



UC | Chile

Termodinámica (FIS1523)

Ciclo de Otto

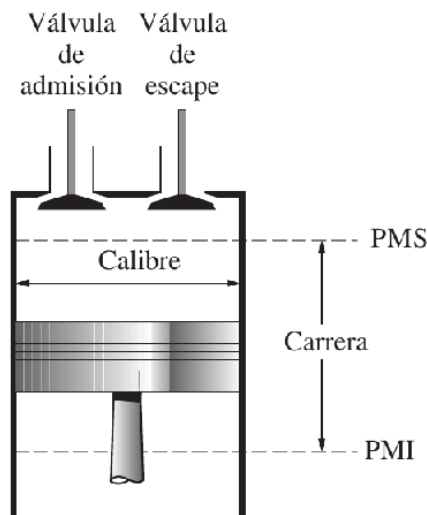
Felipe Isaule

felipe.isaule@uc.cl

Miércoles 18 de Junio de 2025

Resumen clase anterior

- Definimos los **ciclos de potencia de gas**.
- Definimos las **máquinas reciprocantes** y la **relación de compresión**.



$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_{\text{PMI}}}{V_{\text{PMS}}}.$$

- Enunciamos las **suposiciones de aire estandar**.

Clase 27: Ciclo de Otto

- Combustión por chispa y ciclo de Otto.
- Ciclo de Otto ideal.

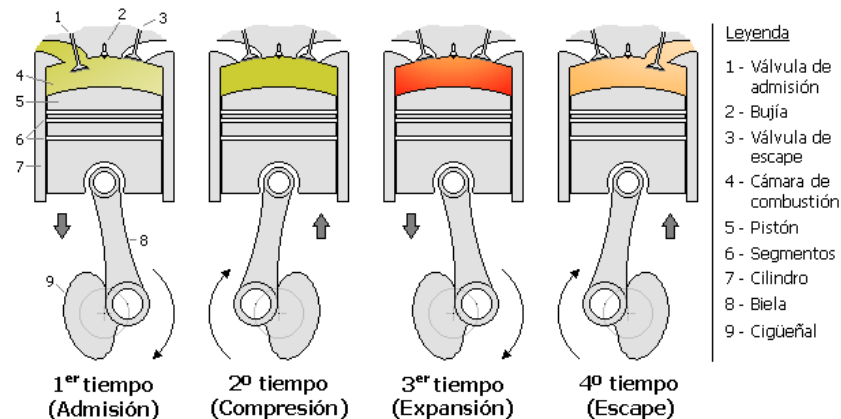
- Bibliografía recomendada:
 - Cengel (9-5).

Clase 27: Ciclo de Otto

- **Combustión por chispa y ciclo de Otto.**
- Ciclo de Otto ideal.

Motores de encendido por chispa

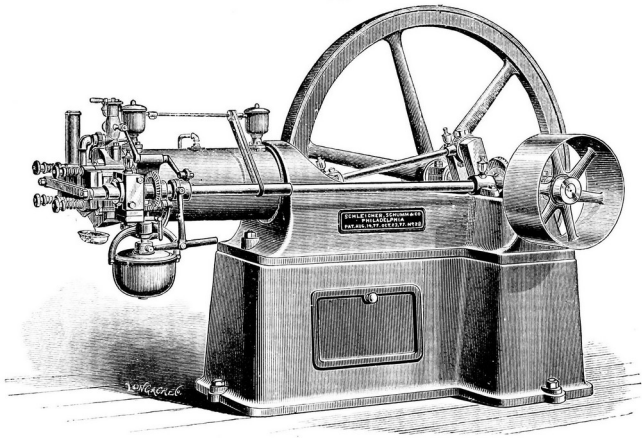
- Los **motores de encendido por chispa (ECH)** son aquellos donde la **combustión aire-combustible** se inicia con una **chispa** en la bujía.
- **Usualmente utilizan gasolina como combustible.** Sin embargo, también se utilizan otros combustibles como etanol, hidrógeno, entre otros.
- La mayoría de ECH son motores de **cuatro tiempos**.
 - Se realizan **cuatro carreras del pistón/émbolo** para **completar el ciclo**.



Bujía

Ciclo de Otto

- El ciclo de Otto es el ciclo de las máquinas reciprocantes de encendido por chispa.
- El primer motor de cuatro tiempos de encendido por chispa fue construido por Nikolaus A. Otto en 1876.
- Sin embargo, se basó en un motor de cuatro tiempos patentado por Beau de Rochas en 1862.



A. Beau de Rochas (1815 – 1893)



N. Otto (1832 – 1891)

Ciclo de Otto

1. Carrera de compresión:

La mezcla aire combustible es comprimida desde PMI a PMS. Se produce la chispa antes de llegar al PMS.

2. Carrera de expansión:

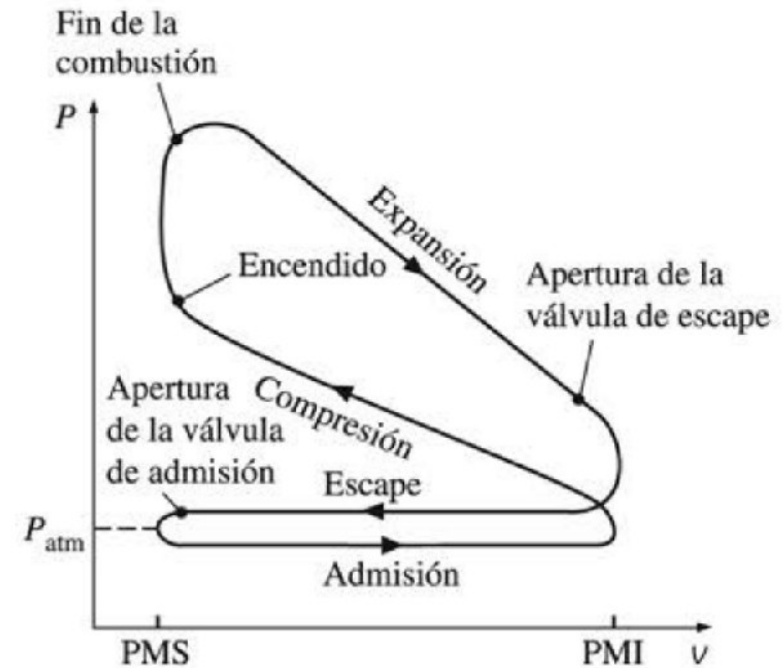
Se produce una expansión debido a la combustión. El cilindro se llena de productos de combustión.

