

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 con aire y combustible
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
Antecedentes	7
Partes del sistema émbolo cilindro	8
Motor de combustión interna	9
Movimientos ideales del émbolo	10
MCI de cuatro y de dos tiempos	12
Ciclo real	13
Ciclo Otto como sistema abierto	15

	Página
Combustible	19
Ejemplo	22
Bibliografía	38

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 con aire y combustible después de haber revisado el ciclo de Otto estándar de aire.
- Inicia con antecedentes al motor de combustión interna (MCI).
- Se muestran las partes del sistema émbolo cilindro.
- Se describe los movimientos ideales del émbolo dentro del cilindro.
- Se diferencia el MCI de 2 y de 4 tiempos.
- Se describe el ciclo real del MCI.

- Se analiza el ciclo de Otto como sistema abierto.
- Se da una breve descripción del combustible utilizado y las tablas utilizadas.
- Se realiza un ejemplo de aplicación de tablas y ecuaciones para el balance de energía.
- 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

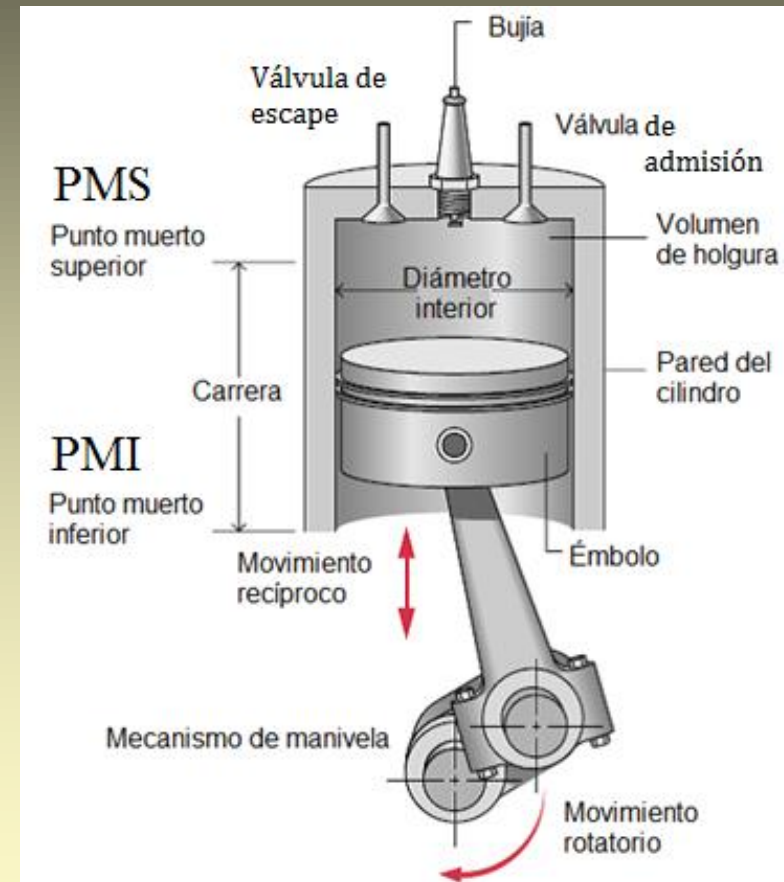
Ciclo Otto real

ANTECEDENTES (SORIANO, 1999)

- Los motores de combustión interna MCI generan calor con el fluido que es la sustancia de trabajo y la que tiene contacto con las partes móviles de la máquina.
- El calor necesario para obtener trabajo proviene de la combustión de una mezcla aire combustible en el interior del sistema émbolo cilindro.
- El sistema émbolo cilindro es el mecanismo que admite la energía térmica (calor) y la transforma en energía mecánica (trabajo).
- Ya que el émbolo se mueve de manera alternativa deslizando sobre una cubierta cilíndrica, el motor se conoce como alternativo.
- Como el sistema émbolo cilindro realiza un proceso acompañado de absorción de calor, el motor es endotérmico.

PARTES DEL SISTEMA ÉMBOLO CILINDRO

- Cilindro. Cilindro hueco comúnmente conocido como camisa de cilindro.
- Émbolo. Elemento sólido prácticamente cilíndrico que cuenta con anillos para evitar fricción al deslizarse por la camisa de cilindro.
- Válvulas. La válvula de admisión abre para aceptar una carga fresca aire combustible. La válvula de escape abre para sacar los productos de la combustión.
- Bujía. Produce la chispa eléctrica para inflamar la mezcla aire combustible.



