

Ingeniería Térmica

Año de elaboración: 2018

Horas teóricas	4.0
Horas prácticas	1.0
Total de horas	5.0
Créditos institucionales	9.0
Título del material	Ciclo de Otto estándar de aire
Tipo de unidad de aprendizaje	curso
Carácter de la unidad de aprendizaje	obligatoria
Núcleo de formación	Sustantivo
Programa educativo	Ingeniería Mecánica
Espacio académico	Facultad de Ingeniería
Responsable de la elaboración	Juan Carlos Posadas Basurto

ÍNDICE

	Página
Presentación	1
Estructura de la unidad de aprendizaje	2
Contenido de la presentación	4
Introducción	6
Consideraciones	7
Ciclo de potencia estándar de aire	9
Nokolaus A. Otto	10
Partes del mci encendido por chispa	11
ciclo de Otto estándar de aire	12
Ejemplo 1	18

	Página
Tablas de aire	24
Ejemplo 2	29
Observaciones	35
Bibliografía	36

PRESENTACIÓN

- La unidad de aprendizaje Ingeniería Térmica es obligatoria y se sugiere cursarla en el sexto período.
- Como Unidad de Aprendizaje antecedente está Termodinámica, en el quinto periodo, donde se revisan los principios, las propiedades de las sustancias puras, la ley de los gases ideales, manejo de tablas y diagramas de aire, de vapor de agua y de refrigerantes, análisis de ciclos de acuerdo a las leyes de la Termodinámica.
- El discente que aprueba la Unidad de Aprendizaje Termodinámica es capaz de analizar ciclos termodinámicos. Uno de estos ciclos es el de potencia estándar de aire conocido como ciclo de Otto.

ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE

1. De las distintas fuentes de energía suministradas a los sistemas termodinámicos para generar energía mecánica (sistemas de potencia) y para absorber energía térmica (sistemas de refrigeración), valorar la importancia que tiene el estudio de la Ingeniería Térmica (Termodinámica Aplicada) en la aplicación de energías renovables y mejora de los dispositivos térmicos.
2. A partir de motores que utilizan aire como fluido de trabajo y tienen un rendimiento térmico igual al de la máquina de Sadi Carnot, analizar los sistemas de potencia propuestos por Robert Stirling y John Ericcson.
3. Considerando los motores térmicos que actualmente son ensamblados a vehículos terrestres, aéreos y acuáticos, y que utilizan combustibles fósiles para su accionamiento, analizar cada uno de ellos (Otto, Diesel, Dual, Brayton), determinando sus ineficiencias y posibles mejoras.

4. Dada la importancia de generar energía eléctrica para abastecer las necesidades de cualquier ciudad, se analizan las propuestas de sistemas térmicos de potencia (Diesel, Brayton, Rankine) para conectarse a un generador eléctrico, tomando en cuenta el combustible utilizado y la contaminación producida.
5. Para la conservación de alimentos y bebidas en lugares tales como hogares, restaurantes y hoteles, se analiza el sistema de refrigeración por compresión de un vapor considerando las propuestas de mejora del ciclo termodinámico y los fluidos de trabajo utilizados para tal fin.
6. De la propuesta de utilizar aire para un sistema de enfriamiento, se analiza el ciclo de refrigeración por compresión de un gas (aire).
7. Considerando que hay propuestas de mejora de sistemas de refrigeración, se analiza el ciclo de refrigeración por absorción de un vapor, determinando sus mejoras e ineficiencias.

CONTENIDO DE LA PRESENTACIÓN

- La presentación comprende parte del punto 3 de la estructura de la Unidad de Aprendizaje. Se analiza el ciclo de Otto estándar de aire para que el discente comprenda el principio de funcionamiento de un motor de combustión interna.
- Inicia con una introducción a los ciclos termodinámicos así como algunas consideraciones.
- Se da una breve semblanza de Nikolaus A. Otto, diseñador del motor que trabaja con base en el ciclo que lleva su nombre.
- Se muestran las partes del motor encendido por chispa.
- Se describe el ciclo de Otto estándar de aire y se da un ejemplo de aplicación utilizando ecuaciones de estado.
- Se explica el uso de tablas de aire para terminar con su aplicación en un ejemplo.
- Al final de la presentación se incluye un apartado de referencias para que tanto el docente como el discente profundicen en los temas de interés.

INGENIERÍA TÉRMICA

Ciclo de Otto estándar de aire

INTRODUCCIÓN

- Los dispositivos o sistemas que se usan para producir una salida neta de potencia se llaman motores o máquinas térmicas, y los ciclos termodinámicos en los que operan se llaman ciclos de potencia (Cengel & Boles, 2009).
- Los ciclos termodinámicos se clasifican de gas y de vapor. En los ciclos de gas, el fluido de trabajo permanece en la fase gaseosa durante todo el ciclo. En los ciclos de vapor, el fluido de trabajo existe en fase de vapor durante una parte del ciclo y en fase líquida durante otra parte (Cengel & Boles, 2009).
- Las máquinas térmicas pueden ser de combustión interna MCI (el fluido que genera el calor es la sustancia de trabajo y la que tiene contacto con las partes móviles de la máquina) y de combustión externa MCE (el calor y el fluido de trabajo están separados por una pared conductora. El calor no tiene contacto con las partes móviles de la máquina) (Milton, 2005).