3. Carrera de escape:

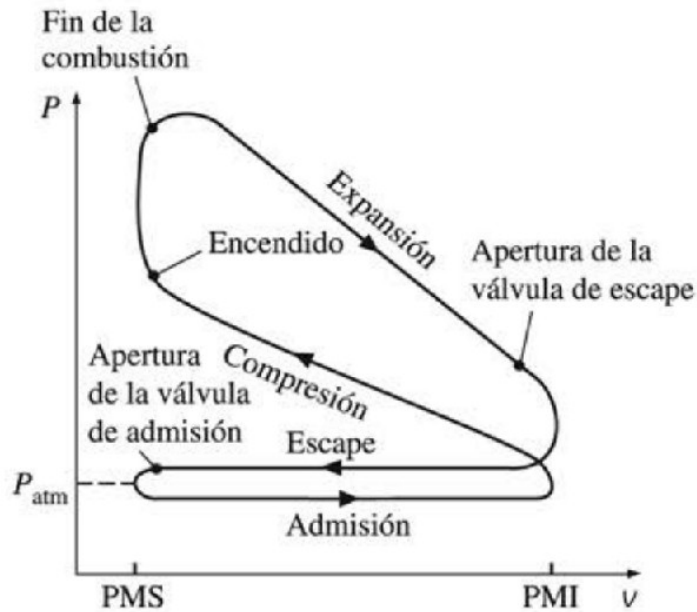
Se abre la válvula de escape para expulsar los productos de combustión.

4. Carrera de admisión:

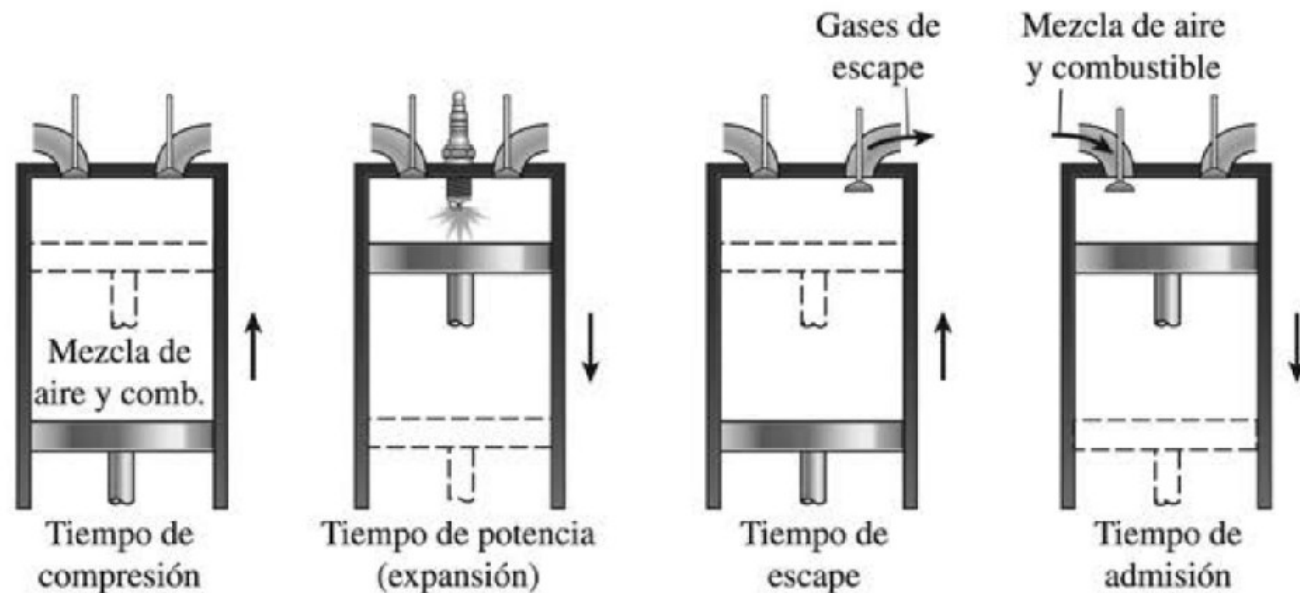
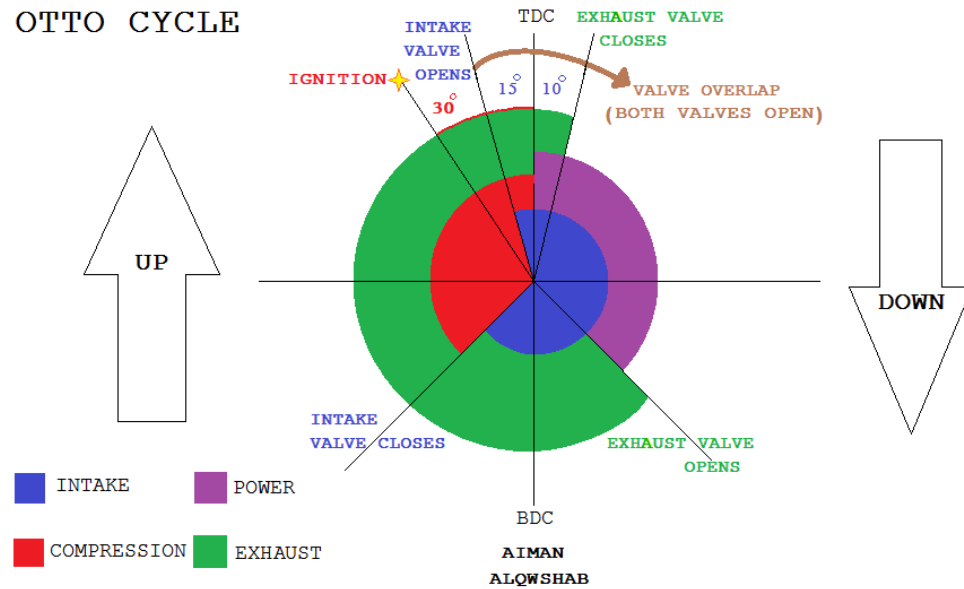
Se abre la válvula de admisión y el cilindro se llena con una nueva mezcla aire combustible.



Ciclo de Otto

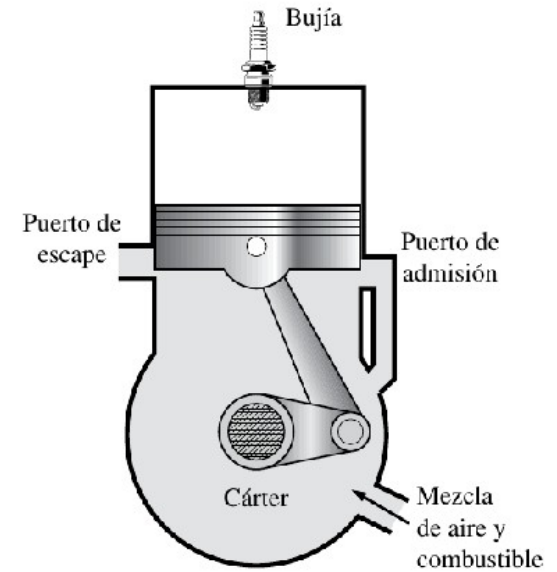


OTTO CYCLE



Motores de dos tiempos

- También existen los motores de **combustión por chispa de dos tiempos**.
- Suelen ser **menos eficientes** que las de cuatro tiempos.
- Sin embargo, son más **económicos** y sencillos, siendo **útiles** para **dispositivos pequeños**.
 - Motos, sierras, etc.



Clase 27: Ciclo de Otto

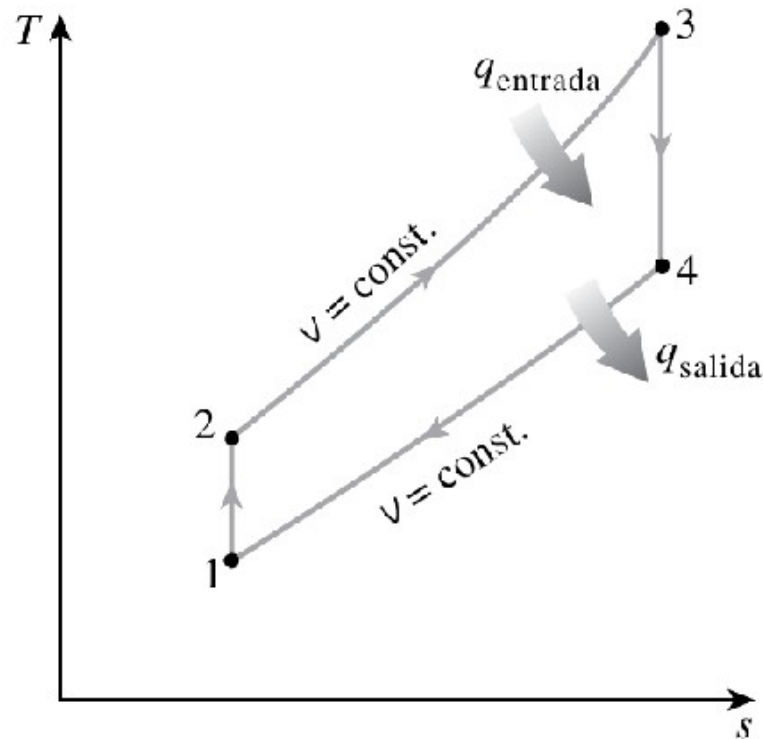
- Combustión por chispa y ciclo de Otto.
- **Ciclo de Otto ideal.**

Ciclo de Otto ideal

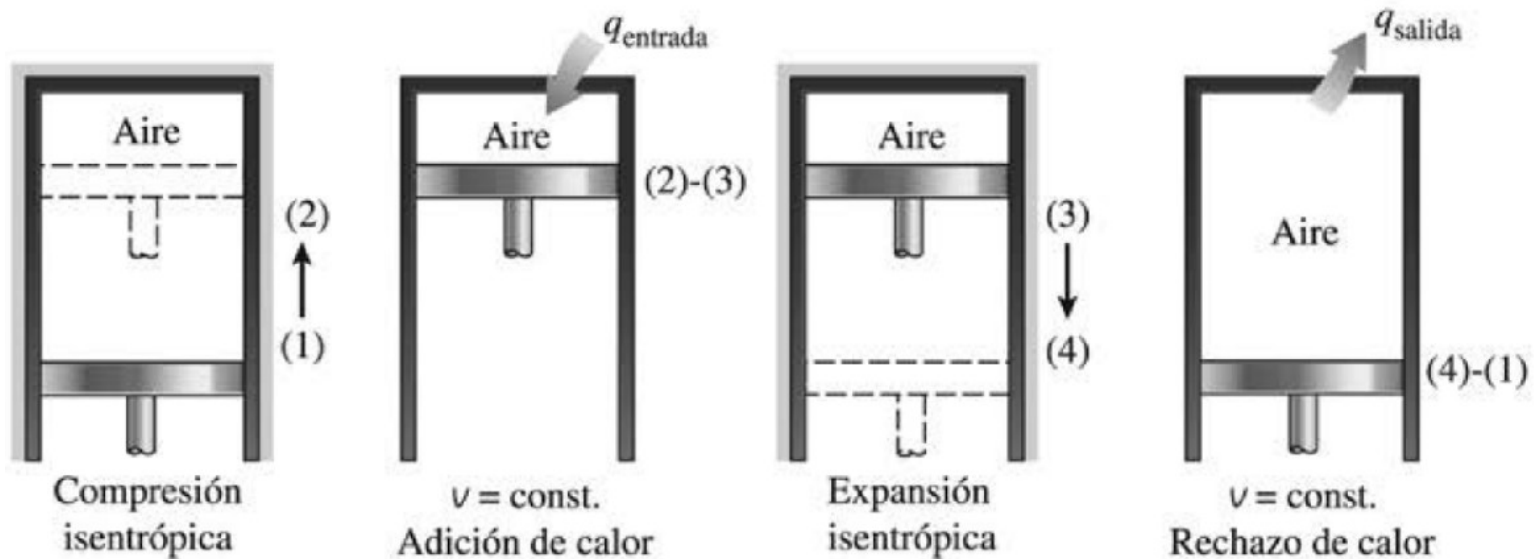
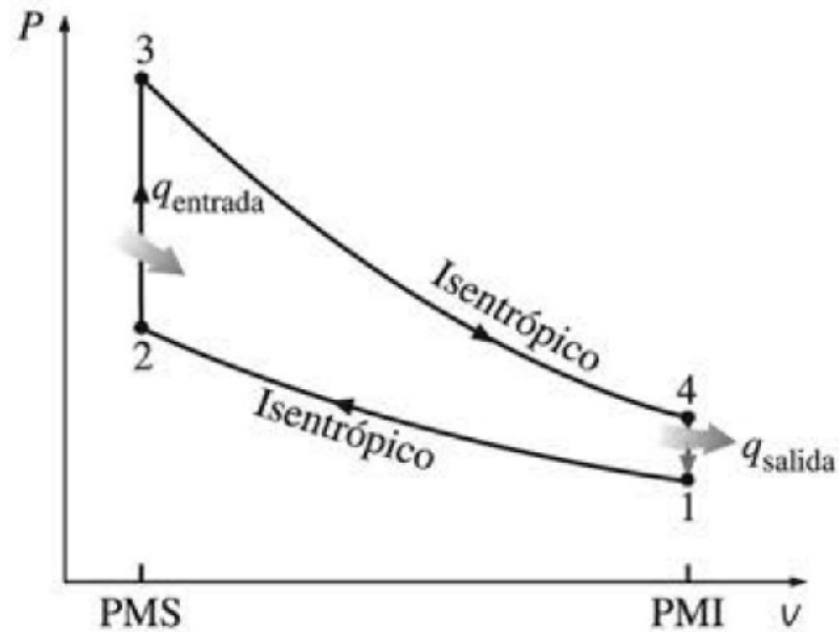
- El **análisis** de los **ciclos reales** de **cuatro y dos tiempos** es una **tarea complicada**.
- Podemos **simplificar el problema** al utilizar las **suposiciones de aire estandar**.
- Con esto podemos definir el **ciclo de Otto ideal**, el que se compone de **cuatro procesos internamente reversibles** en un **sistema cerrado**.

Ciclo de Otto ideal

- 1-2: Compresión isentrópica.
- 2-3: Adición de calor a volumen constante.
- 3-4: Expansión isentrópica.
- 4-1: Rechazo de calor a volumen constante.

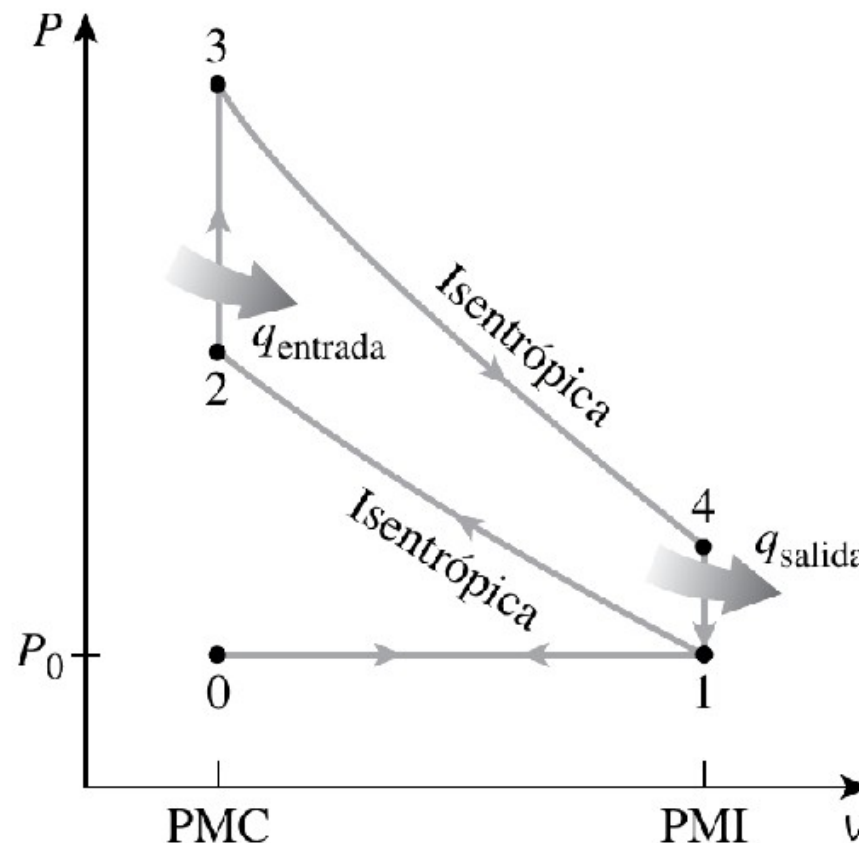


Ciclo de Otto ideal



Ciclo de Otto ideal

- El **ciclo** de Otto ideal **recién mostrado** es un ciclo de **dos** **tiempos**.
- Un **ciclo** de **cuatro tiempos ideal** se puede diseñar **añadiendo** procesos 0-1 y 1-0 a **presión constante**.



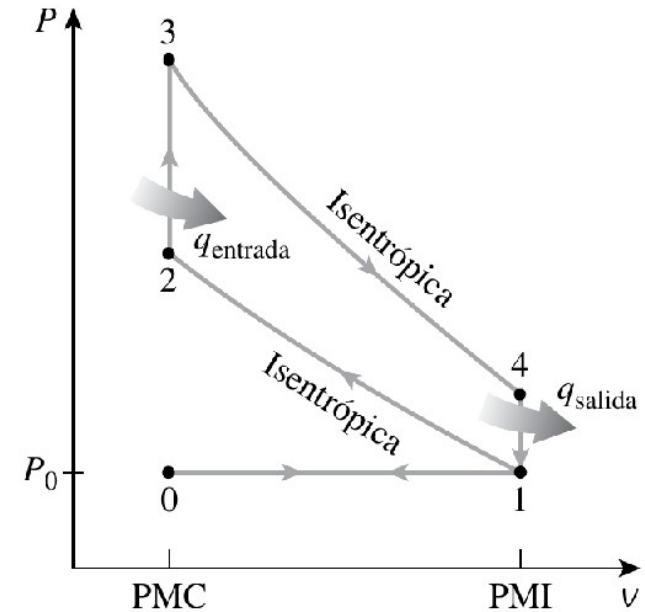
Ciclo de Otto ideal

- Los **dos procesos adicionales** se ejecutan en un **sistema abierto**.
- El **trabajo** de estos dos procesos:

$$W_{\text{salida},0 \rightarrow 1} = P_0(V_1 - V_0),$$

$$W_{\text{entrada},1 \rightarrow 0} = P_0(V_1 - V_0).$$

- **Estos dos trabajos se cancelan**, por lo que estos procesos **no aportan al ciclo**.
- Es decir, **siempre podemos simplemente trabajar con el ciclo de Otto ideal de dos tiempos** en un **sistema cerrado**, incluso para intentar aproximar uno real de cuatro tiempos.



Eficiencia del ciclo de Otto ideal

- El **balance de energía** en cada **proceso** del ciclo de Otto ideal:

$$(q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}}) + (w_{\text{entrada}} - w_{\text{salida}}) = \Delta u.$$

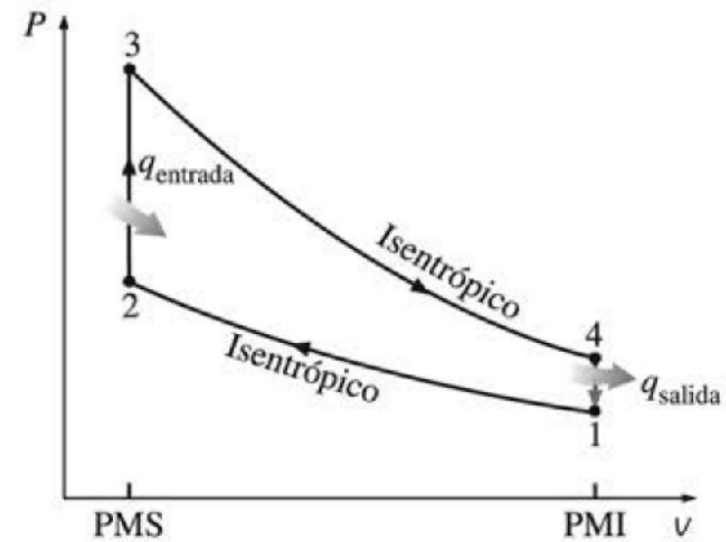
- En los **procesos de transferencia de calor** el **volumen es constante**, por tanto:

$$q_{\text{entrada}} = c_V(T_3 - T_2),$$

$$q_{\text{salida}} = c_V(T_4 - T_1).$$

- La **eficiencia**:

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}.$$



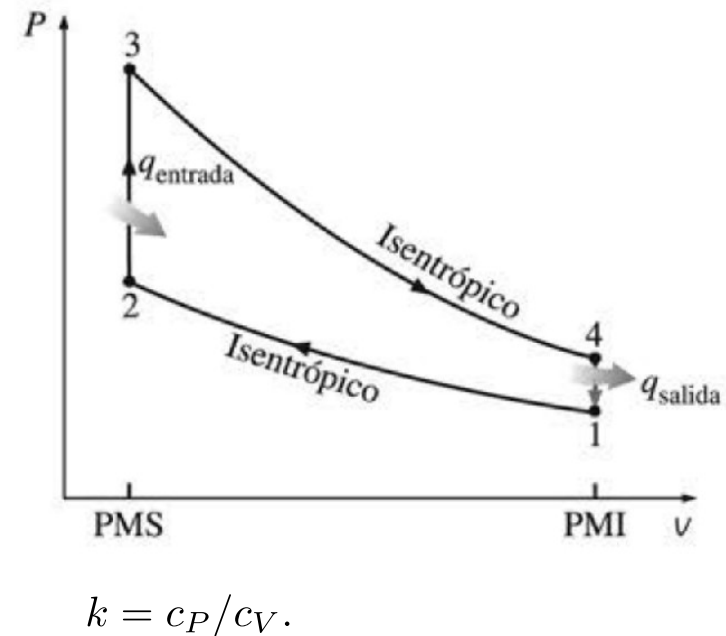
Eficiencia del ciclo de Otto ideal

- Ahora podemos utilizar que los **procesos 1-2 y 3-4** son **isentrópicos**.
- De la **primera relación isentrópica de gases ideales**:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1}, \quad \left(\frac{T_4}{T_3}\right) = \left(\frac{\nu_3}{\nu_4}\right)^{k-1}.$$

- Ahora utilizando que $V_2=V_3$ y $V_4=V_1$:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right) = \left(\frac{\nu_4}{\nu_3}\right)^{k-1} \longrightarrow \left(\frac{T_4}{T_1}\right) = \left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$



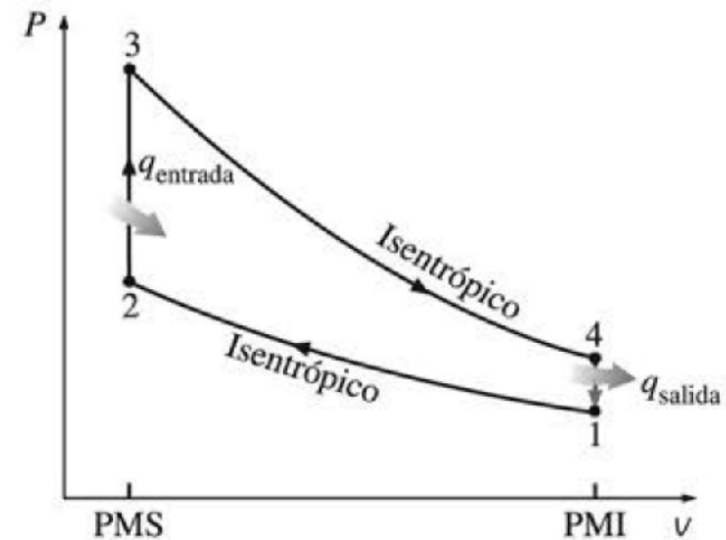
Eficiencia del ciclo de Otto ideal

- Volviendo a la **eficiencia**:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Otto}} &= 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} && \left(\frac{T_4}{T_1}\right) = \left(\frac{T_3}{T_2}\right) \\ &= 1 - \frac{T_1}{T_2} && \left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1} \\ &= 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-k} && r = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{V_1}{V_2}\end{aligned}$$

$$\longrightarrow \boxed{\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}},$$

donde r es el **factor de compresión**.

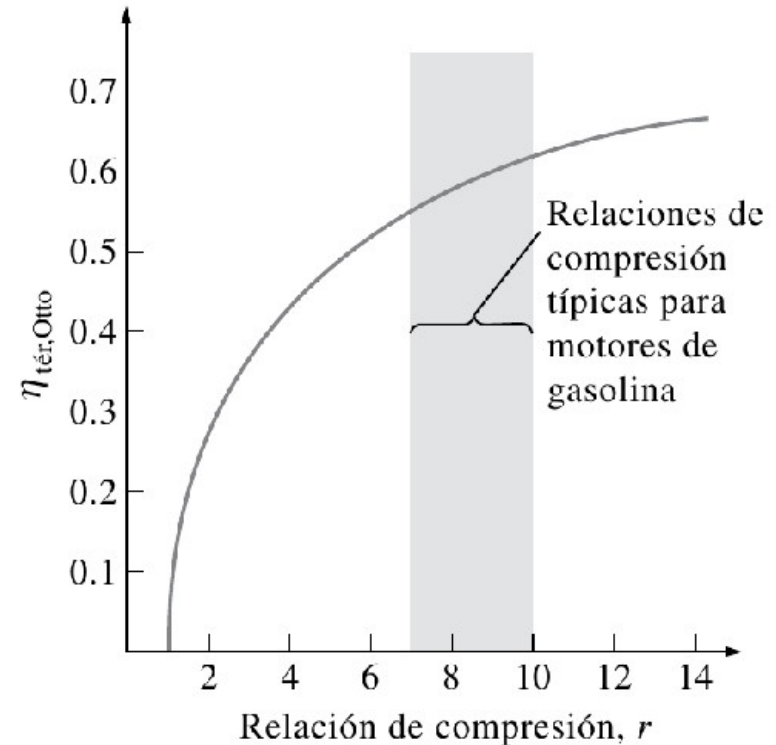


Eficiencia del ciclo de Otto ideal

- La **eficiencia** de un **ciclo de Otto** depende del **factor de compresión**.

$$\eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}.$$

- La **eficiencia** es **mayor** a **mayor** **factor de compresión**.
- Esto **sugiere** que es **preferible** **aumentar** r en un **motor real**.

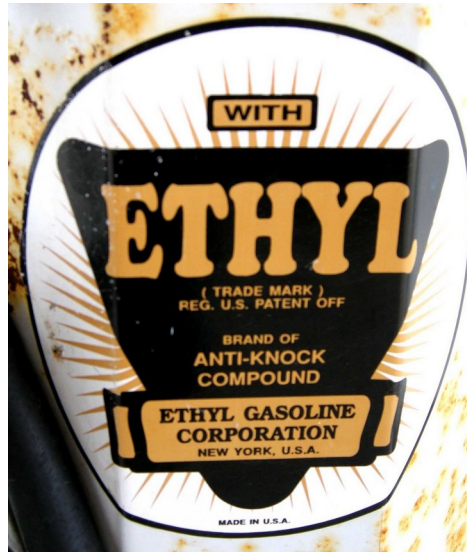


Autoencendido y golpeteo del motor

- En **motores** con un **factor de compresión** muy grande el **combustible** se puede **autoencender**:
 - **Golpeteo del motor** o cascabeleo.
- El **autoencendido** puede **disminuir el desempeño** y **dañar la máquina**.
- Los fabricantes utilizan **antidetonantes** para **prevenir el autoencendido**.
- La **reducción del autoencendido** (golpeteo) es **medido** por el **octanaje** del combustible.
- Con **mayor octanaje** se pueden **utilizar factores de compresión mayores**, **aumentando la eficiencia** del motor.

Autoencendido y golpeteo del motor

- Antiguamente (desde ~1920) se aumentaba el octanaje añadiendo **tetraetilo de Plomo** al combustible.



- Sin embargo, este compuesto es **muy contaminante y dañino para la salud**.
- Gracias a **avances** en los antidetonantes **se logró remplazar el plomo** hace varias décadas.

Autoencendido y golpeteo del motor

- La gasolina con plomo se prohibió en Chile en 2003.
- Se dejó de utilizar en todo el mundo en 2021.



Air pollution

● This article is more than 3 years old

Leaded petrol era 'officially over' as Algeria ends pump sales

UN announcement marks 'huge milestone for global health and our environment'

Helena Horton

Mon 30 Aug 2021 15:06 BST

Share



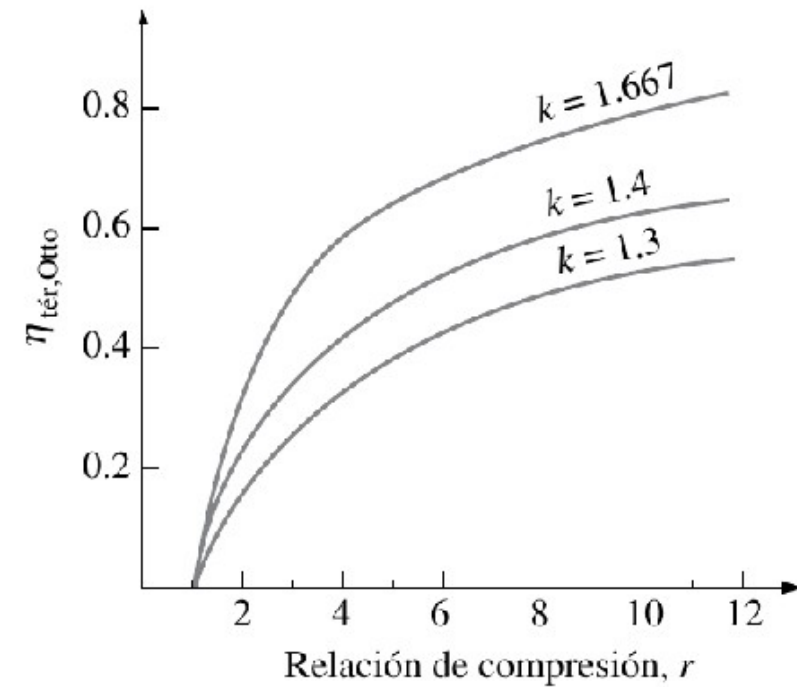
📷 Pump nozzles at a petrol station in Algiers, Algeria. Officials claim that the end of use of leaded petrol will prevent more than 1.2 million premature deaths a year. Photograph: Ramzi Boudina/Reuters

Eficiencia del ciclo de Otto ideal

- La **eficiencia** de un **ciclo de Otto** también **depende** de la relación entre los **calores específicos**.

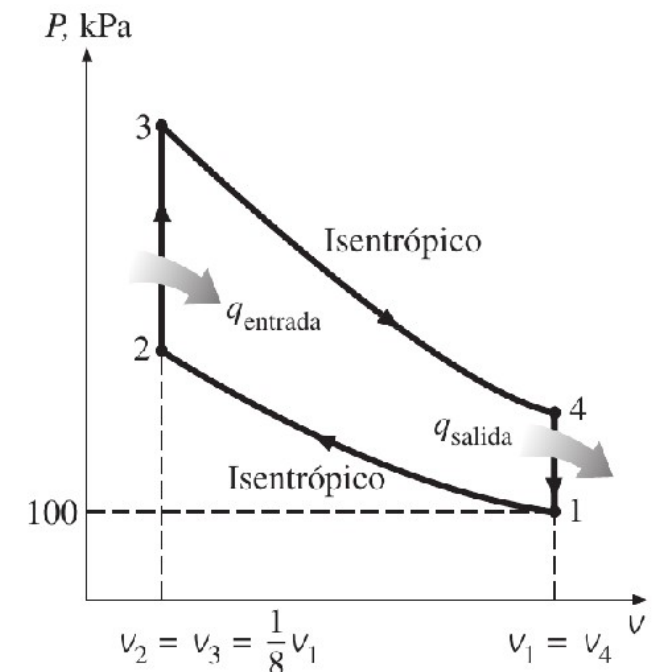
$$k = \frac{c_P}{c_V} \quad \eta_{\text{Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}.$$

- Este valor **depende** del **fluido de trabajo**.



Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **temperatura y presión máximas** que ocurren durante el ciclo.
 - La **salida de trabajo neto**.
 - La **eficiencia térmica**.
 - La **presión media efectiva** en el ciclo.



Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **temperatura y presión máximas** que ocurren durante el ciclo.

Buscamos T_3 y P_3 . De los datos del estado 1, buscaremos los del estado 2, y luego los del estado 3.

De tablas (aire gas ideal) para $T_1=17^\circ\text{C}$ tenemos que:

$$u_1 = 206.91 \text{ kJ/kg} \quad \nu_{1,r} = 676.1$$

Ahora utilizamos que el proceso 1-2 es isentrópico:

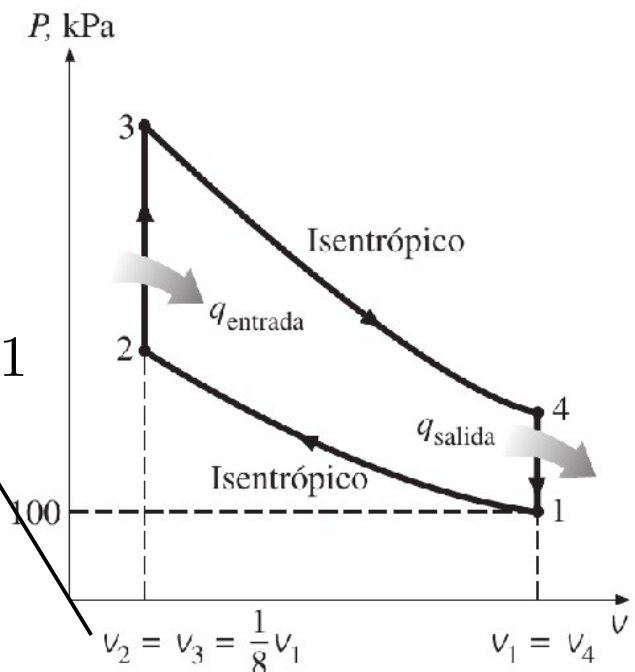
$$\frac{\nu_{2,r}}{\nu_{1,r}} = \frac{\nu_2}{\nu_1} = r^{-1} \quad \longrightarrow \quad \nu_{2,r} = \frac{\nu_{1,r}}{r} = \frac{676.1}{8} = 84.51$$

Utilizando este dato, de tabla ahora podemos encontrar que:

$$T_2 = 652.4^\circ\text{K} \quad u_2 = 475.11 \text{ kJ/kg}$$

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	ν_r	s° kJ/kg · K
----------	--------------	-------	--------------	---------	------------------------



Ejemplo:

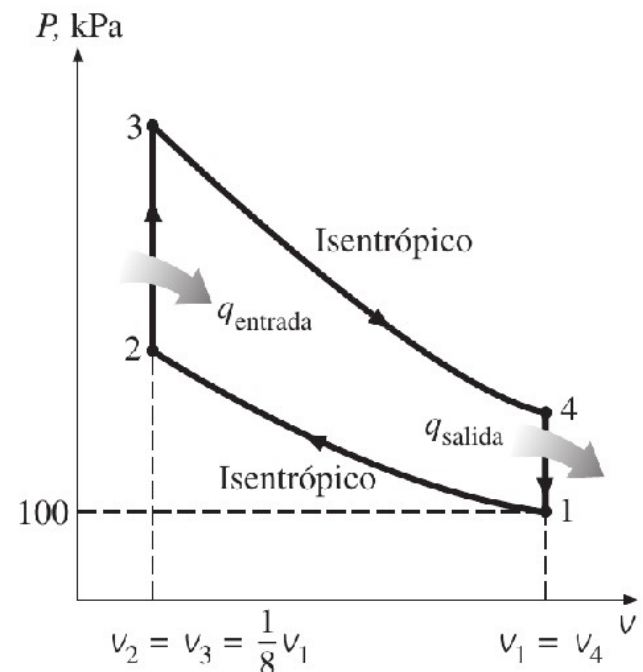
- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **temperatura y presión máximas** que ocurren durante el ciclo.