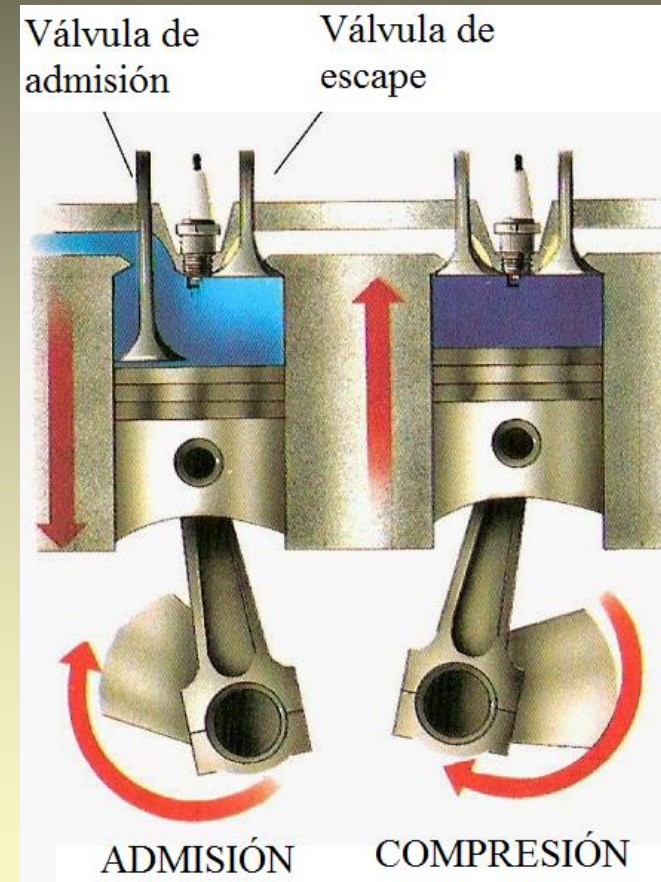
(Moran & Shapiro, 2008)

MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA



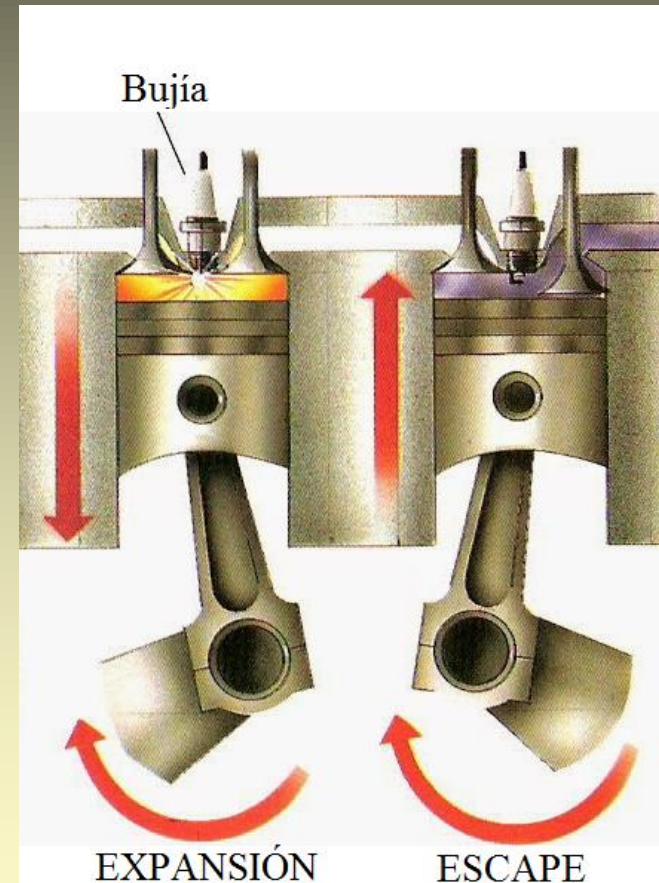
MOVIMIENTOS IDEALES DEL ÉMBOLO

- Admisión. La válvula de admisión se abre completamente y la válvula de escape permanece cerrada. La mezcla aire combustible se introduce al cilindro debido al movimiento descendente del émbolo desde el PMS hasta el PMI.
- Compresión. Se cierra la válvula de admisión. La mezcla que queda dentro del sistema se comprime cuando el émbolo se mueve del PMI al PMS.



(Barros, 2012)

- Expansión. Al llegar el émbolo al PMS la mezcla aire combustible se enciende por medio de una chispa provocada por la bujía. El incremento de temperatura y presión experimentado por la masa hace que el émbolo se mueva del PMS al PMI transmitiendo potencia de salida.
- Escape. Cuando llega el émbolo al PMI se abre la válvula de escape y los productos de la combustión son expulsados del cilindro a la atmósfera.



(Barros, 2012)

MCI DE CUATRO Y DE DOS TIEMPOS

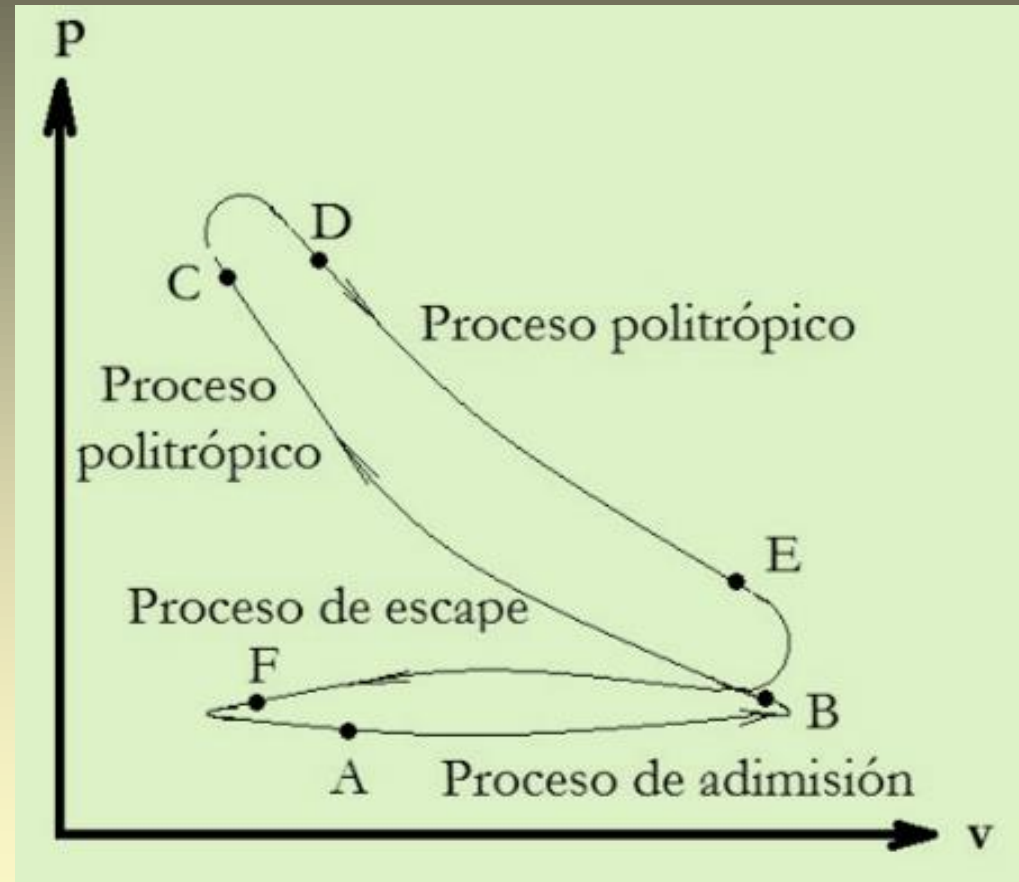
- Cuando el émbolo ejecuta los cuatro movimientos (admisión, compresión, explosión y escape) cada dos revoluciones del cigüeñal se dice que el motor es de cuatro tiempos.
- En motores de dos tiempos los movimientos de admisión, compresión, expansión y escape se logran en una revolución del cigüeñal.
- Aunque los motores de combustión interna se someten a ciclos mecánicos, el contenido del cilindro no ejecuta un ciclo termodinámico, ya que la materia se introduce con una composición y luego se descarga en una diferente.

CICLO REAL

A. La válvula de escape se cierra. La mezcla aire combustible llena el espacio limitado entre el cilindro y el émbolo al crearse un vacío por el movimiento del émbolo del PMS al PMI.

B. La válvula de admisión se cierra. El proceso es politrópico porque existe intercambio de calor entre las paredes del émbolo y el fluido de trabajo.

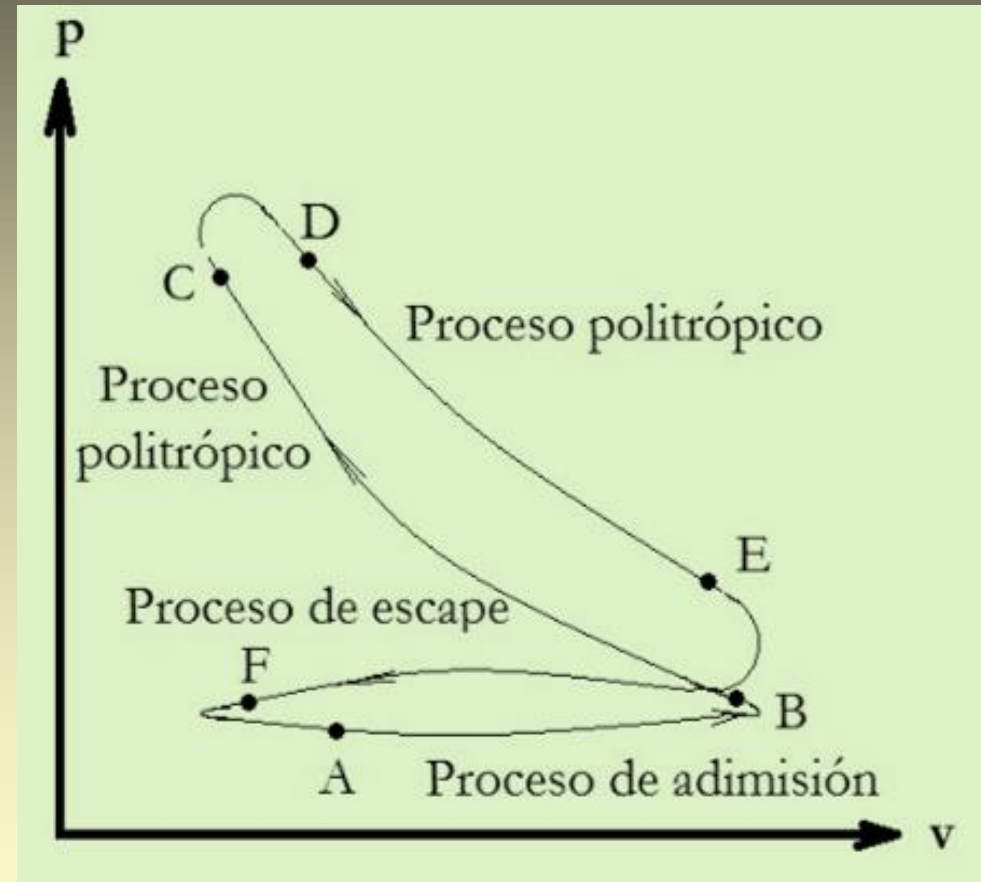
C. La bujía provoca la chispa para encender la mezcla antes de llegar al PMS.



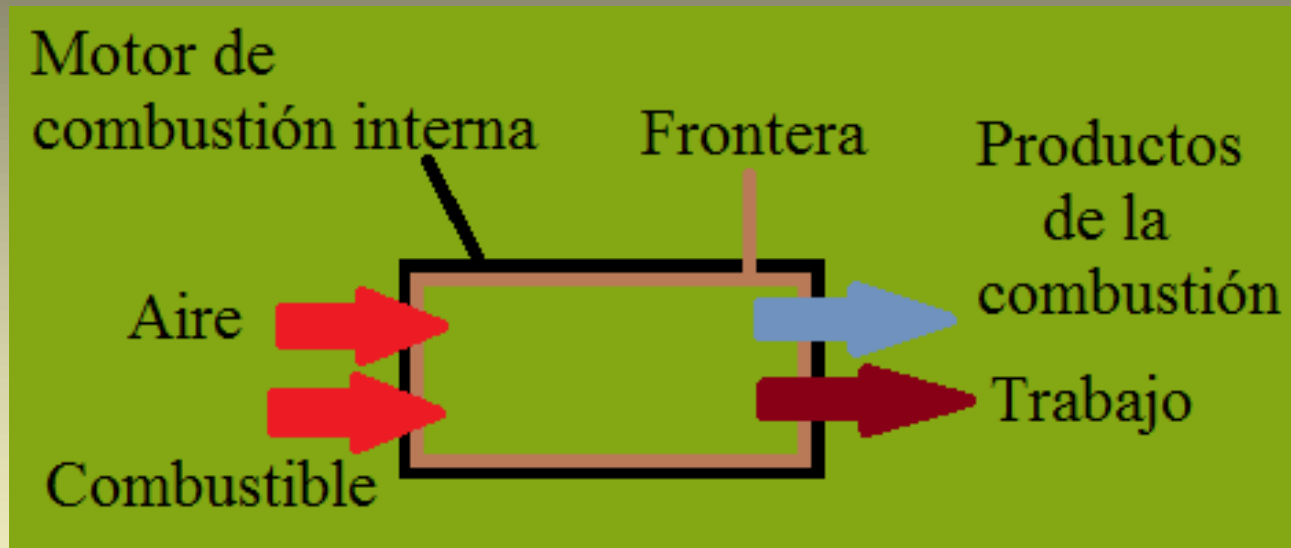
D. Continúa la quema de combustible. La expansión no es adiabática reversible ya que existe intercambio de calor entre los productos de la combustión y las paredes del cilindro.

E. La válvula de escape se abre. Los productos de la combustión son expulsados del cilindro al haber una presión mayor que la atmosférica más las contrapresiones en conductos de salida.

F. La válvula de admisión se abre. Ambas válvulas están abiertas provocando turbulencia.



CICLO OTTO COMO SISTEMA ABIERTO



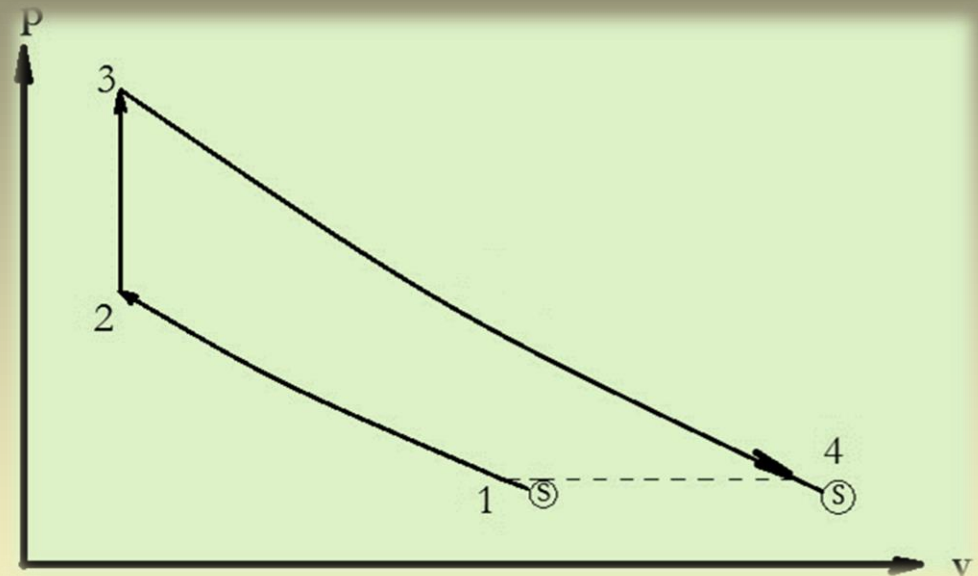
El ciclo de Otto como sistema abierto utiliza aire y combustible.

No puede utilizarse la misma masa de fluido de trabajo puesto que son productos de la combustión.

El sistema es abierto para expulsar los productos de la combustión y admitir una carga fresca.

PROCESOS

- 1 a 2 Compresión a entropía constante hasta llegar al PMS.
- 2 a 3 Suministro de calor a volumen constante.
- 3 a 4 Expansión adiabática. La válvula de escape abre en el estado 4
- Al momento de abrir la válvula de escape se aumenta el volumen compuesto del sistema émbolo cilindro y el conducto de escape conocido como múltiple de escape.



