



**UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL**  
**“FRANCISCO DE MIRANDA”**  
**ÁREA DE TECNOLOGÍA**  
**COMPLEJO ACADÉMICO EL SABINO**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**UNIDAD CURRICULAR: TERMODINÁMICA APLICADA**

## **TEMA III. CICLOS DE POTENCIA DE GAS AIRE CERRADOS**

**PROF. ING. JOSMERY SÁNCHEZ. MSc**

## Introducción

### Ciclo de Gas de Carnot

- Principio
- Diagrama T-s y H-s
- Ecuaciones

### Consideraciones para ciclos de aire estándar

### Relaciones Isoentrópicas

### Máquinas Reciprocantes

### Relación de Compresión

### Presión Media Efectiva

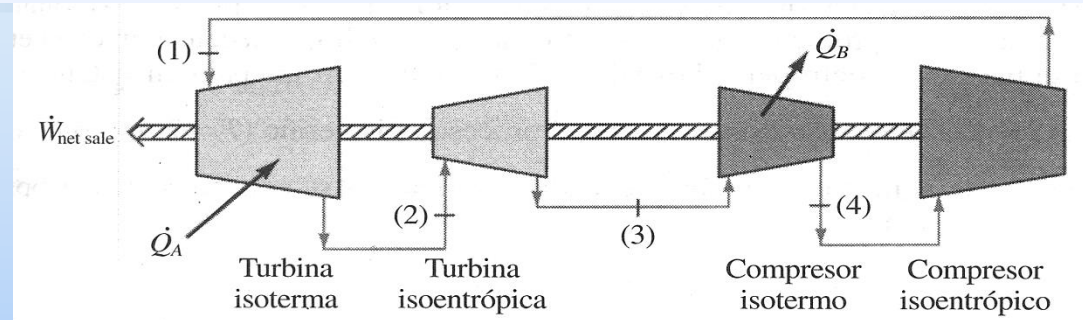
### Motores

### Ciclos de Aire Cerrados

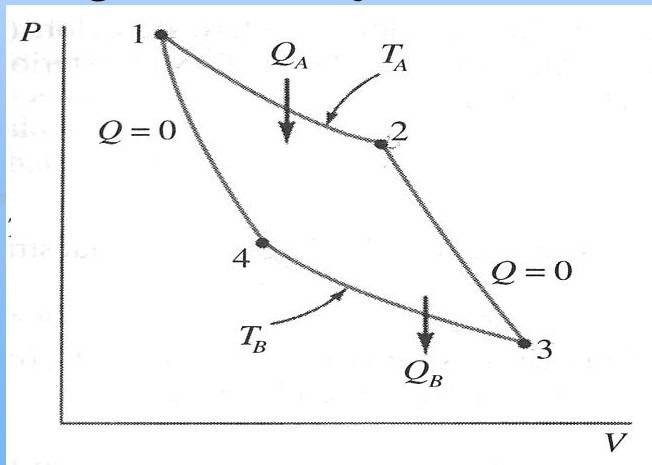
### Ciclos de Aire Abiertos

### Conclusiones

## Principio



## Diagramas T-s y H-s



Para los ciclos de aire estándar, el diagrama h-s es similar al diagrama T-s debido a que se ha supuesto un gas ideal (frecuentemente con los calores específicos independientes de la temperatura) como fluido de trabajo, lo cual hace que h sea directamente proporcional a T e independiente de P.

$$\eta_{Carnot} = \left( 1 - \frac{T_B}{T_A} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{T_3}{T_2} \right) \Rightarrow 1 - \left( \frac{P_1}{P_4} \right)^{\frac{1-K}{K}} = 1 - \left( \frac{P_2}{P_3} \right)^{\frac{1-K}{K}} \Rightarrow 1 - \left( \frac{V_4}{V_1} \right)^{1-K} = 1 - \left( \frac{V_3}{V_2} \right)^{1-K}$$



# CICLOS DE POTENCIA DE AIRE ESTÁNDAR

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

1. El fluido de trabajo en todo el ciclo es aire, que se modela como gas ideal.
2. El proceso de combustión se sustituye por la transferencia de calor desde una fuente externa.
3. El proceso de transferencia de calor hacia el entorno se utiliza para llevar al fluido a su estado inicial.
4. Todos los procesos los vamos a considerar reversibles.
5. Se considera que los calores específicos son constantes

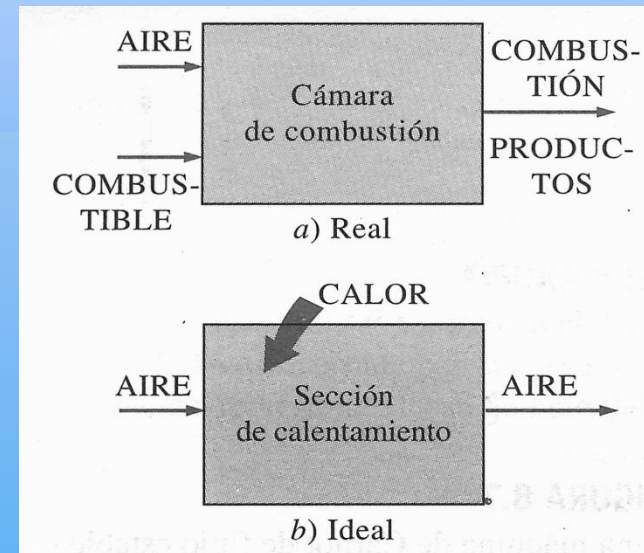
$$C_p = 0,24 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ \text{R}} \Rightarrow 1,005 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_v = 0,17 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ \text{R}} \Rightarrow 0,718 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$C_p = \text{Cte.} \quad C_v = \text{Cte.} \quad k = 1,4$$

$C_p$  : Capacidad térmica a presión constante.

$C_v$  : Capacidad térmica a volumen constante.





# CAMBIOS DE ENTROPÍA EN GASES IDEALES

## Basadas en la Segunda Ley de la Termodinámica.

Al sustituir  $du = c_v dT$  y  $P = RT/v$ , el cambio diferencial de entropía de un gas ideal se vuelve:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$



$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Una segunda relación para el cambio de entropía de un gas se obtiene de manera similar al sustituir  $dh = c_p dT$  y  $v = RT/p$ , obteniendo:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones



# CALORES ESPECÍFICOS CONSTANTES

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para  
ciclos de aire estándar

Relaciones  
Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

$$c_{V, promedio} \quad s_2 - s_1 = c_{v, pro} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

se  
tiene:

$$c_{p, promedio} \quad s_2 - s_1 = c_{p, pro} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

**Por unidad de mol**

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{c}_{v, pro} \ln \frac{T_2}{T_1} + R_u \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\bar{s}_2 - \bar{s}_1 = \bar{c}_{p, pro} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_u \ln \frac{p_2}{p_1}$$



# PROCESOS ISOENTRÓPICOS DE GASES IDEALES

$$s_2 - s_1 = c_{v,pro} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{c_v} \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \ln \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{R/c_v} \Rightarrow \left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=const} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

$$R = c_p - c_v, \quad k = c_p / c_v \qquad R/c_v = k - 1$$

Para el caso de  $c_p$  constante se tiene:

$$s_2 - s_1 = c_{p,pro} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow \left( \frac{T_2}{T_1} \right)_{s=const} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k}$$

Una tercera relación isoentrópica se obtiene al sustituir las relaciones precedentes:

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{s=const} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