CONSIDERACIONES (CENGEL & BOLES, 2009)

- Los motores reales son difíciles de analizar debido a las pérdidas de potencia por fricción y la falta de tiempo para establecer las condiciones de equilibrio durante el ciclo.
- Para que sea factible el estudio analítico de un ciclo de potencia se requiere suponer ciertas idealizaciones que eliminan las irreversibilidades y complejidades internas, obteniendo así un ciclo que se parece en gran medida al real pero que está formado en su totalidad de procesos internamente reversibles. Tal ciclo es llamado un ciclo ideal.
- Los valores numéricos obtenidos del análisis de un ciclo ideal no son necesariamente representativos de los ciclos reales y debe tenerse cuidado en su interpretación.

(CENGEL & BOLES, 2009)

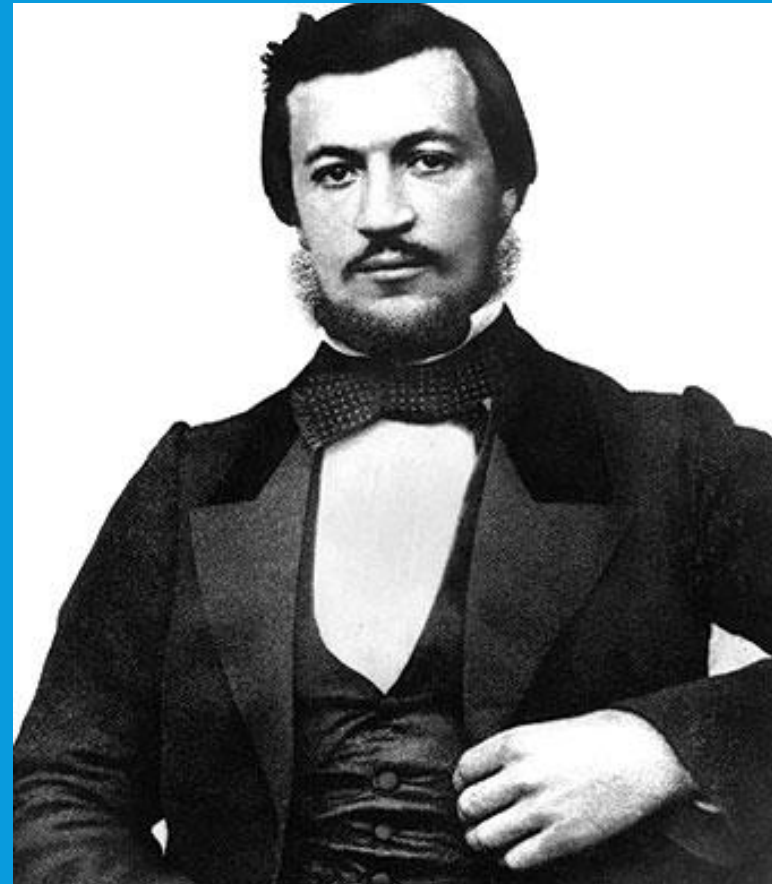
- Los ciclos ideales son internamente reversibles, pero, a diferencia del ciclo de Carnot, no son de manera necesaria externamente reversibles.
- Las idealizaciones y simplificaciones empleadas comúnmente en el análisis de los ciclos de potencia, pueden resumirse del siguiente modo:
 1. El ciclo no implica ninguna fricción. Por lo tanto el fluido de trabajo no experimenta ninguna caída de presión cuando fluye en tuberías o dispositivos como los intercambiadores de calor.
 2. Todos los procesos de expansión y compresión ocurren en la forma de cuasiequilibrio.
 3. Las tuberías que conectan a los diferentes componentes de un sistema están muy bien aisladas y la transferencia de calor a través de ellas es insignificante.
 4. Se desprecian los cambios de las energías cinética y potencial del fluido de trabajo.

CICLO DE POTENCIA ESTÁNDAR DE AIRE

- Los motores de tipo teórico, con combustión externa, se conocen con el nombre de motores estándares de aire, siendo este fluido la sustancia de trabajo (Burghardt & Harbach, 1993).
- En lugar de quemar el combustible en la máquina, el calor es agregado desde una fuente externa (Burghardt & Harbach, 1993).
- Al no haber productos de la combustión se utiliza un sumidero térmico para absorber el calor del aire (Burghardt & Harbach, 1993).
- El motor funciona en un ciclo termodinámico y el fluido de trabajo es una masa fija de aire atmosférico que actúa como un gas ideal durante todo el ciclo (Balmer, 2011).
- Todos los procesos dentro del ciclo termodinámico son reversibles (Balmer, 2011).

NIKOLAUS A. OTTO

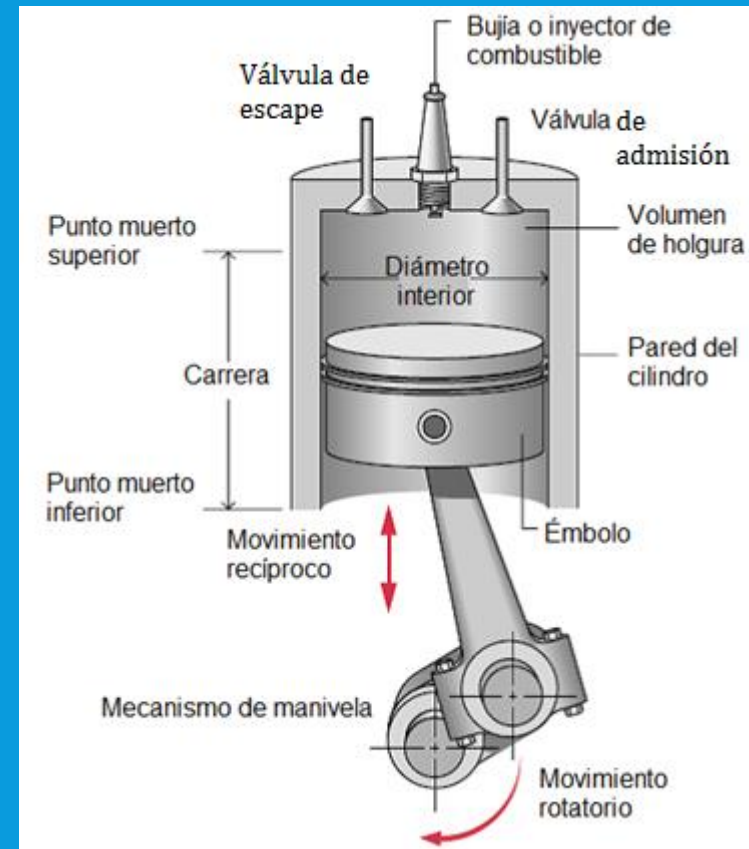
- El ciclo de Otto es el ciclo ideal para las máquinas recíprocas de encendido por chispa (Cengel & Boles, 2009).
- Nikolaus A. Otto en 1876, en Alemania, construyó una exitosa máquina de cuatro tiempos utilizando el ciclo propuesto por Beau de Rochas en 1862 (Cengel & Boles, 2009).
- Perdió la patente en 1886, al descubrirse la anterioridad del invento de Alphonse Beau de Rochas (Ruiza, Fernández, Tamaro, & Durán, 2018).



(Ruiza, Fernández, Tamaro, & Durán, 2018)

PARTES DEL MCI ENCENDIDO POR CHISPA

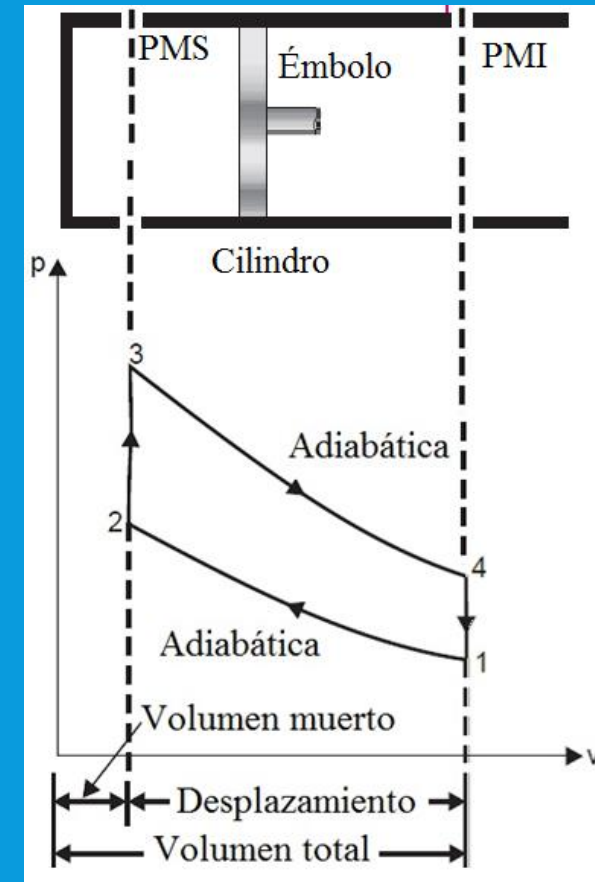
- El volumen provocado por el émbolo y el cilindro entre los puntos muerto superior PMS y muerto inferior PMI, es el volumen de desplazamiento .
- La mezcla de aire combustible entra al cilindro por la válvula de admisión, y los productos de combustión salen por la de escape.
- El émbolo en el PMS presenta un volumen de holgura o muerto. La relación de volúmenes máximo y mínimo es de compresión.