SUMINISTRO DE CALOR

- El proceso de suministro de calor ahora tiene dos fluidos de trabajo: el aire y el combustible. El balance de energía es el siguiente

$$u_2 \cdot \dot{m}_a + u_{pr} \cdot \dot{m}_c = u_3 \cdot (\dot{m}_a + \dot{m}_c)$$

- Donde
- u_2 : energía interna del aire al final de la compresión adiabática, kJ/kg,
- \dot{m}_a : flujo de masa de aire, kg/s,
- u_{pr} : energía interna del combustible, kJ/kg,
- \dot{m}_c : flujo de masa de combustible, kg/s,
- u_3 : energía interna de los productos de la combustión, kJ/kg.

ENERGÍA INTERNA DEL COMBUSTIBLE

- La energía interna del combustible tiene como subíndice las iniciales PR que significa punto de referencia. El combustible es quemado en laboratorio para determinar la energía que genera. Como referencia de la prueba se toman la presión y la temperatura. El valor obtenido es la entalpía al punto de referencia conocida como poder calorífico. La energía interna del combustible se puede obtener de la ecuación

$$u_{pr} = h_{pr} - Pv = h_{pr} - RT = h_{pr} - \frac{\bar{R}}{M} T$$

- Donde \bar{R} es la constante universal de los gases en forma molar y es igual a 8,31447 kJ/(kmol·K), M es la masa molar del combustible.
- Se considera que el combustible se comporta como gas ideal y responde a la ecuación $Pv = RT$. El valor de la energía interna del combustible no difiere mucho del poder calorífico y se llega a considerar que $u_{pr} \cong h_{pr}$.

COMBUSTIBLE

- Puede ser gaseoso o líquido.
- Tiene un poder calorífico inferior y un poder calorífico superior. La diferencia es la fase en que se presenta el agua producto de la combustión.
- Si el agua se encuentra en estado líquido, el poder calorífico es el superior.
- Si el agua se encuentra en fase de vapor, parte de la energía liberada del combustible se utilizó para evaporar el agua y su poder calorífico será inferior al anterior.

Combustible	M	Negativo del poder calorífico superior. H ₂ O (líquido) [kJ/kg]	Negativo del poder calorífico inferior. H ₂ O (vapor) [kJ/kg]
Hidrocarburo líquido			
Metano CH ₄			
Etano C ₂ H ₆			
Propano C ₃ H ₈		-49 977	-45 984
Butano C ₄ H ₁₀		-49 149	-45 363
Pentano C ₅ H ₁₂		-48 637	-44 977
Hexano C ₆ H ₁₄		-48 307	-44 728
Heptano C ₇ H ₁₆		-48 065	-44 551
Octano C ₈ H ₁₈	114,23	-47 886	-44 419
Decano C ₁₀ H ₂₂		-47 637	-44 232
Dodecano C ₁₂ H ₂₆	170,328	-47 465	-44 102
Acetileno C ₂ H ₂			
Benceno C ₆ H ₆		-41 825	-40 137

(Burghardt & Harbach, 1993)

Combustible	M	Negativo del poder calorífico superior. H ₂ O (líquido) [kJ/kg]	Negativo del poder calorífico inferior. H ₂ O (vapor) [kJ/kg]
Hidrocarburo gaseoso			
Metano CH ₄	16,043	-55 491	-50 005
Etano C ₂ H ₆	30,07	-51 870	-47 479
Propano C ₃ H ₈	44,097	-50 346	-46 346
Butano C ₄ H ₁₀	58,124	-49 519	-45 732
Pentano C ₅ H ₁₂		-49 005	-45 346
Hexano C ₆ H ₁₄		-48 674	-45 095
Heptano C ₇ H ₁₆		-48 430	-44 916
Octano C ₈ H ₁₈	114,23	-48 249	-44 781
Decano C ₁₀ H ₂₂		-47 995	-44 593
Dodecano C ₁₂ H ₂₆	170,328	-47 823	-44 460
Acetileno C ₂ H ₂	26,038	-49 907	-48 219
Benceno C ₆ H ₆	78,108	-42 260	-40 572
Hidrógeno H ₂		-141 856	-120 012

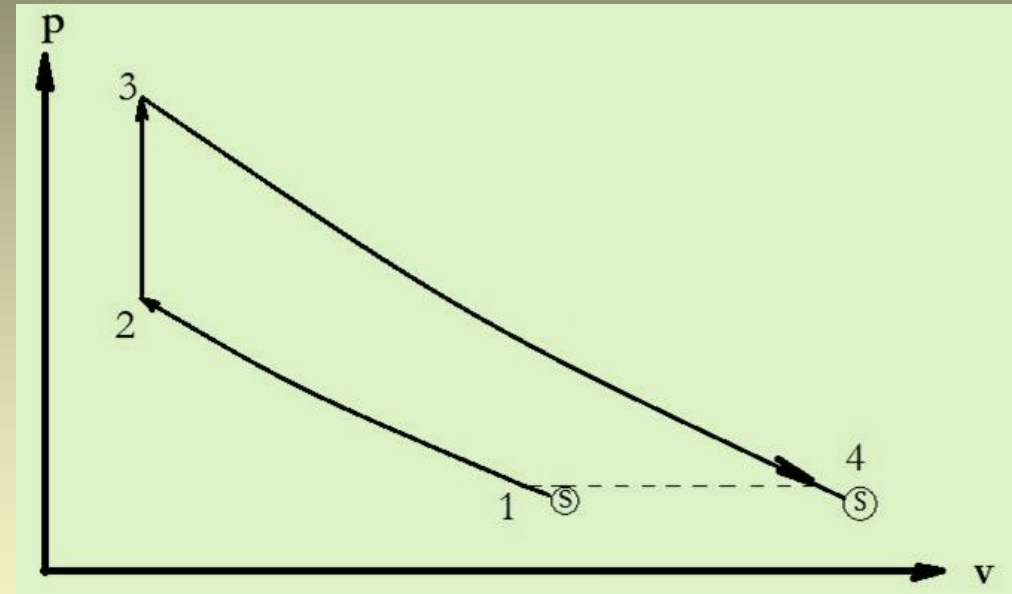
(Burghardt & Harbach, 1993)

EJEMPLO

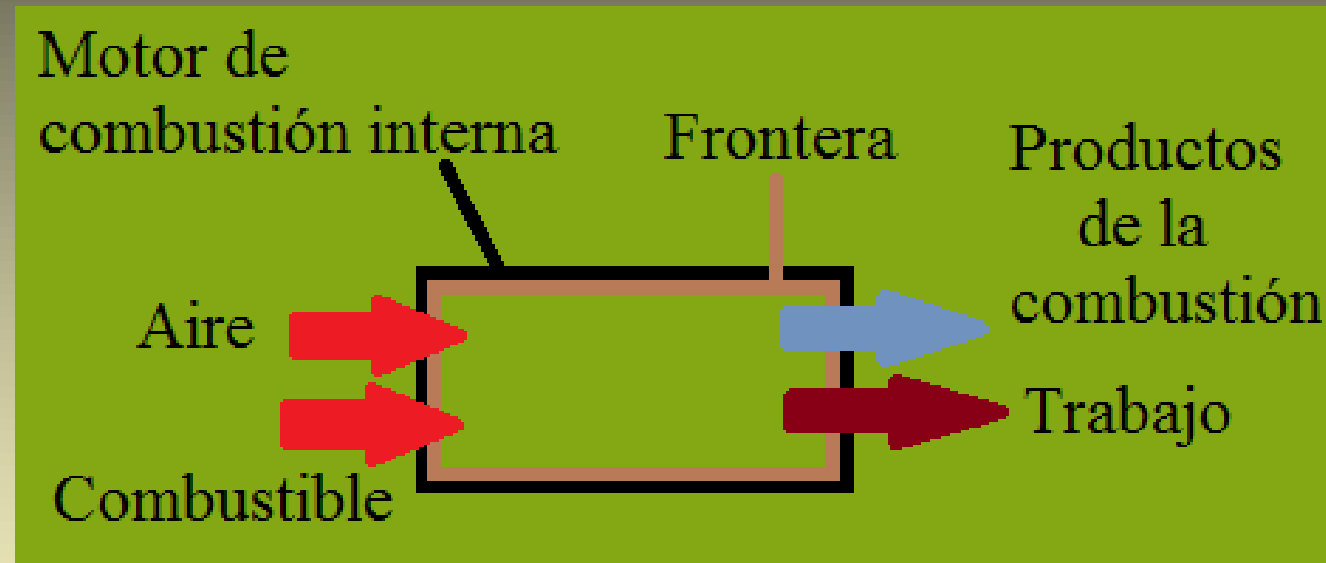
- Un motor que funciona con base en el ciclo de Otto tiene una relación de compresión de 10. La relación de aire combustible es 30:1. El combustible es octano líquido y el punto de referencia es a 25°C y 101,325 kPa. El aire entra al motor a 27° C y 100 kPa. Determinar los flujos de combustible y de aire, en kg/s, por cada cilindro si el motor es de cuatro tiempos, genera una potencia de 90 kW y cuenta con cuatro cilindros.
- Suposiciones: Aire y combustible como fluido de trabajo, sustancia homogénea (pura) y simple compresible. El sistema es abierto y el ciclo reversible. Se desprecian cambios de energías cinética y potencial. Los calores específicos se consideran variables con respecto a la temperatura.

DATOS

- $p_1 = 100 \text{ kPa}$
- $T_1 = 27^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$
- $r_v = v_1 / v_2 = 10$
- $r_{a/c} = 30$
- Combustible octano líquido con $T_{pr} = 25^\circ\text{C}$ y $p_{pr} = 101,325 \text{ kPa}$.



SOLUCIÓN



Del balance de energía, se tiene

$$h_1 \cdot \dot{m}_a + u_{pr} \cdot \dot{m}_c = h_4 \cdot (\dot{m}_a + \dot{m}_c) + \dot{w}_{neta}$$

- De la tabla de aire a bajas presiones, a una temperatura de 300 K, se obtiene que $h_1=300,19$ kJ/kg; $v_{r_1}=144,32$, $u_1=214,09$ kJ/kg .

- Como la relación de compresión es de 10

$$v_{r_2} = v_{r_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right) = v_{r_1} \cdot \left(\frac{1}{r_v}\right) = 144,32 \left(\frac{1}{10}\right) = 14,432$$

- Nuevamente de la tabla de aire a bajas presiones, a un volumen reducido de 14,432 se tiene que

v_r	u [kJ/kg]
14,434	536,12
14,432	
13,900	544,05

Propiedades de aire a bajas presiones (Burghardt & Harbach, 1993).

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>p_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	ϕ kJ/(kg · K)
620	628,07	18,360	450,13	22,52	3,2569
630	638,65	19,475	457,83	21,57	3,2738
640	649,21	20,64	465,55	20,674	3,2905
650	659,84	21,86	473,32	19,828	3,3069
660	670,47	23,13	481,06	19,026	3,3232
670	681,15	24,46	488,88	18,266	3,3392
680	691,82	25,85	496,65	17,543	3,3551
690	702,52	27,29	504,51	16,857	3,3707
700	713,27	28,80	512,37	16,205	3,3861
710	724,01	30,38	520,26	15,585	3,4014
720	734,20	31,92	527,72	15,027	3,4156
730	745,62	33,72	536,12	14,434	3,4314
740	756,44	35,50	544,05	13,900	3,4461

- Realizando la interpolación

$$u_2 = \left(\frac{14,432 - 14,434}{13,900 - 14,434} \right) \cdot (544,05 - 536,12) + 536,12 = 536,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Dividiendo la ecuación $u_2 \cdot \dot{m}_a + u_{pr} \cdot \dot{m}_c = u_3 \cdot (\dot{m}_a + \dot{m}_c)$ entre la masa de aire se tiene

$$u_2 + u_{pr} \cdot \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} = u_3 \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} \right)$$

$$u_2 + u_{pr} \cdot r_{c/a} = u_3 \cdot (1 + r_{c/a})$$

- La relación de combustible aire, $r_{c/a}$, es igual a la masa del combustible entre la masa del aire. La relación aire combustible, $r_{a/c}$, es la masa de aire entre la masa del combustible. Esta relación también puede darse para flujos de masa.

- De la Tabla de combustibles, la entalpía para el octano líquido es 47886 kJ/kg y la masa molar es 114,23 kg/kgmol. La constante universal de los gases es igual a $\bar{R} = 8,31447 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}\cdot\text{K}}$. Sustituyendo los valores en la ecuación se tiene

$$u_{pr} = h_{pr} - \frac{\bar{R}}{M} T_{pr} = 47886 - \frac{8,31447}{114,23} \cdot (298,15) = 47864,2985 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- La diferencia de valores entre u_{pr} y h_{pr} es de 21,7015 kJ/kg, un 0,045% de error si se considera $u_{pr} = h_{pr}$. Despejando la energía interna en el estado 3 y sustituyendo los valores conocidos

$$u_3 = \frac{u_2 + u_{pr} \cdot r_{c/a}}{(1 + r_{c/a})} = \frac{536,15 + 47864,2985 \cdot (1/30)}{(1 + 1/30)} = 2062,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- La combustión obedece a la siguiente ecuación química



- Para que un hidrocarburo C_xH_y se queme necesita oxígeno O_2 . El aire está compuesto principalmente por oxígeno O_2 y nitrógeno N_2 (Se tienen 3,76 moles de nitrógeno por cada mol de oxígeno) y se utiliza en el proceso de combustión.
- Para oxidar los reactivos debe haber el suficiente oxígeno presente en el aire. Generalmente se introduce un exceso de aire (exceso de oxígeno) asegurando la oxidación de las moléculas del hidrocarburo. El exceso de aire se da en porcentaje. Para motores de combustión interna es común utilizar tablas de productos de la combustión con 200% de exceso de aire ya que tampoco es recomendable saturar de aire la mezcla aire combustible.

- Con el valor de la entalpía en el estado 3, valor al final del suministro de energía térmica, se buscan los parámetros adecuados en la tabla de productos de la combustión con 200% de exceso de aire.

u [kJ/kg]	h [kJ/kg]	p _r
1899,9	2503,2	3700
2006,0	2638	4603
2062,864		

$$h_3 = \left(\frac{2062,864 - 1899,9}{2006,0 - 1899,9} \right) \cdot (2638 - 2503,2) + 2503,2 = 2710,2457 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p_{r_3} = \left(\frac{2062,864 - 1899,9}{2006,0 - 1899,9} \right) \cdot (4603 - 3700) + 3700 = 5086,96$$

Productos de combustión a Bajas Presiones -200 % de aire teórico.(Burghardt & Harbach, 1993).

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>p_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	ϕ kJ/(kg · K)
1400	1582,9	580,0	1180,7	46,62	8,4436
1450	1646,9	678,1	1230,4	41,30	8,4886
1500	1711,2	789,4	1280,3	36,71	8,5322
1550	1775,8	914,9	1330,6	32,72	8,5746
1600	1840,7	1056,2	1381,1	29,26	8,6159
1650	1906,0	1214,6	1432,0	26,24	8,6560
1700	1971,4	1391,7	1483,1	23,596	8,6951
1750	2037,2	1589,2	1534,5	21,274	8,7333
1800	2103,1	1808,7	1586,0	19,225	8,7704
1850	2169,3	2052,2	1637,8	17,415	8,8068
1900	2235,7	2321,4	1689,9	15,812	8,8422
1950	2302,3	2618	1742,1	14,385	8,8768
2000	2369,0	2946	1794,5	13,114	8,9106
2100	2503,2	3700	1899,9	10,966	8,9760
2200	2638,0	4603	2006,0	9,234	9,0388