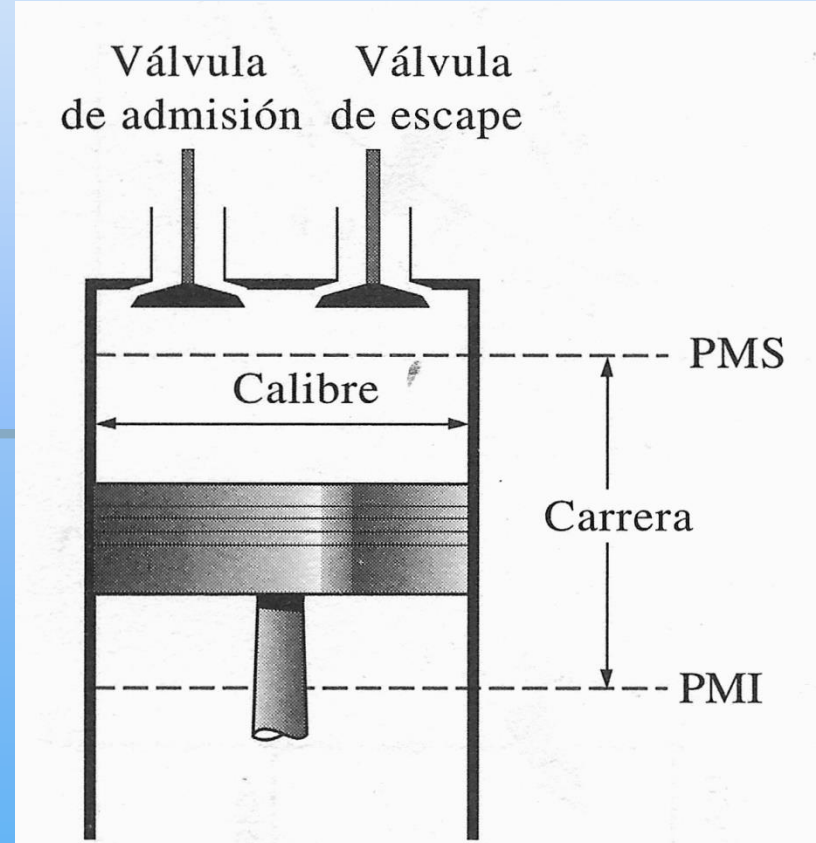
Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## Definición.

## Componentes básicos.



Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Definición

Componentes básicos

Clasificación según el tipo de encendido

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones



# MÁQUINAS RECIPROCANTES

## Clasificación según el tipo de encendido

### **Ciclos de encendido a chispa.**

Habitualmente se pueden encontrar dos versiones: de dos y cuatro tiempos. Se denomina tiempos a los desplazamientos del pistón que se requieren para completar un ciclo. **Ciclo Otto**

### **Ciclos de Autoencendido ó Auto ignición.**

**En el ciclo Diesel** se inyecta el combustible a elevada presión en el cilindro mediante una bomba inyectora. El aire ingresa sin mezclar, puro. En general los motores de ciclo Diesel puro suelen ser de dos tiempos, debido a que en esta versión se obtiene una embolada de potencia por cada revolución, mientras que en el de cuatro tiempos se produce una embolada de potencia por cada dos revoluciones, lo que obliga a duplicar la cantidad de cilindros y bombas para la misma potencia.

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para  
ciclos de aire estándar

Relaciones  
Isoentrópicas

**Máquinas Reciprocantes**

Definición

Componentes básicos

Clasificación según el tipo de  
encendido

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones



Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

**Volumen mínimo.**

**Volumen Máximo.**

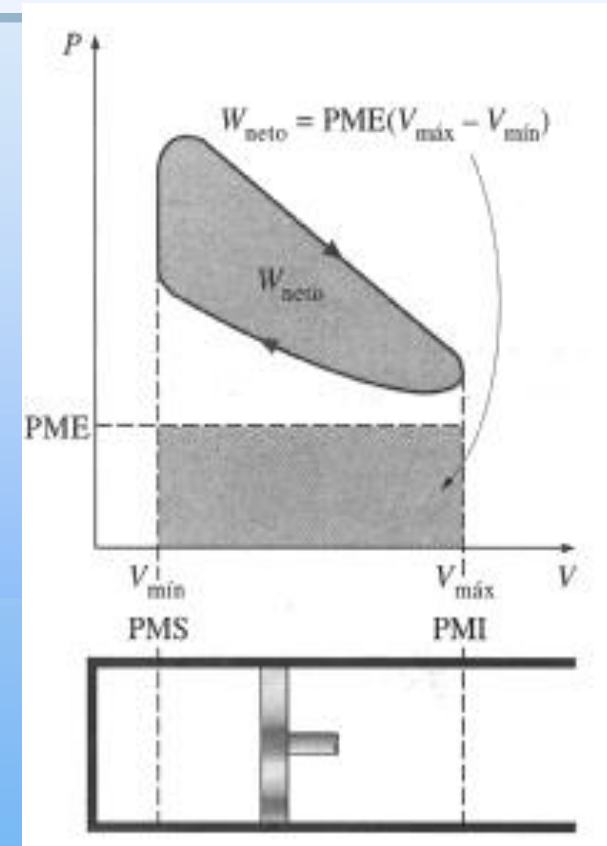
**Cilindrada.**

**Relación de compresión ( $r$ ).**

$$r = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{\text{volumen muerto} + \text{cilindrada}}{\text{volumen muerto}}$$