Para encontrar la presión utilizamos que:

$$\frac{P_2 \nu_2}{T_2} = \frac{P_1 \nu_1}{T_1} \quad \longrightarrow \quad P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{\nu_1}{\nu_2} \quad \swarrow \quad r = \frac{\nu_1}{\nu_2} = 8$$
$$= 100 \text{ kPa} \frac{652.4}{273 + 17} 8$$
$$= 1799.7 \text{ kPa}$$

Ahora resolvemos el proceso 2-3. Por conservación de la energía:

$$q_{\text{entrada}} = u_3 - u_2 \quad \longrightarrow \quad u_3 = q_{\text{entrada}} + u_2$$
$$= (800 + 475.11) \text{ kJ/kg}$$
$$= 1275.11 \text{ kJ/kg}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **temperatura y presión máximas** que ocurren durante el ciclo.

Ahora que conocemos u_3 , de tabla obtenemos:

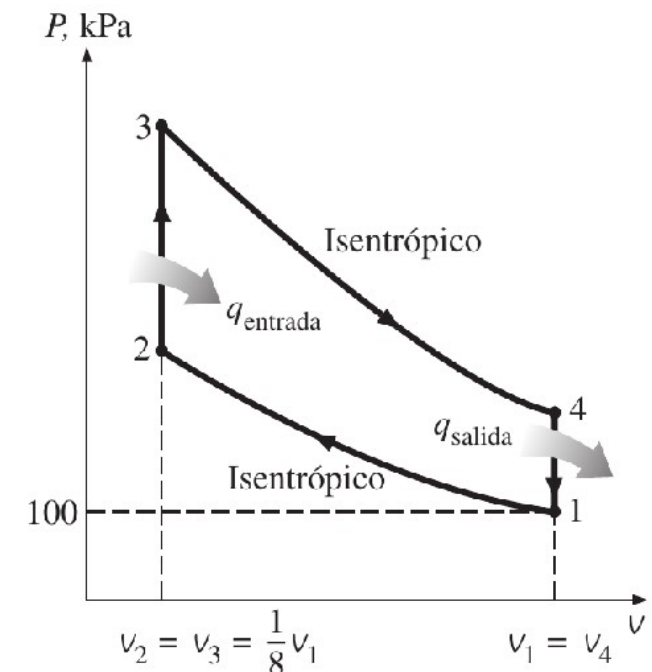
$$T_3 = T_{\max} = 1575.1 \text{ °K} \quad \nu_{3,r} = 6.108$$

Finalmente, la presión se obtiene de:

$$\frac{P_3 \nu_3}{T_3} = \frac{P_2 \nu_2}{T_2} \quad \longrightarrow \quad P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2} \frac{\nu_2}{\nu_3}$$

$\nu_3 = \nu_2$

$$= 1799.7 \text{ kPa} \frac{1575.1}{273 + 652.4}$$
$$\longrightarrow \quad P_3 = P_{\max} = 4345 \text{ kPa}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación de los calores específicos del aire con la temperatura** y determine:
 - La **salida de trabajo neto**.

Primero necesitamos las propiedades del estado 4. Para esto resolvemos el proceso 3-4. Usando que es un proceso isentrópico:

$$\frac{\nu_{4,r}}{\nu_{3,r}} = \frac{\nu_4}{\nu_3} = r \quad \longrightarrow \quad \nu_{4,r} = r \nu_{3,r} = 48.864$$

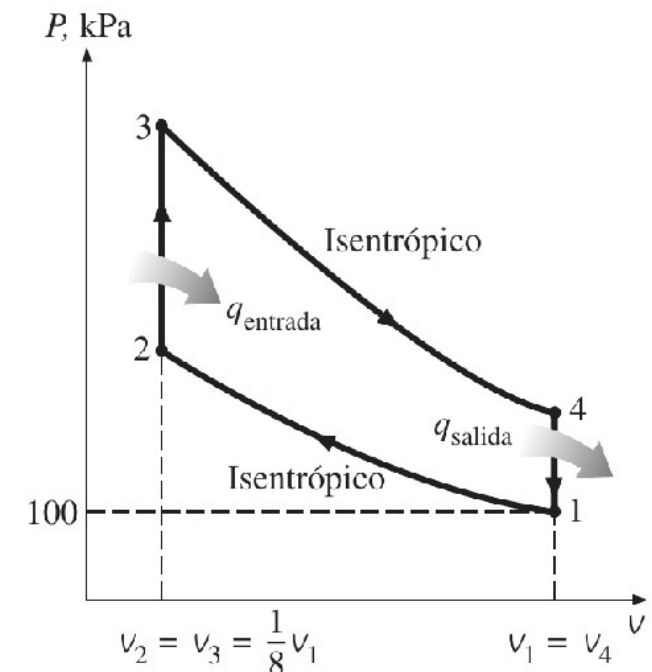
$\swarrow \quad \nwarrow$
8 6.108

De tabla ahora podemos despejar:

$$T_4 = 795.6 \text{ °K} \quad u_4 = 588.74 \text{ kJ/kg}$$

La salida de trabajo neto será igual a la entrada de calor neto:

$$w_{\text{neto}} = q_{\text{neto}} = q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación de los calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **salida de trabajo neto**.

