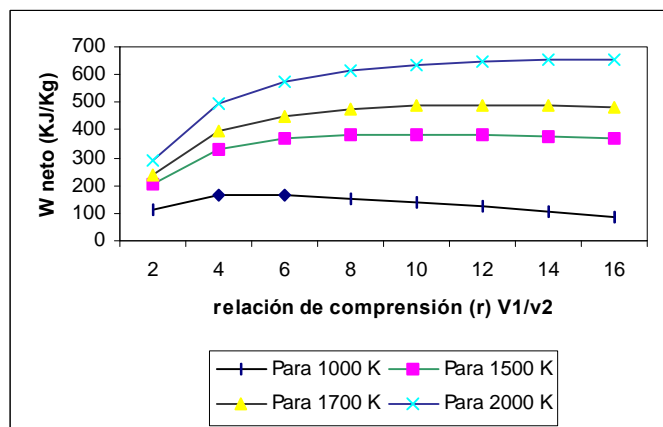


Figura 2.

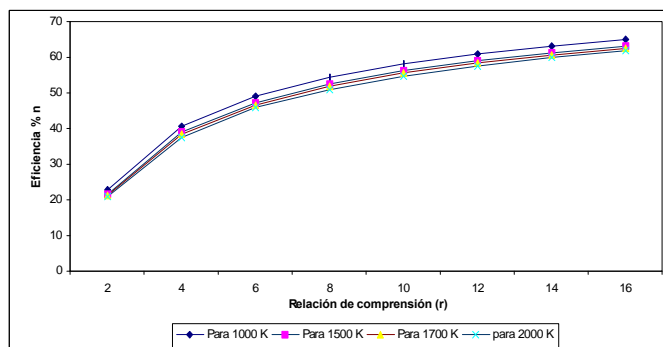


Figura 3.

aumenta primero con la relación de compresión, luego alcanza un máximo a $r_p = (T_3/T_1)^{1/2(\gamma-1)}$ y finalmente disminuye. En un ciclo Otto, bajo análisis de aire estándar, el trabajo máximo se tiene cuando la temperatura al final de la compresión es la media geométrica de las temperaturas al inicio del ciclo y al final del calentamiento isométrico $T_2 = (T_3 T_1)^{1/2}$.

En el ciclo Otto, bajo el análisis de aire estándar, a temperaturas cercanas a 1,500 K se tienen las mayores relaciones de compresión. ■

Bibliografía

Burghardt, M.D., *Ingeniería Termodinámica*, 2ª ed., Harla, México, 1984, p. 124-141.
 Cengel, Y. y M. Boles, *Termodinámica*, tomo II, cap. 8, 2ª ed., McGraw-Hill, México, 1996.
 Manrique, J. y R. Cárdenas, *Termodinámica*, Harla, México, 1981, p. 193-213.
 Smith, J.M., H. Van Ness y M. Abbot, *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*, cap. 8, 4ª ed., México, 1997.
 Van Wylen, G.J., R.E. Sonntag y C. Borgnakke, *Fundamentos de Termodinámica*, cap. 9, 2ª ed., Limusa, México, 2000.
 Wark, K. y D. Richards, *Termodinámica*, cap. 15, 6ª ed., McGraw-Hill, México, 2000.

ALGORITMO UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS DE CICLOS DE POTENCIA DE GAS

IDEAL GAS POWER IDEAL
 Developed by Michael A. Boles
 © 1994 by McGraw-Hill, Inc.

The thermodynamic properties of the ideal gases presented in this program are to be used only for solving the problems in the text "THERMODYNAMICS - AN ENGINEERING APPROACH" by Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

Press any key to continue... (Cengel/Boles)
 This program solves the ideal Gas Power Cycles listed below
 Begin the session by selecting the number for one of the Ideal Gas Power Cycles:
 1 Otto Power Cycle
 2 Brayton Power Cycle
 3 Exit Program
 Enter Your Selection (1, 2 or 3):

***** SIGN CONVENTION FOR OTTO CYCLE*****
 The following sign convention is used:
 Heat IN is positive; Heat OUT is negative
 Work OUT is positive; Work IN is negative
 Press any key to continue...(Cengel/Boles)

Select a working fluid from the following list:

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1. Air (G) | 8. Nitrogen atom N (G) |
| 2. Argon Ar (G) | 9. Nitrogen molecule N2 (G) |
| 3. Carbon monoxide CO (G) | 10. Nitric oxide NO (G) |
| 4. Carbon dioxide CO2 (G) | 11. Nitrogen dioxide NO2 (G) |
| 5. Hydrogen atom H (G) | 12. Oxygen atomic O (G) |
| 6. Hydrogen molecule H2 | 13. Oxygen molecule O2 (G) |
| 7. Hydroxyl OH | 14. Helium He (G) |

Enter gas identification number (1 TO 14) and press <Enter>:

Select,
 1 for SI system of units
 2 for English system of units

Enter selection (1 or 2):
 Select the temperature scale:
 1 for absolute units: Kelvin (K) or Rankine (R)
 2 for non-absolute units: Celsius (deg C) or Fahrenheit (deg F)
 Enter selection (1 or 2):
 Select the method of solution:
 1 Constant specific heats evaluated at 300 K
 2 Variable specific heats
 Enter selection (1 or 2):
 Cycle input variables:
 The input variables for the cycle include:
 Temperature, T1 and pressure, P1 at the beginning of compression;
 the compression ratio, r; polytropic exponents for compression and expansion, n; and the cycle MAXIMUM TEMPERATURE, T3; OR THE HEAT SUPPLIED to the cycle, Qin
 Choose whether to input maximum temperature or heat supplied:
 1 Input the cycle MAXIMUM TEMPERATURE , T3
 2 Input the HEAT SUPPLY, Qin
 Enter selection (1 or 2):
 Choose whether the compression ratio or maximum temperature is to be varied:
 1 vary compression ratio
 2 vary maximum temperature
 Enter selection (1 or 2):
 Choose the type of compression and expansion processes:
 1 both are isentropic
 2 both are nonisentropic , $1 \leq n \leq k$ where n is the polytropic exponent and $k=Cp/Cv$
 Enter selection (1 or 2):
 OTTO POWER CYCLE ANALYSIS with working fluid: Air
 Variable specific heat is assumed
 At 300 k, $Cp/Cv = k = 1.3999$
 Isentropic case: $V4 = V1$, $V3 = V2$
 $s2 = S1$
 $S4 = S3$
 Enter cycle intake pressure P1 in Mpa:
 Enter cycle intake temperature T1 in K:
 Enter maximum temperature T3 in K
 3 or enter new compression ratio r: