

UC | Chile

Termodinámica (FIS1523)

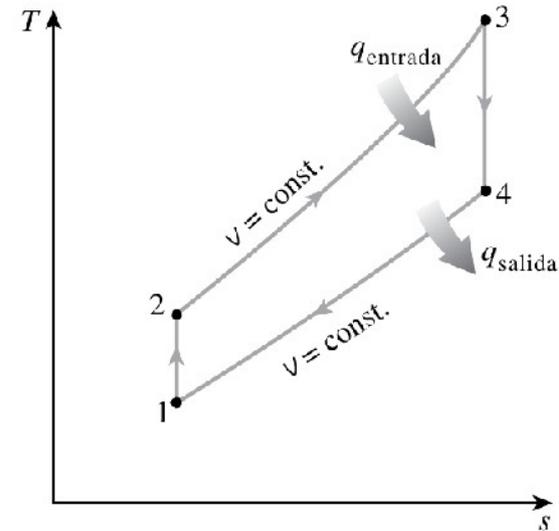
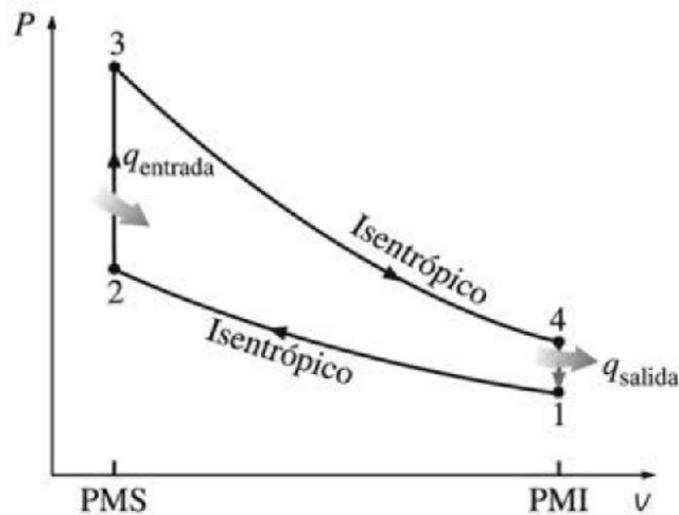
Ciclo de Diesel

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Lunes 23 de Junio de 2025

Resumen clase anterior

- Revisamos el **ciclo de Otto**, correspondiendo a un **motor de encendido por chispa**.



- Vimos que la **eficiencia** de un **Ciclo de Otto ideal** es:

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

Clase 28: Ciclo de Diesel

- Combustión por compresión y motor de Diesel.
- Ciclo de Diesel ideal.

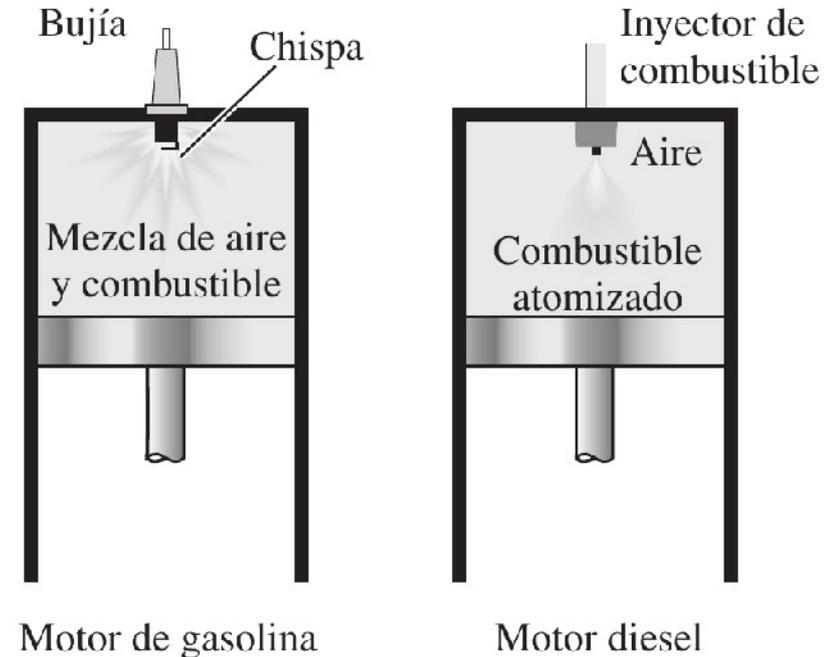
- Bibliografía recomendada:
 - Cengel (9-6).

Clase 28: Ciclo de Diesel

- **Combustión por compresión y motor de Diesel.**
- Ciclo de Diesel ideal.

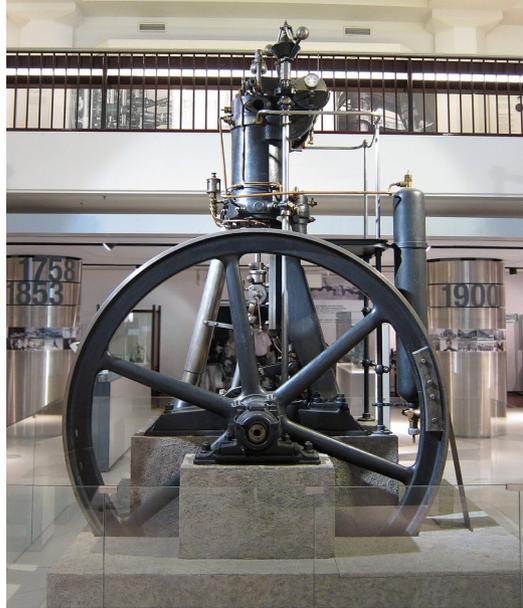
Motores de encendido por compresión

- Los **motores de encendido por compresión (ECOM)** son aquellos donde la **combustión aire-combustible** se inicia por **autoencendido**.
- Al **comprimir** la mezcla su **temperatura aumenta** por **sobre** la **temperatura de autoencendido**.
- La **bujía y carburador** son **reemplazados** por un **inyector de combustible**.

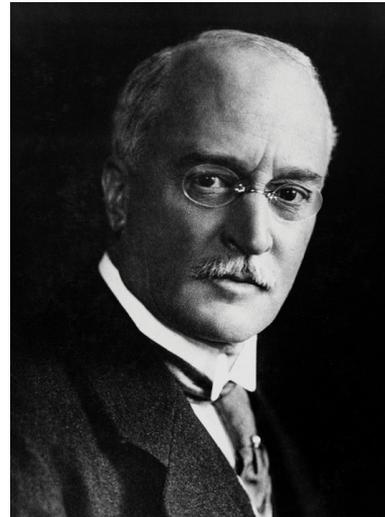


Motor de Diesel

- Los motores de **combustión por compresión** se llaman **motores de Diesel**.
- Fueron diseñados por **Rudolf Diesel**. Patentó la idea en **1893**.
- El **primer prototipo** fue completado en **1893**. El **primer motor de Diesel comercial** fue instalado en **1898**.