(Moran & Shapiro, 2008)

CICLO DE OTTO ESTÁNDAR DE AIRE

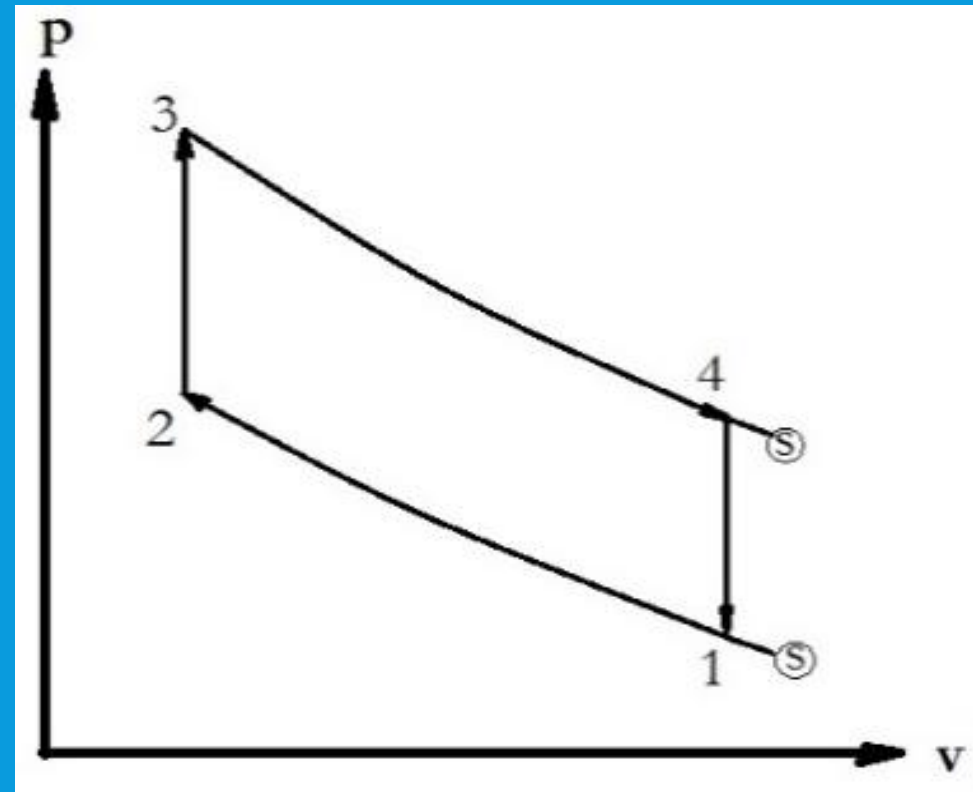
- 1 – 2 compresión adiabática.
- 2 – 3 suministro de calor a volumen constante.
- 3 – 4 expansión adiabática.
- 4 – 1 rechazo de calor a volumen constante
- Obsérvese que en el ciclo Otto estándar de aire no hay válvulas de admisión y escape ya que la masa de aire es constante en el ciclo.



TRABAJO DE COMPRESIÓN ADIABÁTICA

- El proceso adiabático para un sistema cerrado obedece a la relación $pv^k = \text{constante}$, donde p es la presión, v el volumen específico y $k = \frac{c_p}{c_v}$ es la constante adiabática del fluido de trabajo (para el aire $k = 1.4$ a una temperatura de 300 K).
- El trabajo se obtiene de la integral para sistemas cerrados.

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv$$



- $$w_{1-2} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{\text{constante}}{v^k} dv = \text{constante} \int_1^2 \frac{dv}{v^k} = \frac{\text{constante}}{1-k} v^{1-k} \Big|_1^2$$
- $$w_{1-2} = \frac{\text{constante}}{1-k} (v_2^{1-k} - v_1^{1-k})$$
- La constante puede tomar los valores de $p_1 v_1^k$ o $p_2 v_2^k$ según convenga en la ecuación
- $$w_{1-2} = \frac{p_2 v_2^k \cdot v_2^{1-k} - p_1 v_1^k \cdot v_1^{1-k}}{1-k} = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-k}$$
- Si se considera el fluido gas ideal, entonces
- $$w_{1-2} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-k} = \frac{(c_p - c_v) \cdot (T_2 - T_1)}{1 - \frac{c_p}{c_v}} = \frac{(c_p - c_v) \cdot (T_2 - T_1)}{\frac{c_v - c_p}{c_v}} = c_v \cdot (T_1 - T_2) = u_1 - u_2$$

TRABAJO DE EXPANSIÓN ADIABÁTICA

- Esta diferencia de energías internas se pudo haber obtenido de la relación
- $q_{1-2} + u_1 = u_2 + w_{1-2}$
- Para un proceso adiabático $q_{1-2} = 0$
- $w_{1-2} = u_1 - u_2$
- De igual manera que el proceso de compresión adiabática 1 a 2, el proceso de expansión adiabática 3 a 4 es
- $w_{3-4} = \frac{p_4 v_4 - p_3 v_3}{1-k} = \frac{R(T_4 - T_3)}{1-k} = c_v \cdot (T_3 - T_4) = u_3 - u_4$
- En los procesos de suministro y expulsión de calor, procesos 2 a 3 y 4 a 1 respectivamente, no hay trabajo.