- La presión reducida en 4 se puede obtener de la ecuación $p_{r_4} = p_{r_3} \cdot \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\gamma}$, donde la presión en 4 es igual a la presión en 1 ($p_1 = 100$ kPa) por ser el sistema abierto. La presión en el estado 3 se obtiene de la siguiente ecuación

$$p_3 = \frac{h_3 - u_3}{v_3}$$

- Ya se tienen los valores de la entalpía y la energía interna, sólo falta obtener el volumen en el estado 3. Para obtener el volumen se necesita otro volumen que se pueda relacionar. En este caso, conociendo la entalpía, la energía interna y la presión en el estado 1, se puede calcular el volumen.

$$v_1 = \frac{h_1 - u_1}{p_1} = \frac{300,19 - 214,09}{100} = 0,861 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

- Con el volumen del estado 1 conocido se obtiene el volumen en el estado 2 con la siguiente relación

$$v_2 = \frac{v_1}{r_v} = \frac{0,861}{10} = 0,0861 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

- Para obtener el volumen en el estado 3 se tiene que aclarar una diferencia. El proceso de 2 a 3 es a volumen constante, esto es $V_3 = V_2$, pero $v_3 \neq v_2$. De aquí que

$$v_3 = \frac{V_3}{m_a + m_c} \neq v_2 = \frac{V_2}{m_a}$$

- Los volúmenes extensivos son los mismos pero los intensivos dependen de la masa que contenga dicho volumen. En el estado 2 sólo hay aire y, en el estado 3, hay aire y combustible. Por lo tanto

$$V_3 = v_3(m_a + m_c) = V_2 = v_2(m_a)$$

$$v_3 = \frac{v_2(m_a)}{(m_a + m_c)} = \frac{v_2}{(1 + r_{c/a})} = \frac{0,0861}{(1 + 30^{-1})} = 0,0833 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

- Finalmente la presión en el estado 3 es

$$p_3 = \frac{h_3 - u_3}{v_3} = \frac{2710,2457 - 2062,864}{0,0833} = 7769,583 \text{ kPa}$$

- La presión reducida en 4 se calcula con la ecuación antes mencionada

$$p_{r_4} = p_{r_3} \cdot \left(\frac{p_4}{p_3}\right) = 5086,96 \cdot \left(\frac{100}{7769,583}\right) = 65,4727$$

- De la tabla de productos de la combustión con 200 % de exceso de aire se obtiene la entalpía

p_r	h [kJ/kg]
59,83	872,5
65,4727	
65,97	895,8

$$h_4 = \left(\frac{65,4727 - 59,83}{65,97 - 59,83} \right) \cdot (895,8 - 872,5) + 872,5 = 893,913 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

- Despejando el trabajo del balance de energía para el sistema abierto y sustituyendo los valores obtenidos, se tiene

$$W_{neto} = h_1 \cdot m_a + u_{pr} \cdot m_c - h_4 \cdot (m_a + m_c)$$

Productos de combustión a Bajas Presiones -200 % de aire teórico.(Burghardt & Harbach, 1993).

<i>T</i> K	<i>h</i> kJ/kg	<i>p_r</i>	<i>u</i> kJ/kg	<i>v_r</i>	<i>ϕ</i> kJ/(kg · K)
640	668,1	22,48	484,3	549,8	7,5099
660	690,4	25,33	500,8	503,3	7,5442
680	712,8	28,46	517,4	461,6	7,5776
700	735,2	31,87	534,2	424,2	7,6101
720	757,8	35,62	551,0	390,5	7,6420
740	780,5	39,68	568,0	360,2	7,6731
760	803,4	44,12	585,1	332,8	7,7034
780	826,3	48,94	602,3	307,9	7,7334
800	849,4	54,17	619,6	285,3	7,7625
820	872,5	59,83	637,0	264,7	7,7911
840	895,8	65,97	654,5	246,0	7,8192
860	919,1	72,60	672,1	228,8	7,8467
880	942,6	79,95	689,8	213,2	7,8736

$$w_{neto} = \frac{W_{neto}}{m_a} = h_1 \cdot 1 + u_{pr} \cdot r_{c/a} - h_4 \cdot (1 + r_{c/a})$$

$$w_{neto} = 300,19 + 47864,2985 \cdot 30^{-1} - 893,913 \cdot (1 + 30^{-1}) = 971,9565 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{aire}}$$

- Las unidades del trabajo neto específico están en función de la masa de aire ya que se dividió la ecuación entre dicha masa. Con esto en mente se tiene que $w_{neto} \cdot \dot{m}_a = \dot{w}_{neta}$. Por tanto $\dot{m}_a = \frac{\dot{w}_{neta}}{w_{neto}} = \frac{90/4}{971,9565} = 0,02315 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
- La potencia de 90 kW se divide entre cuatro ya que el motor cuenta con cuatro cilindros. El flujo de masa del combustible es

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{m}_a}{r_{a/c}} = \frac{0,02315}{30} = 7,7164 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

BIBLIOGRAFÍA

- Barros, J. F. (28 de Febrero de 2012). *Motores a Pistão*. Obtenido de Aeronaves & Manutenção:- Loja Virtual : <http://aeronaves2014.blogspot.mx/p/motores-pistao.html>
- Burghardt, M. D., & Harbach, J. A. (1993). *Engineering Thermodynamics*. New York: HarperCollins College Publishers.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2008). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Soriano, J. A. (1999). *Termodinámica lógica y motores térmicos*. Madrid: Editorial ciencia 3, S. L