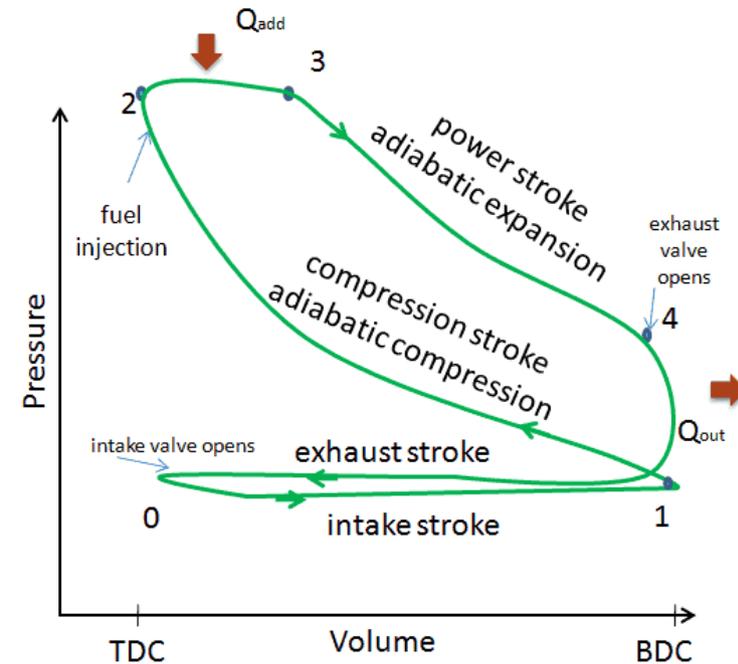
Primer motor de Diesel funcional



R. Diesel (1858 – 1913)

Ciclo de Diesel

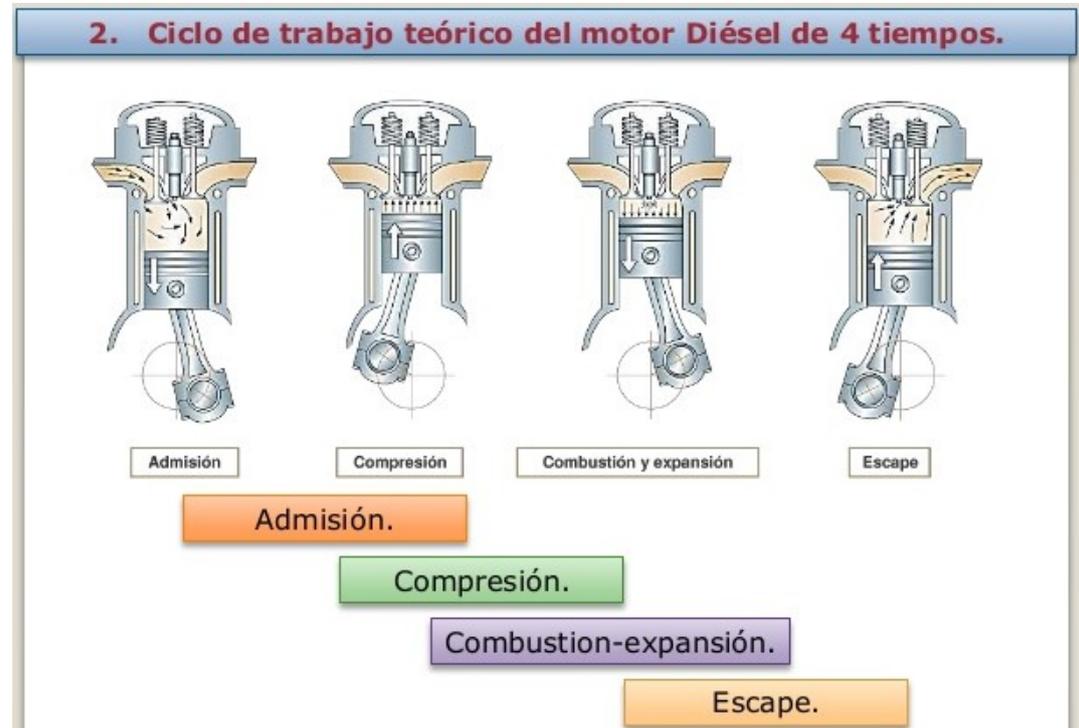
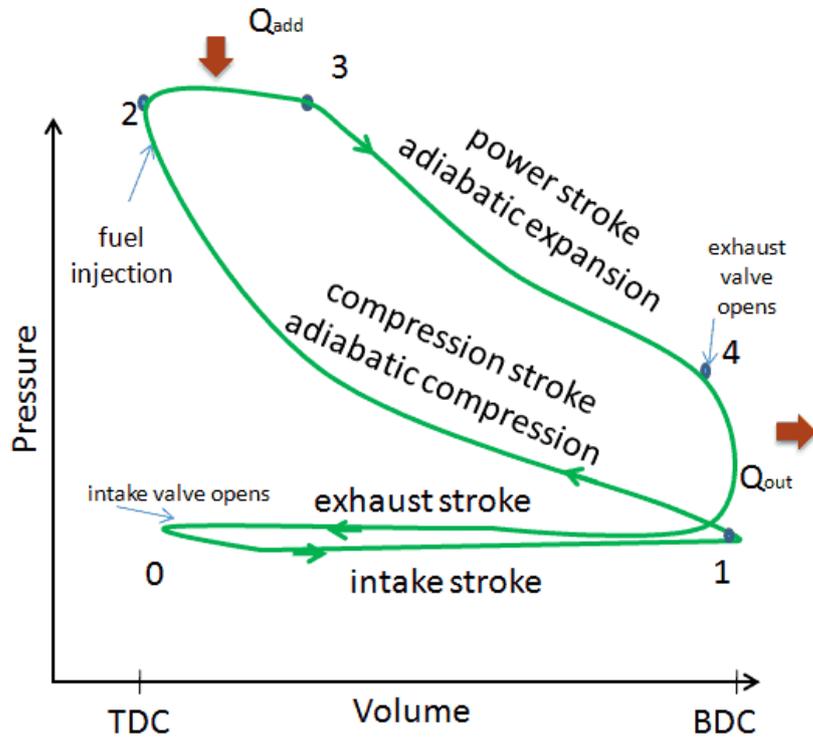
- En la **carrera de compresión sólo se comprime aire** (sin combustible).
- Esto **impide un autoencendido prematuro** y **permite utilizar relaciones de compresión altas**.
- El **combustible se inyecta sólo al llegar al PMS**.



- La **combustión** se realiza en un **proceso a aproximadamente presión constante** (proceso 2-3).

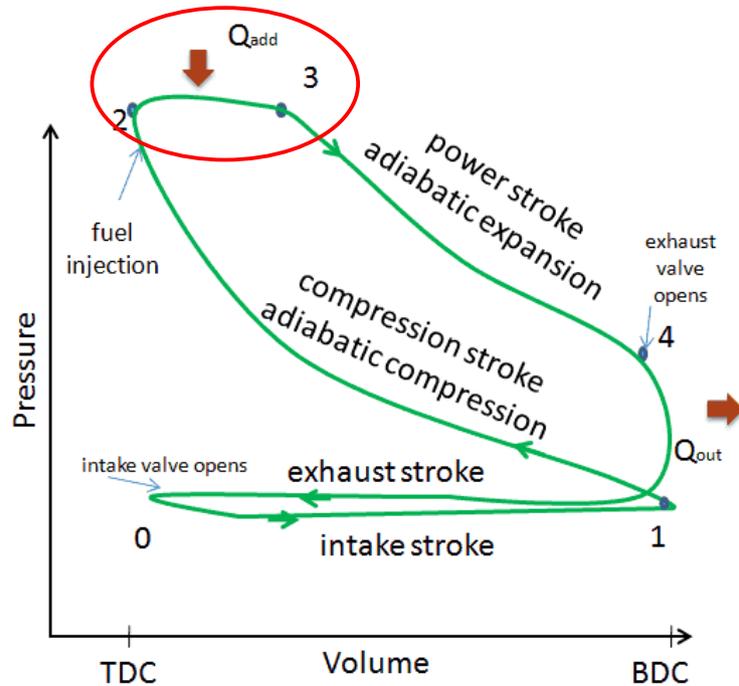
- Por el contrario, en el **ciclo de Otto** la **combustión** se realiza en un **proceso a aproximadamente volumen constante**.

Ciclo de Diesel

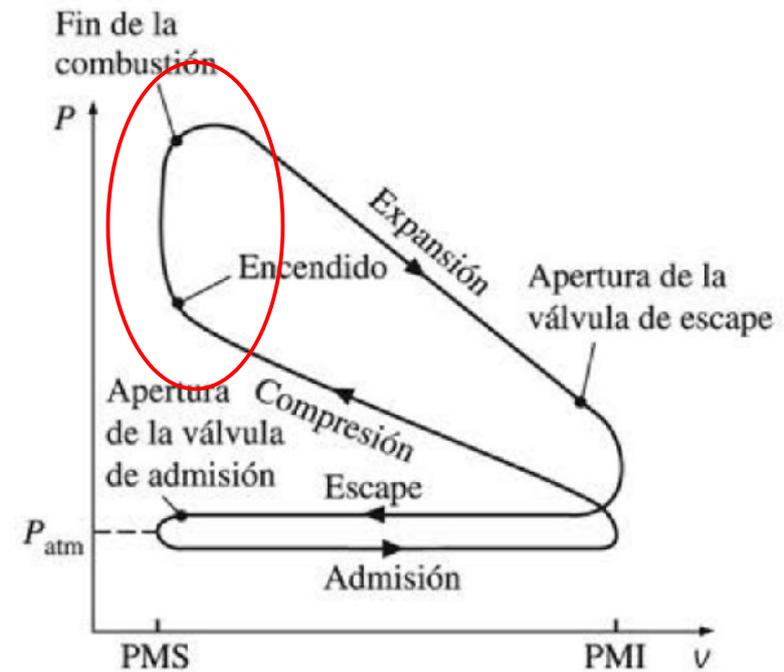


Ciclo de Diesel

Ciclo de Diesel



Ciclo de Otto



- La principal diferencia conceptual entre el ciclo de Diesel y el ciclo de Otto se encuentra en el proceso de combustión.
- Sin embargo, los **motores reales** también tienen importantes **diferencias** adicionales en su **diseño y componentes**.

Motor de Diesel

- Los **motores de Diesel** suelen ser **más eficientes** que los de **Otto**.
- También suelen tener **mayor durabilidad** y tienen **mayor capacidad de carga**.
- Sin embargo, son **más costosos**, **pesan más**, son **más ruidoso y contaminantes**.
- En general son utilizados en **aparatos que necesitan una gran cantidad de potencia**:
 - Barcos, camiones, trenes, maquinaria pesada, etc

Combustible

- Los motores de **Diesel** pueden utilizar **combustibles menos refinados y costosos** que en uno de Otto.
 - Distintos derivados del petróleo, aceites vegetales, etc.
- Usualmente se utiliza **combustible Diesel**, correspondiendo a una forma de **hidrocarburo líquido**.



Clase 28: Ciclo de Diesel

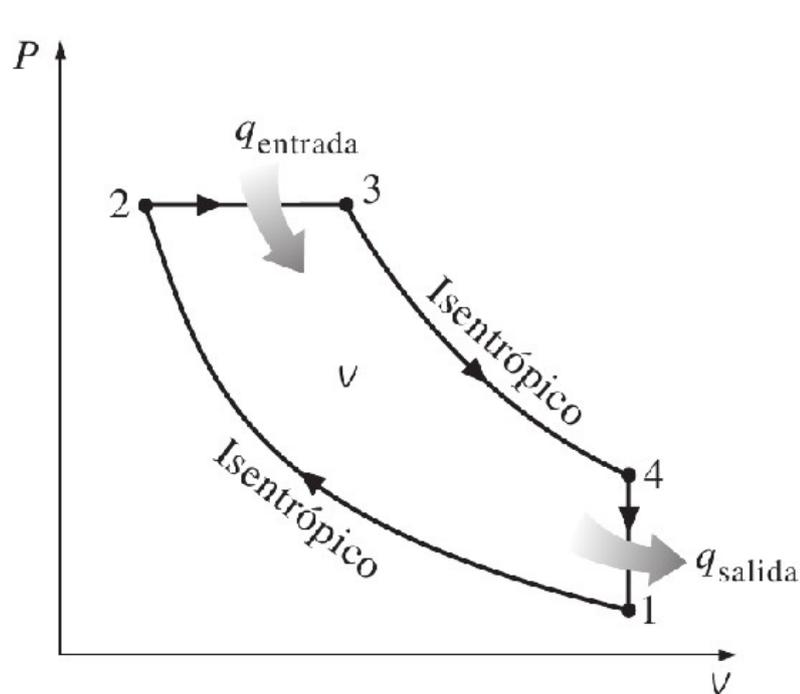
- Combustión por compresión y motor de Diesel.
- **Ciclo de Diesel ideal.**

Ciclo de Diesel ideal

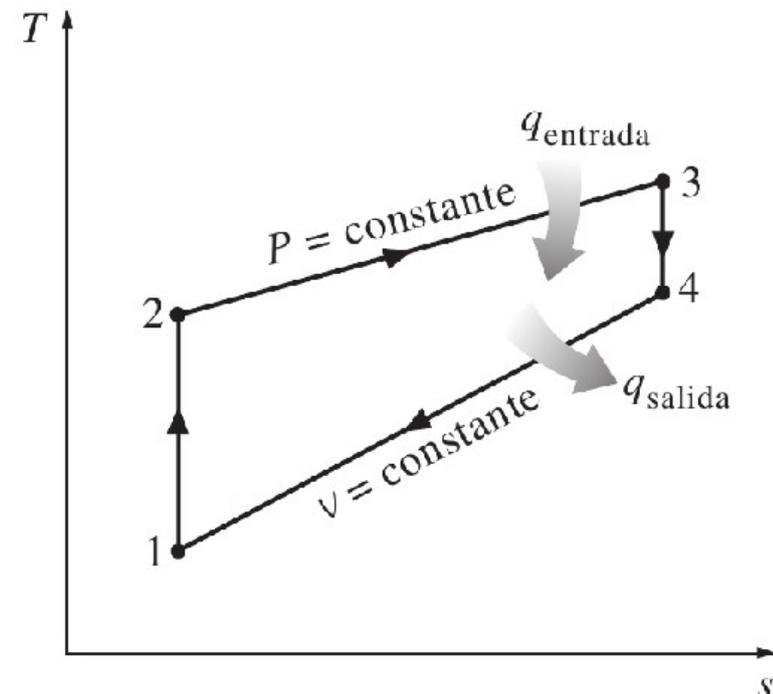
- Al igual que con el Ciclo de Otto, vamos a **simplificar el problema** utilizando las **suposiciones de aire estandar**.
- Con esto podemos definir el **ciclo de Diesel ideal**, el que se compone de **cuatro procesos internamente reversibles** en un **sistema cerrado**.

Ciclo de Diesel ideal

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



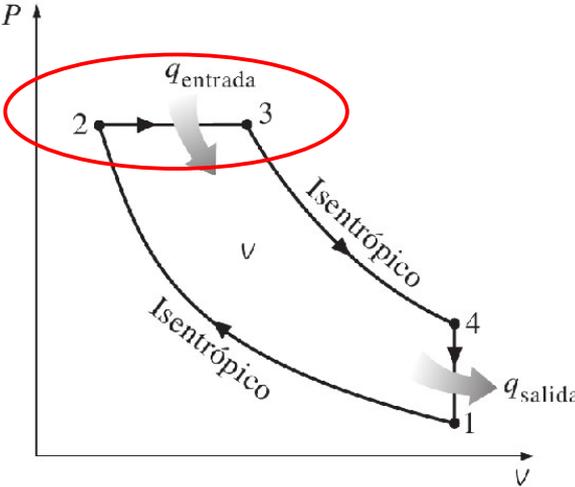
a) Diagrama $P-v$



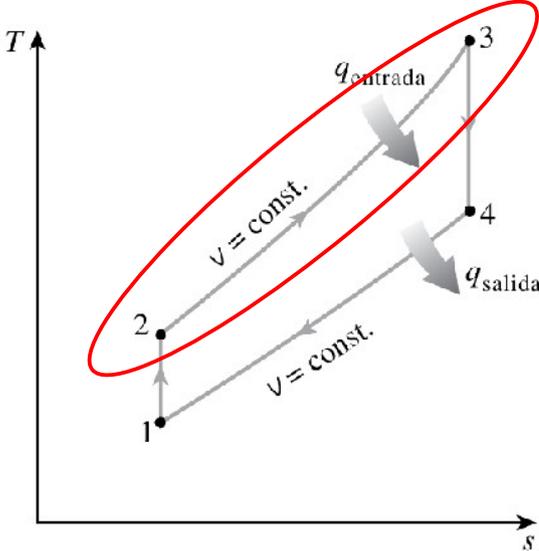
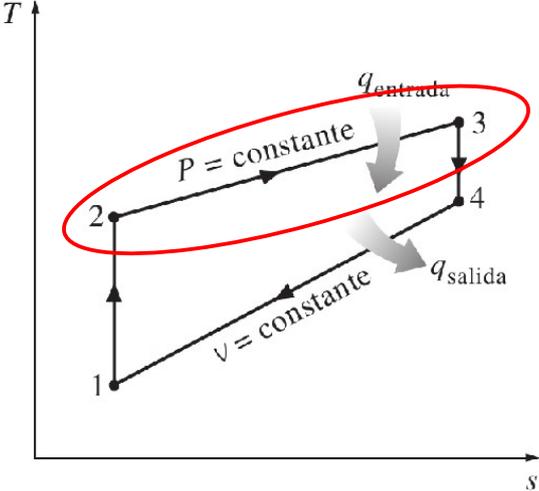
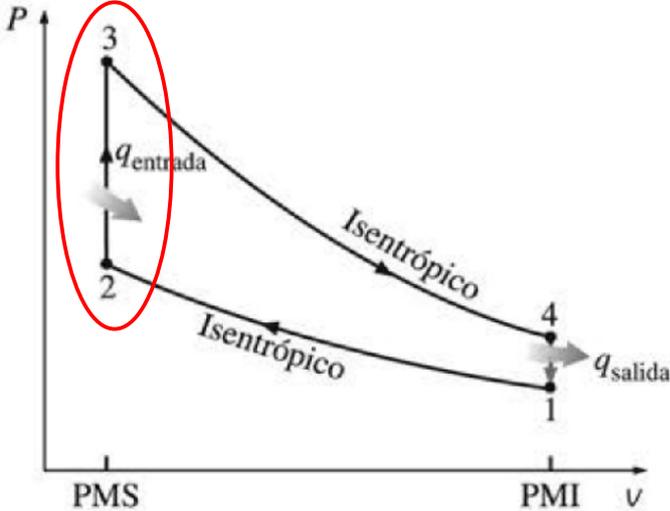
b) Diagrama $T-s$

Ciclo de Diesel ideal

Ciclo de Diesel ideal



Ciclo de Otto ideal



Eficiencia del ciclo de Diesel ideal

- El balance de energía en el proceso a presión constante (2-3):

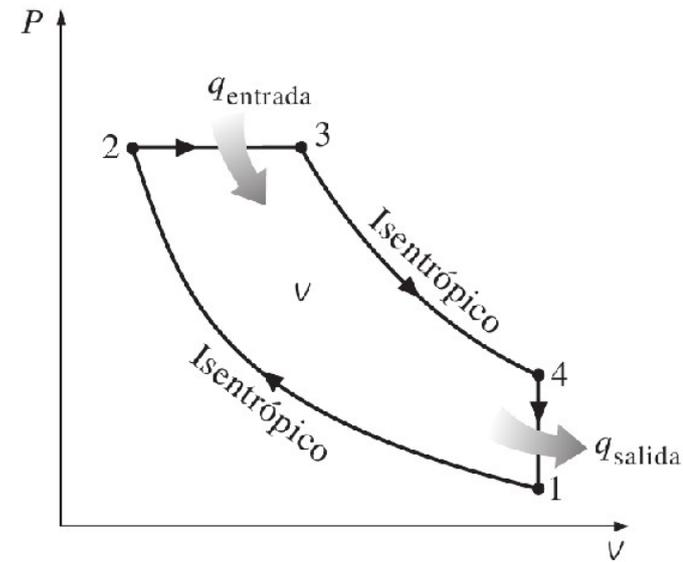
$$q_{\text{entrada}} - \underbrace{w_{\text{salida}}}_{P\Delta v} = \Delta u$$

$$\longrightarrow q_{\text{entrada}} = P\Delta v + \Delta u = \Delta h = c_P(T_3 - T_2)$$

- Por otro lado, el balance de energía en el proceso a volumen constante (4-1)

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

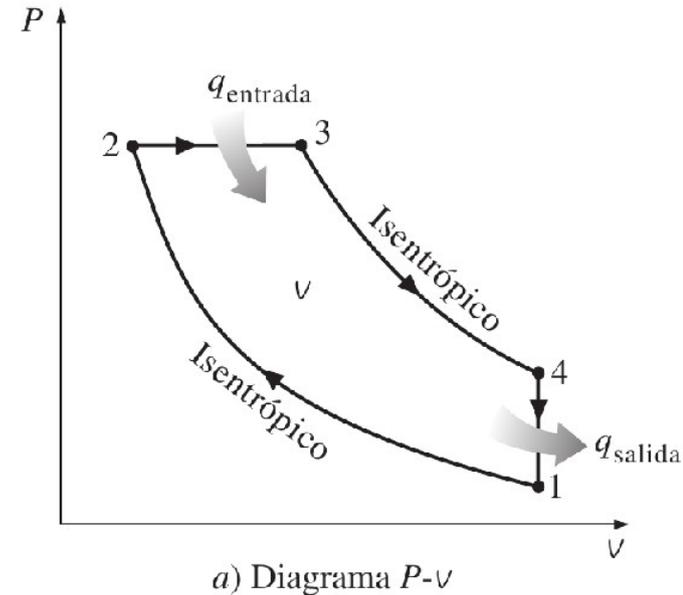
$$\longrightarrow q_{\text{salida}} = c_V(T_4 - T_1)$$



Eficiencia del ciclo de Diesel ideal

- La eficiencia:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{Diesel}} &= 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} & k &= c_P/c_V \\ &= 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} \\ &= 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}.\end{aligned}$$



- Realizando un algebra análoga a la realizada con el ciclo de Otto se obtiene:

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right],$$

donde $r_c = v_3/v_2$ es la **relación de corte de admisión** y r es la relación de compresión usual.

Eficiencia del ciclo de Diesel ideal

- La eficiencia del ciclo de Diesel ideal parece una modificación de la Otto:

$$\eta_{\text{Diesel}} = \underbrace{1 - \frac{1}{r^{k-1}}}_{\eta_{\text{Otto}}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right].$$

- La cantidad entre paréntesis [] es mayor que uno. Por tanto, para un mismo factor de compresión r y coeficiente k :

$$\eta_{\text{Diesel}} < \eta_{\text{Otto}}.$$

- Esto sugiere que los ciclos de Otto son más eficientes.
- Sin embargo, en la práctica los motores de Diesel utilizan factores de compresión muchos más altos, aumentando la eficiencia.

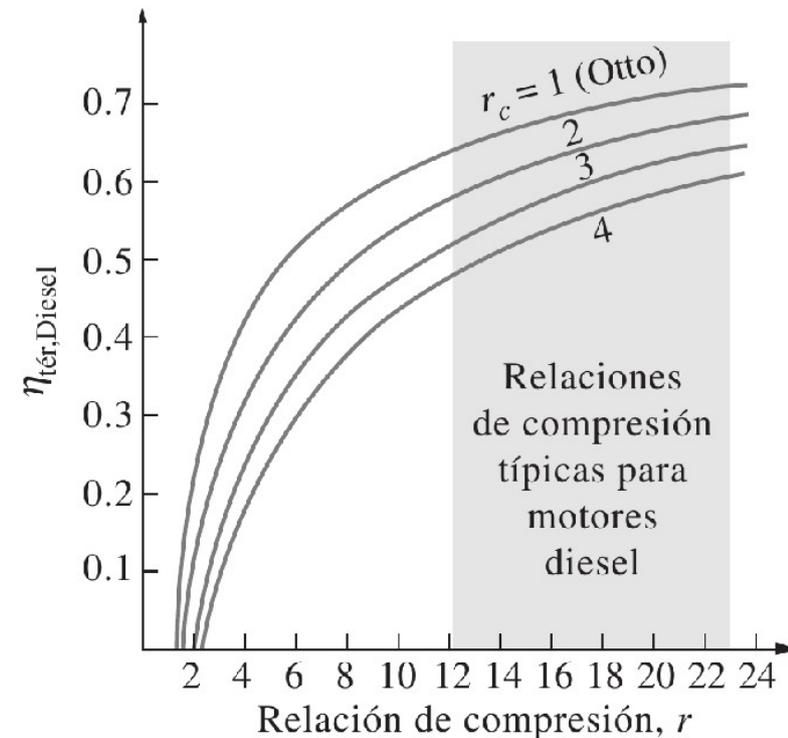
Eficiencia del ciclo de Diesel ideal

- La eficiencia aumenta con mayor r y menor r_c .

$$r_c = \nu_3/\nu_2, \quad r = \nu_1/\nu_2.$$

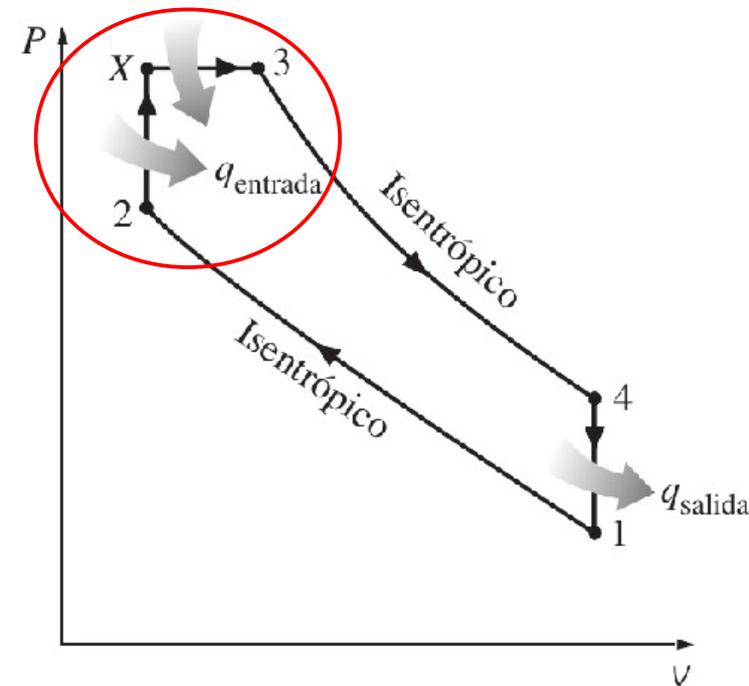
- Notar que para $r_c=1$ se tiene que:

$$\eta_{\text{Diesel}}(r_c = 1) = \eta_{\text{Otto}}.$$



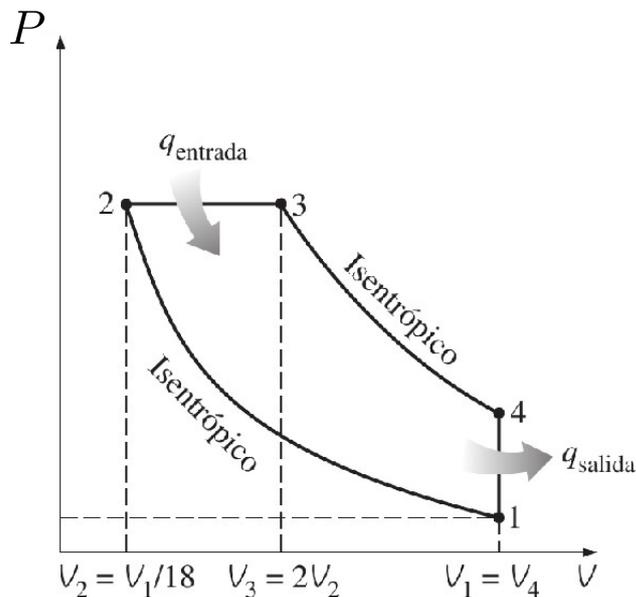
Ciclo dual

- En motores de alta velocidad se inyecta combustible a una rapidez mucho mayor a la de los motores de Diesel tradicionales.
- La combustión se inicia en una etapa avanzada del ciclo de compresión.
- En el ciclo ideal esta **combustión se modela como dos procesos:**
 - 2-X: **Volumen constante.**
 - X-3: **Presión constante.**
- Esto se conoce como **ciclo Dual.**
- En **ambos procesos se inyecta calor.**



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final** de cada proceso.
 - La **salida de trabajo neto**, **eficiencia térmica** y **presión media efectiva**.



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final** de **cada proceso**.

El volumen en el estado 2 lo obtenemos de la relación de compresión:

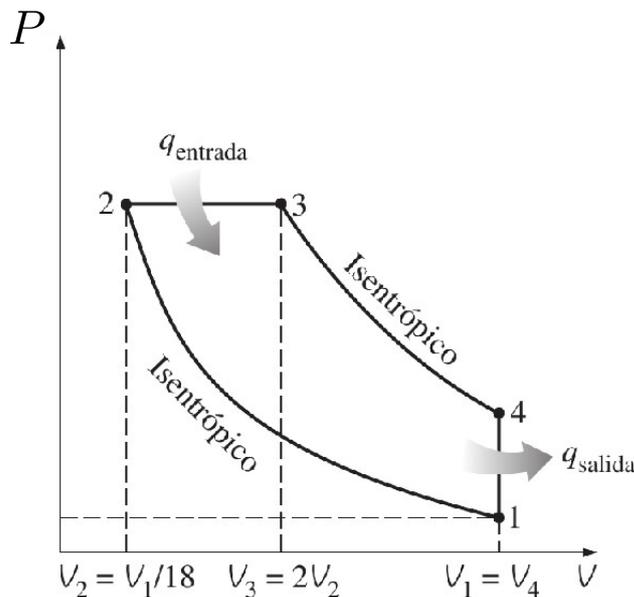
$$V_2 = \frac{V_1}{r} = \frac{0.002 \text{ m}^3}{18} = 0.00011 \text{ m}^3$$

El volumen en el estado 3 lo obtenemos de la relación de corte de admisión:

$$V_3 = r_c V_2 = 2 \times 0.00011 \text{ m}^3 = 0.00022 \text{ m}^3$$

El volumen en el estado 4 lo obtenemos al imponer que el proceso 1-4 es a volumen constante:

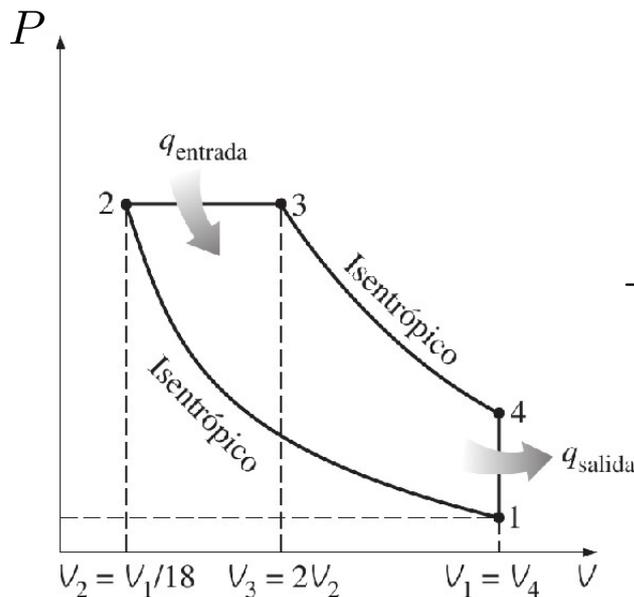
$$V_4 = V_1 = 0.002 \text{ m}^3$$



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión de 18** y una **relación de corte de admisión de 2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final de cada proceso**.