Del enunciado ya tenemos que:

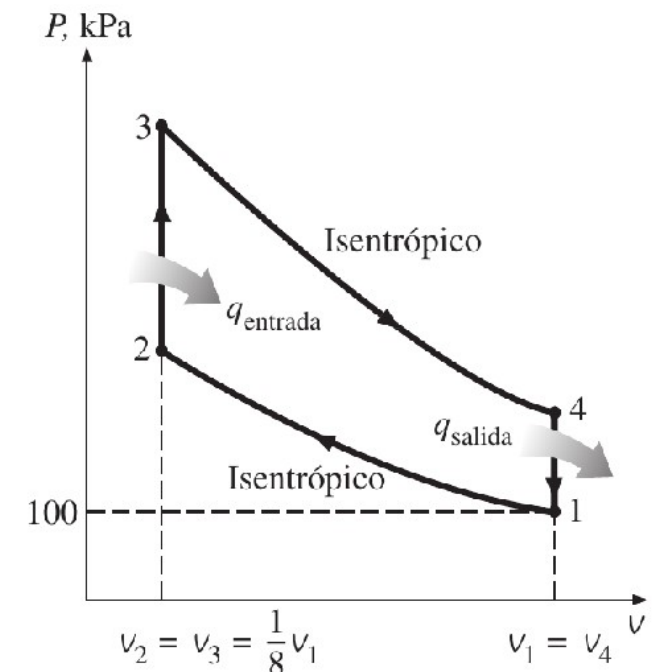
$$q_{\text{entrada}} = 800 \text{ kJ/kg}$$

El calor de salida se obtiene de imponer conservación de la energía en el proceso 4-1:

$$\begin{aligned} q_{\text{salida}} &= u_4 - u_1 = (588.74 - 206.91) \text{ kJ/kg} \\ &= 381.83 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Remplazando se obtiene:

$$\longrightarrow \boxed{w_{\text{neto}} = 418.17 \text{ kJ/kg}}$$



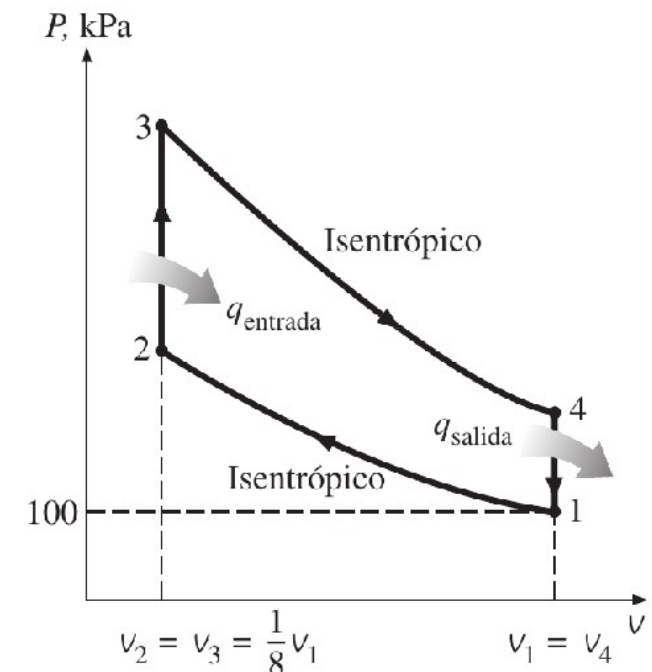
Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **eficiencia térmica**.

La eficiencia la podemos obtener directamente de los datos ya calculados:

$$\eta = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = \frac{418.17}{800}$$

$$\longrightarrow \boxed{\eta = 0.523}$$



Ejemplo:

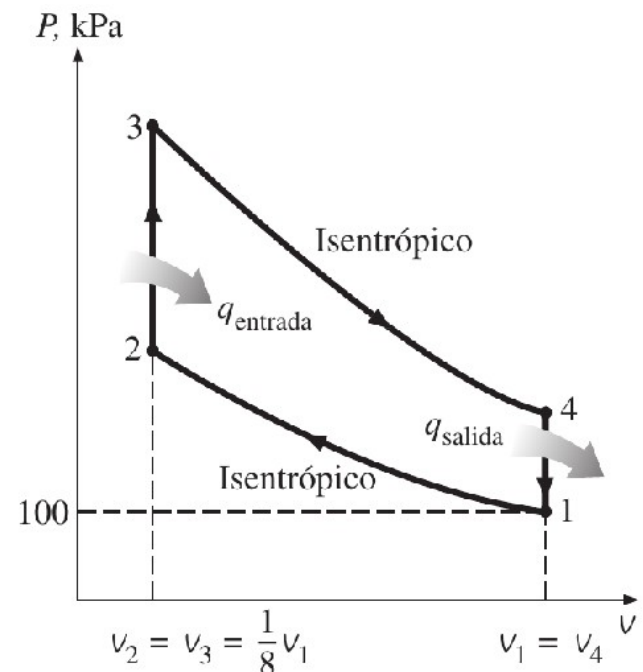
- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación de los calores específicos del aire con la temperatura** y determine:
 - La **presión media efectiva** en el ciclo.

Recordamos que la presión media efectiva (PME) es:

$$\begin{aligned} \text{PME} &= \frac{w_{\text{neto}}}{\nu_1 - \nu_2} \\ &= \frac{w_{\text{neto}}}{\nu_1 \left(1 - \frac{1}{r}\right)} \end{aligned} \quad \text{with } r = \frac{\nu_1}{\nu_2} = 8$$

Ahora necesitamos el volumen específico: $R_{\text{aire}} = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{RT_1}{P_1} = \frac{0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} (273 + 17) ^\circ\text{K}}{100 \text{ kPa}} \\ &= 0.832 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$



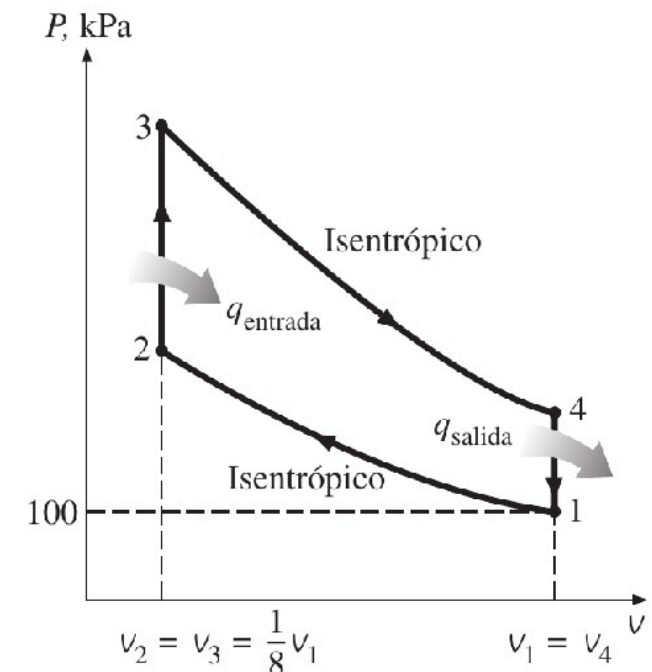
Ejemplo:

- Un **ciclo de Otto ideal** tiene una **relación de compresión** de 8. Al **inicio** del **proceso de compresión** el **aire** está a **100 kPa** y **17 °C**, y **800 kJ/kg** de **calor** se **transfieren a volumen constante** hacia el **aire** durante el **proceso de adición de calor**. Tome en cuenta la **variación** de los **calores específicos del aire** con la **temperatura** y determine:
 - La **presión media efectiva** en el ciclo.

Remplazando:

$$\text{PME} = \frac{418.17 \text{ kJ/kg}}{0.832 \text{ m}^3/\text{kg} (1 - 1/8)}$$

→ $\text{PME} = 574 \text{ kPa}$



Conclusiones

- Definimos el **ciclo de Otto**, correspondiendo a **motores de encendido por chispa**.
- Vimos el **ciclo de Otto ideal** y su **eficiencia**.
- Próxima clase:
 - Ciclo de Diesel.