SUMINISTRO Y EXPULSIÓN DE CALOR

- $q_{2-3} = u_3 - u_2 = c_v \cdot (T_3 - T_2)$
- $q_{4-1} = u_1 - u_4 = c_v \cdot (T_1 - T_4)$
- La eficiencia térmica para el ciclo de Otto estándar de aire es

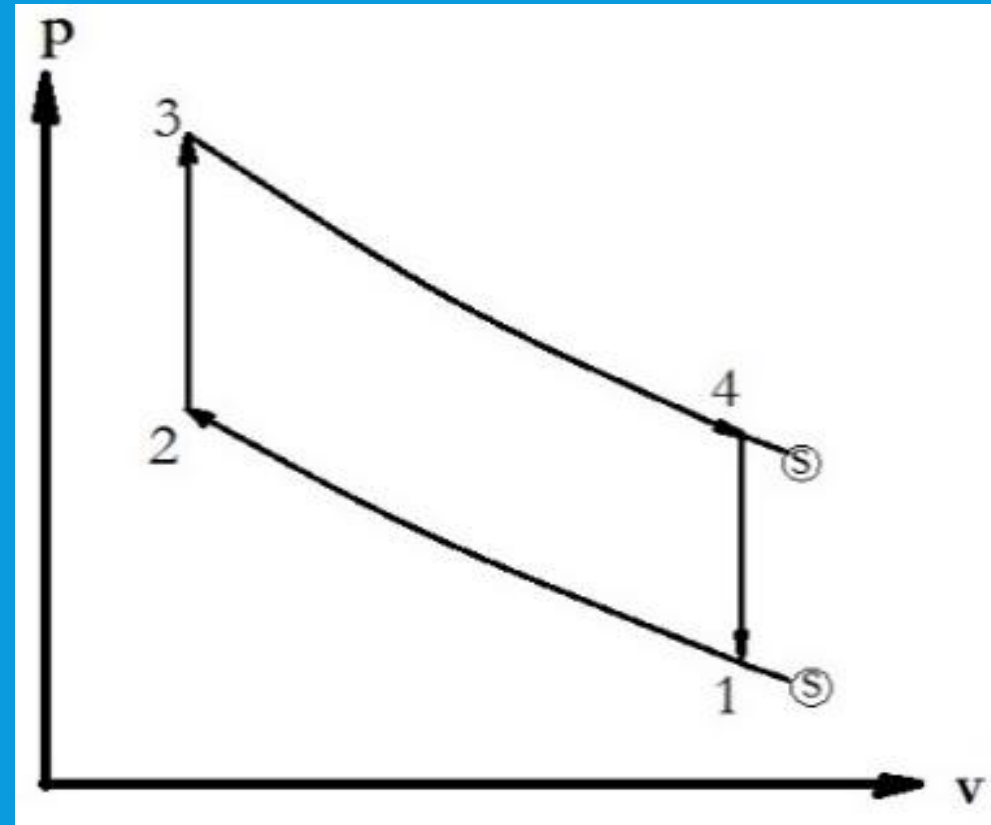
$$\eta_{Otto} = \frac{w_{neto}}{q_{suministrado}} = \frac{c_v \cdot (T_1 - T_2) + c_v \cdot (T_3 - T_4)}{c_v \cdot (T_3 - T_2)} = \frac{(T_1 - T_2) + (T_3 - T_4)}{(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{Otto} = \frac{-T_2 \left(1 - \left[\frac{T_1}{T_2}\right]\right) + T_3 \left(1 - \left[\frac{T_4}{T_3}\right]\right)}{(T_3 - T_2)} = \frac{T_3 \left(1 - \left[\frac{v_3}{v_4}\right]^{k-1}\right) - T_2 \left(1 - \left[\frac{v_2}{v_1}\right]^{k-1}\right)}{(T_3 - T_2)}$$

EFICIENCIA TÉRMICA

- De la figura se ve que $v_1 = v_4$ y $v_2 = v_3$
- Como la relación de compresión r_v es la razón del volumen máximo entre el volumen mínimo.

$$\eta_{Otto} = \frac{T_3 \left(1 - \left[\frac{1}{r_v}\right]^{k-1}\right) - T_2 \left(1 - \left[\frac{1}{r_v}\right]^{k-1}\right)}{T_3 - T_2}$$
$$\eta_{Otto} = \frac{(T_3 - T_2) \left(1 - \left[\frac{1}{r_v}\right]^{k-1}\right)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$



EJEMPLO 1

Un ciclo de Otto estándar de aire inicia su carrera de compresión a 100 kPa y 280 K. La relación de compresión es de 20:1 y la temperatura máxima del ciclo 1100 K. Calcule:

- a) La eficiencia térmica del ciclo.
- b) El trabajo neto del ciclo, en kJ/kg.
- c) El calor suministrado, en kJ/kg.
- d) La presión máxima del ciclo, en kPa.
- e) La presión al final de la expansión adiabática.