Ahora obtenemos la presión y temperatura en el estado 2 usando que el proceso 1-2 es isentrópico. De la primera relación isentrópica:



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

$$\rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = (273 + 27)^\circ\text{K} \cdot 18^{1.4-1}$$

$$\rightarrow T_2 = 953^\circ\text{K} = 680^\circ\text{C}$$

Ejemplo:

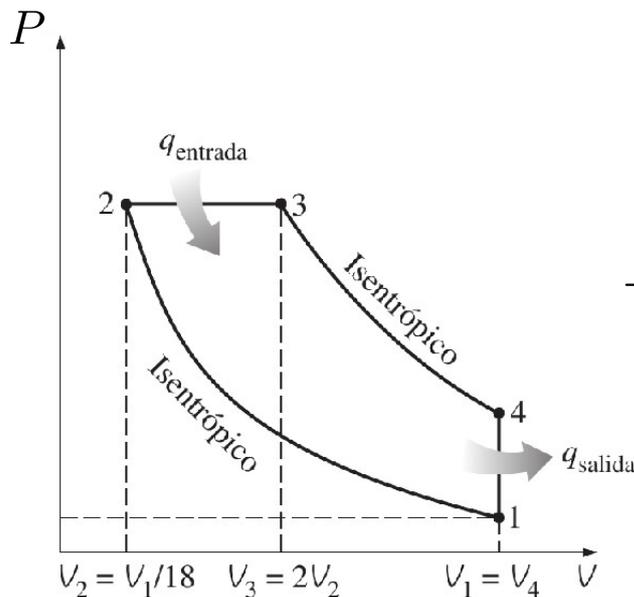
- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg^{°K}**, **$c_p=1.005$ kJ/kg^{°K}**, **$c_v=0.718$ kJ/kg^{°K}** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final** de cada proceso.

Usando ahora la tercera relación isentrópica:

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$$\rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = 101 \text{ kPa } 18^{1.4}$$

$$\rightarrow \boxed{P_2 = 5777 \text{ kPa}}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg^{°K}**, **$c_p=1.005$ kJ/kg^{°K}**, **$c_v=0.718$ kJ/kg^{°K}** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final** de **cada proceso**.

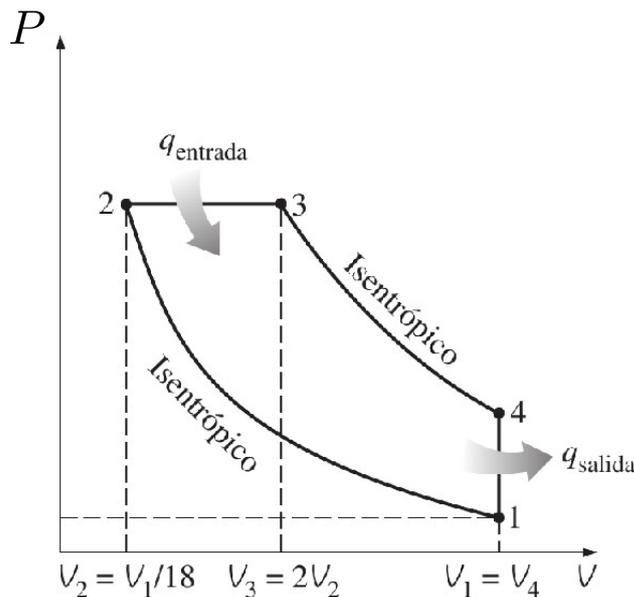
Para el proceso 2-3 primero imponemos que la presión es constante:

$$P_3 = P_2 = 5777 \text{ kPa}$$

El volumen lo despejamos de la ecuación de estado de un gas ideal:

$$\frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \quad \longrightarrow \quad T_3 = T_2 \frac{P_3 V_3}{P_2 V_2} = 2 \times 953 \text{ °K}$$

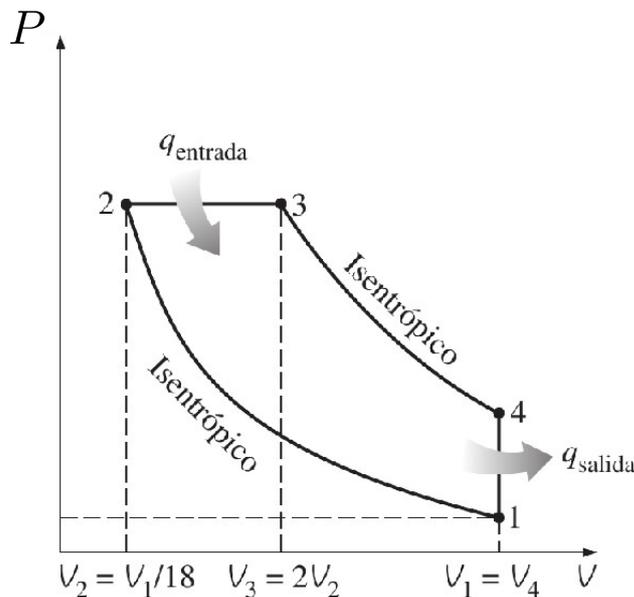
$$T_3 = 1906 \text{ °K} = 1633 \text{ °C}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión de 18** y una **relación de corte de admisión de 2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final de cada proceso**.

Finalmente, ahora utilizamos que el proceso 3-4 es isentrópico. Usando la primera relación isentrópica:



$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1}$$

$$\longrightarrow T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = 1906 \text{ °K} \left(\frac{0.00022}{0.002} \right)^{1.4-1}$$

$$\longrightarrow T_4 = 788 \text{ °K} = 515 \text{ °C}$$

Ejemplo:

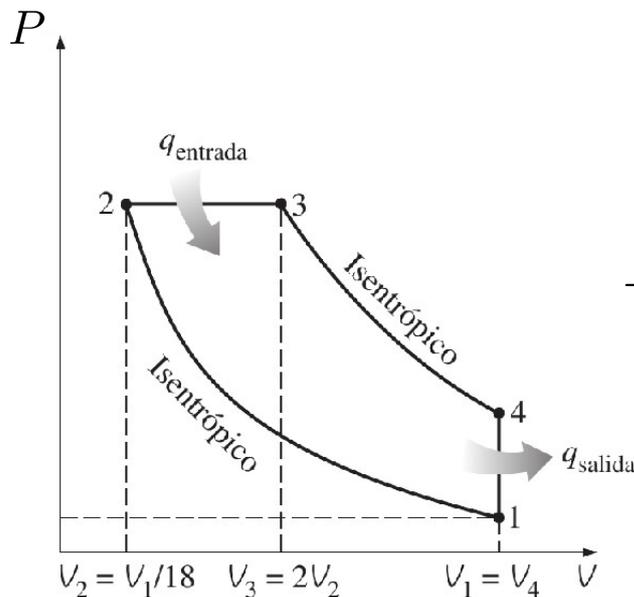
- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **temperatura y presión** del aire al **final de cada proceso**.

Ahora utilizamos la tercera relación isentrópica:

$$\left(\frac{\nu_3}{\nu_4}\right)^k = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)$$

$$\rightarrow P_4 = P_3 \left(\frac{\nu_3}{\nu_4}\right)^k = 5777 \text{ kPa} \left(\frac{0.00022}{0.002}\right)^{1.4}$$

$$\rightarrow \boxed{P_4 = 263 \text{ kPa}}$$



Ejemplo:

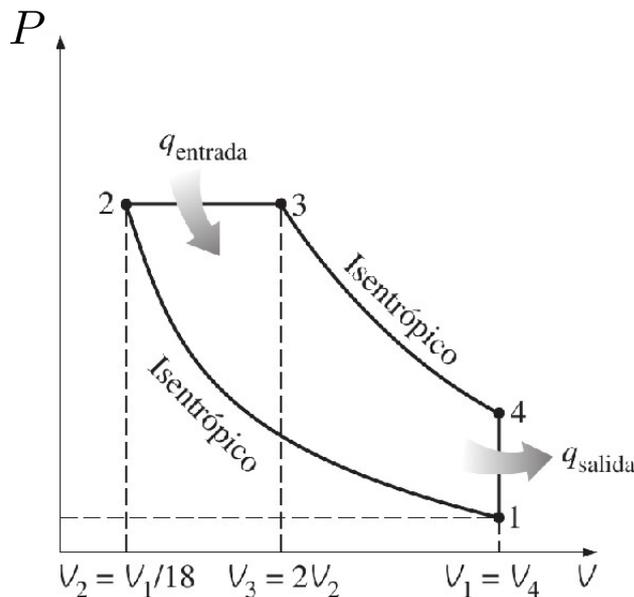
- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **salida de trabajo neto**, **eficiencia térmica** y **presión media efectiva**.

Primero necesitamos la masa del aire para calcular calores y trabajos totales. Utilizando la ecuación de un gas ideal:

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{101 \text{ kPa} \cdot 0.002 \text{ m}^3}{0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (273 + 27)^\circ\text{K}} = 0.0023 \text{ kg}$$

Ahora calcularemos el calor de entrada y de salida. El de entrada:

$$\begin{aligned} Q_{\text{entrada}} &= m c_P (T_3 - T_2) \\ &= 0.0023 \text{ kg} \cdot 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (1906 - 953)^\circ\text{K} \\ &= 2.20 \text{ kJ} \end{aligned}$$



Ejemplo:

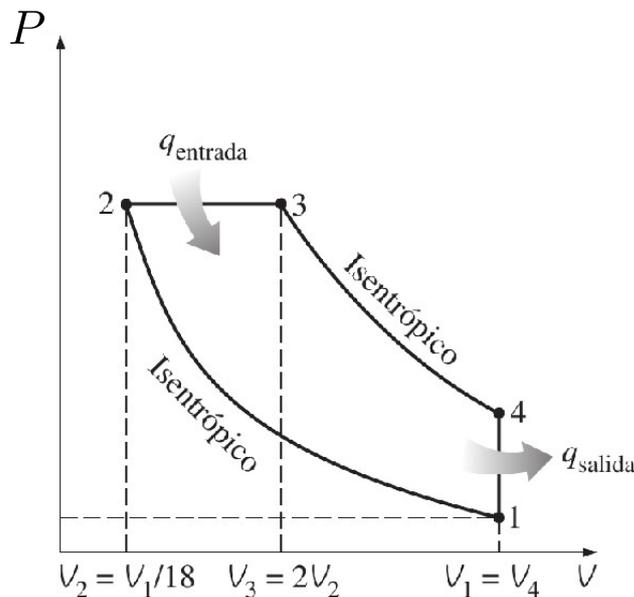
- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **salida de trabajo neto**, **eficiencia térmica** y **presión media efectiva**.

El calor de salida:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{salida}} &= mc_V(T_4 - T_1) \\
 &= 0.0023 \text{ kg} \cdot 0.718 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (788 - 300)^\circ\text{K} \\
 &= 0.806 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

El trabajo neto:

$$W_{\text{neto}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}} \longrightarrow \boxed{W_{\text{neto}} = 1.4 \text{ kJ}}$$



Ejemplo:

- Un **ciclo Diesel ideal** con **aire** como fluido de trabajo tiene una **relación de compresión** de **18** y una **relación de corte de admisión** de **2**. Al principio del proceso de compresión el fluido de trabajo está a **101 kPa**, **27 °C** y **0.002 m³**. Utilice las **suposiciones de aire estándar frío** y determine. Considere que para el aire **$R=0.2870$ kJ/kg°K**, **$c_p=1.005$ kJ/kg°K**, **$c_v=0.718$ kJ/kg°K** y **$k=1.4$** .
 - La **salida de trabajo neto**, **eficiencia térmica** y **presión media efectiva**.

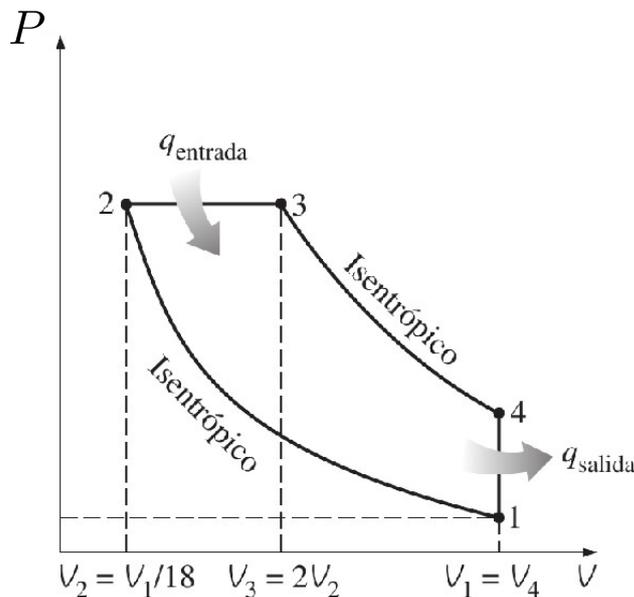
La eficiencia:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} = \frac{1.4}{2.2} \longrightarrow \boxed{\eta = 0.63}$$

Finalmente, la presión media efectiva:

$$\text{PME} = \frac{W_{\text{neto}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} = \frac{1.4 \text{ kJ}}{(0.002 - 0.00011) \text{ m}^3}$$

$$\longrightarrow \boxed{\text{PME} = 740 \text{ kPa}}$$



Conclusiones

- Definimos los **motores de Diesel**, correspondiendo a **motores de encendido por compresión**.
- Vimos el **ciclo de Diesel ideal** y su **eficiencia**.