SUPOSICIONES Y DATOS

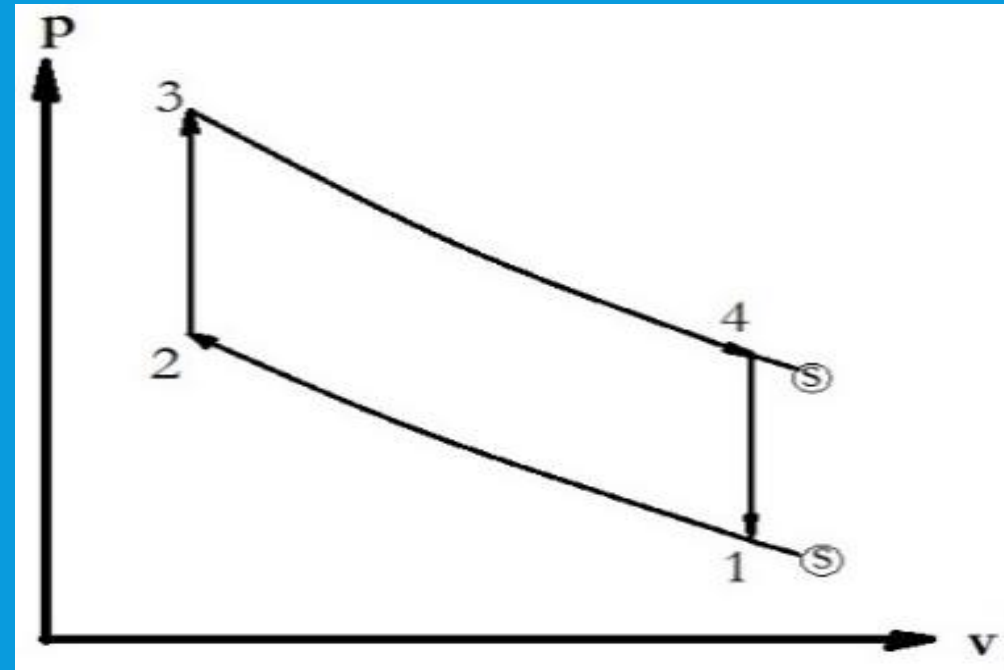
Suposiciones: Aire como fluido de trabajo, sustancia pura y simple compresible. El sistema es cerrado y el ciclo reversible. Se desprecian cambios de energías cinética y potencial. Los calores específicos se consideran constantes en todo el ciclo.

Datos: De acuerdo a la figura

$$p_1=100 \text{ kPa}; T_1=280 \text{ K}; T_3=1100 \text{ K};$$

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} = 20; k = 1.4;$$

$$c_v = 0.718 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$



SOLUCIÓN

a) Rendimiento térmico

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} = 1 - \frac{1}{20^{1,4-1}} = 0,6983 \text{ o } 69,83 \%$$

b) Trabajo neto del ciclo

$$w_{neto} = w_{1-2} + w_{3-4} = c_v \cdot (T_1 - T_2) + c_v \cdot (T_3 - T_4)$$

Donde $c_v = 0,718 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg} \cdot \text{K})}$. Para obtener las temperaturas en 2 y en 4 se utilizan sus relaciones adiabáticas con volúmenes.

$$T_2 = T_1 \cdot r_v^{k-1} = 280(20^{1,4-1}) = 928,05 \text{ K}$$
$$T_4 = T_3 \cdot r_v^{1-k} = 1100(20^{1-1,4}) = 331,88 \text{ K}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en el trabajo neto

$$w_{neto} = 0,718 \cdot (280 - 928,05) + 0,718 \cdot (1100 - 331,88) = 86,21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

c) Calor suministrado

$$q_{suministrado} = c_v \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \cdot (1100 - 928,05) = 123,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

d) Presión máxima del ciclo

La presión máxima del ciclo se da en el estado 3. Se requiere al menos de dos variables independientes para obtener la presión. Se puede obtener el volumen en 3 para relacionarlo con la temperatura máxima.

Para esto, se requiere calcular el volumen en el estado 1. De la ecuación de gas ideal

$$v_1 = v_4 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{0,287 \cdot 280}{100} = 0,8036 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Se conoce la relación de compresión y que $v_2 = v_3$

$$v_2 = v_3 = \frac{v_1}{r_v} = \frac{0,8036}{20} = 0,04018 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Nuevamente, de la ecuación de gas ideal

$$p_3 = \frac{RT_3}{v_3} = \frac{0,287 \cdot 1100}{0,04018} = 7857,14 \text{ kPa}$$

e) Presión al final de la expansión adiabática.

La expansión adiabática termina en el estado 4. Se conoce el volumen y la temperatura en 4. De la ecuación de gas ideal

$$p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = \frac{0,287 \cdot 331,88}{0,8036} = 118,53 \text{ kPa}$$

TABLAS DE AIRE

- En cada temperatura hay un valor distinto tanto de c_p como de c_v . Al considerar que tanto la entalpía como la energía interna dependen única y exclusivamente de la temperatura, se puede desarrollar ecuaciones para tabular los valores. De la ecuación del primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos, en forma diferencial, se tiene que
 - $q = h_{salida} - h_{entrada} + w$
 - $\delta q = dh + \delta w$
 - Donde $\delta q = Tds$ y $\delta w = -vdp$
 - $Tds = dh - vdp$
 - Para un proceso adiabático $ds = 0$. Además $dh = c_p dT$.

- $0 = c_p dT - v dp$

- De la ecuación de gas ideal se tiene que $v = RT/p$

- $c_p dT = \frac{RT}{p} dp$

- $\frac{1}{p} dp = \frac{c_p}{RT} dT$

- Al integrar la ecuación y considerando el punto inicial como el punto de referencia o resulta

- $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \int_{T_0}^T \frac{c_p}{RT} dT = \phi - \phi_0$

- La relación $\frac{p}{p_0}$ se le conoce como presión relativa, p_r , a un punto de referencia arbitrario y depende únicamente de la temperatura. Al sustituir la ecuación del gas ideal en la ecuación de presión relativa, se obtiene la relación de volúmenes

$$p_r = \frac{p}{p_0} = \frac{RT/v}{R_0T_0/v_0} = \frac{RT}{R_0T_0} \cdot \frac{v_0}{v} = \frac{RT}{R_0T_0} \cdot \frac{1}{v_r}$$

$$v_r = \frac{RT}{R_0T_0} \cdot \frac{1}{p_r}$$

- Como R , T , R_0 , T_0 y p_r están en función de la temperatura, el volumen relativo, $v_r = \frac{v}{v_0}$, también es función de la temperatura. Las propiedades relativas se pueden ver en función de las propiedades totales, es decir

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2/p_0}{p_1/p_0} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2/v_0}{v_1/v_0} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$$

- Las tablas desarrolladas para el aire y otros gases se elaboraron con base en la temperatura para procesos adiabáticos. Debe tenerse presente que las relaciones de presión y volumen relativo sirven para analizar procesos adiabáticos solamente, para otros procesos habrá que buscar alguna otra función.

TABLA DE AIRE (BURGHARDT & HARBACH, 1993)

T K	h kJ/kg	p_r	u kJ/kg	v_r	ϕ kJ/(kg · K)
100	99,76	0,02990	71,06	2230	1,4143
110	109,77	0,04171	78,20	1758,4	1,5098
120	119,79	0,05652	85,34	1415,7	1,5971
130	129,81	0,07474	92,51	1159,8	1,6773
140	139,84	0,09681	99,67	964,2	1,7515
150	149,86	0,12318	106,81	812,0	1,8206
160	159,87	0,15431	113,95	691,4	1,8853
170	169,89	0,19068	121,11	594,5	1,9461
180	179,92	0,23279	128,28	515,6	2,0033
190	189,94	0,28114	135,40	450,6	2,0575
200	199,96	0,3363	142,56	396,6	2,1088
210	209,97	0,3987	149,70	351,2	2,1577

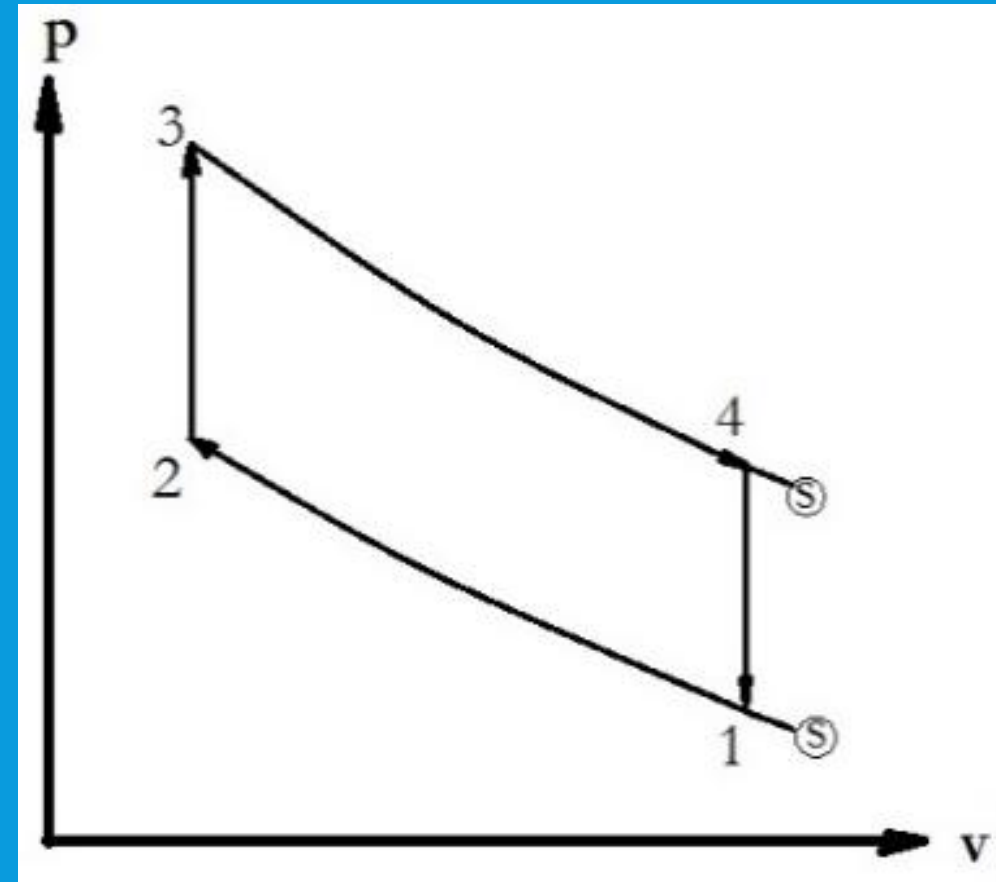
EJEMPLO 2

Se requiere que un ciclo de Otto estándar de aire proporcione un rendimiento térmico de 60 % iniciando su carrera de compresión a 95 kPa y 300 K y obteniendo presión y temperatura máxima de 7500 kPa y 1100 K respectivamente. Obtenga el calor suministrado al sistema así como el trabajo neto del ciclo.

Suposiciones: Aire como fluido de trabajo, sustancia pura y simple compresible. El sistema es cerrado y el ciclo reversible. Se desprecian cambios de energías cinética y potencial. Los calores específicos cambian con respecto a la temperatura.

SUPOSICIONES

- De acuerdo a la figura
- $p_1=95 \text{ kPa}$
- $T_1=300 \text{ K}$
- $T_3=1100 \text{ K}$
- $p_3=7500 \text{ kPa}$
- $\eta_{\text{Otto}}=0,6$.



SOLUCIÓN

El calor suministrado responde a la ecuación

$$q_{\text{suministrado}} = (u_3 - u_2)$$

De las tablas de aire a la temperatura en 1, los valores son

$$T_1 = 300 \text{ K}; h_1 = 300,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; u_1 = 214,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; v_{r_1} = 144,32$$

A la temperatura en 3, los valores son

$$T_3 = 1100 \text{ K}; h_3 = 1161,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; u_3 = 845,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; v_{r_3} = 4,39$$

De la ecuación de la entalpía $h=u+pv$ se obtienen los volúmenes en el estado 1 y en el estado 3.

$$v_1 = v_4 = \frac{h_1 - u_1}{p_1} = \frac{300,19 - 214,09}{95} = 0,9063 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v_3 = v_2 = \frac{h_3 - u_3}{p_3} = \frac{1161,07 - 845,34}{7500} = 0,04209 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

De la relación de volúmenes relativos para un proceso adiabático de 1 a 2

$$v_{r_2} = v_{r_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = 144,32 \cdot \left(\frac{0,04209}{0,9063} \right) = 6,7024$$

- Buscando el valor del volumen relativo dos en las tablas de aire, se obtienen dos valores, uno superior y otro inferior al valor requerido

$$v_{r_{superior}} = 6,805; u_{superior} = 716,57 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_{r_{inferior}} = 6,599; u_{inferior} = 725,01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para obtener el valor de la energía interna en el estado 2 se tiene que interpolar. Suponiendo una relación lineal, la ecuación es

$$\frac{v_{r_{superior}} - v_{r_{inferior}}}{u_{superior} - u_{inferior}} = \frac{v_{r_{superior}} - v_{r_2}}{u_{superior} - u_2}$$

$$u_2 = \frac{v_{r_2} - v_{r_{superior}}}{v_{r_{inferior}} - v_{r_{superior}}} \cdot (u_{inferior} - u_{superior}) + u_{superior}$$

$$u_2 = \left(\frac{6,7024 - 6,805}{6,599 - 6,805} \right) \cdot (725,01 - 716,57) + 716,57 = 720,7736 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tómese en cuenta que el valor obtenido en una interpolación estará entre los valores máximo y mínimo. En caso contrario, existe un error en el desarrollo. Como se supone una interpolación lineal, los valores tabulados deben estar muy cercanos al buscado para garantizar una relación lineal.

El calor suministrado tiene el siguiente valor

$$q_{suministrado} = (845,34 - 720,7736) = 124,5664 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Por último, el trabajo neto es

$$w_{neto} = \eta_{Otto} \cdot q_{suministrado} = 0,6 \cdot 124,5664 = 74,73984 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

OBSERVACIONES

- Aunque los volúmenes permanecen con el mismo valor al obtenido con calores específicos constantes, el cambio de energía para obtener el calor y el trabajo es mayor. Esto es consecuencia del cambio en el valor de los calores específicos. A mayor temperatura, mayor valor de los calores específicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Balmer, R. T., 2011. Modern Engineering Thermodynamics. Burlington USA: Elsevier Inc..
- Burghardt, M. D. & Harbach, J. A., 1993. Engineering Thermodynamics. New York: HarperCollins College Publishers.
- Cengel, Y. A. & Boles, M. A., 2009. Termodinámica. México: McGraw-Hill.
- Milton, B. E., 2005. Thermodynamics, combustion and engines. New South Wales: School of mechanical and manufacturing engineering.

- Moran, M. J. & Shapiro, H. N., 2008. Fundamentals of engineering thermodynamics. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc..
- Ruiza, M., Fernández, T., Tamaro, E. & Durán, M., 2018. Nikolaus August Otto. [En línea] Available at: <https://www.biografiasyvidas.com/>