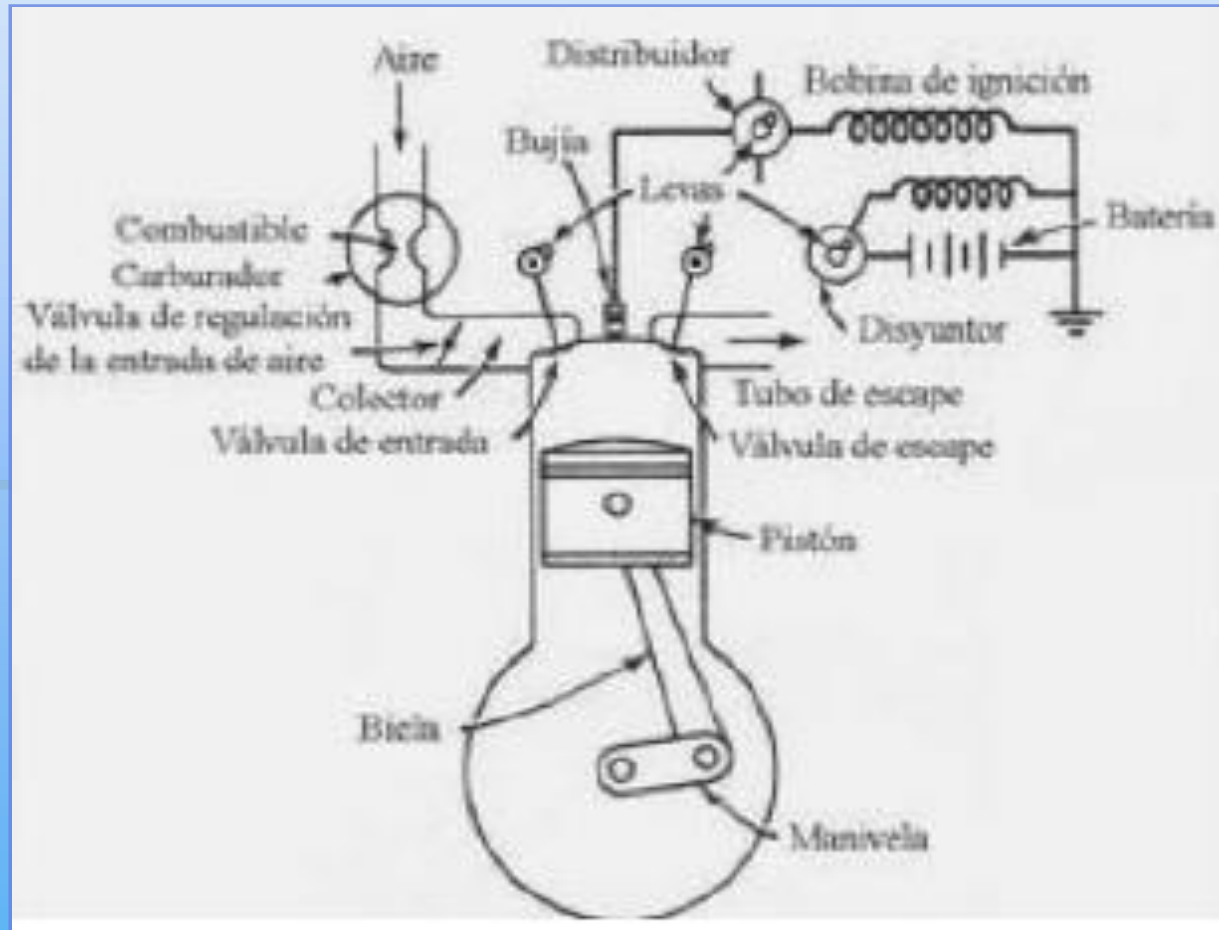
**PME:** La presión media efectiva se define como la presión media que actuaría sobre el embolo durante la carrera de potencia o hacia el exterior produciendo el mismo trabajo de salida que el trabajo neto de salida del proceso cíclico real.

$$W_{\text{ciclo,sal}} = PME \times \text{cilindrada}$$



## EN FUNCIÓN DEL PROCESO DE RENOVACIÓN DE LA CARGA

### Motor de cuatro tiempos



Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para  
ciclos de aire estándar

Relaciones  
Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

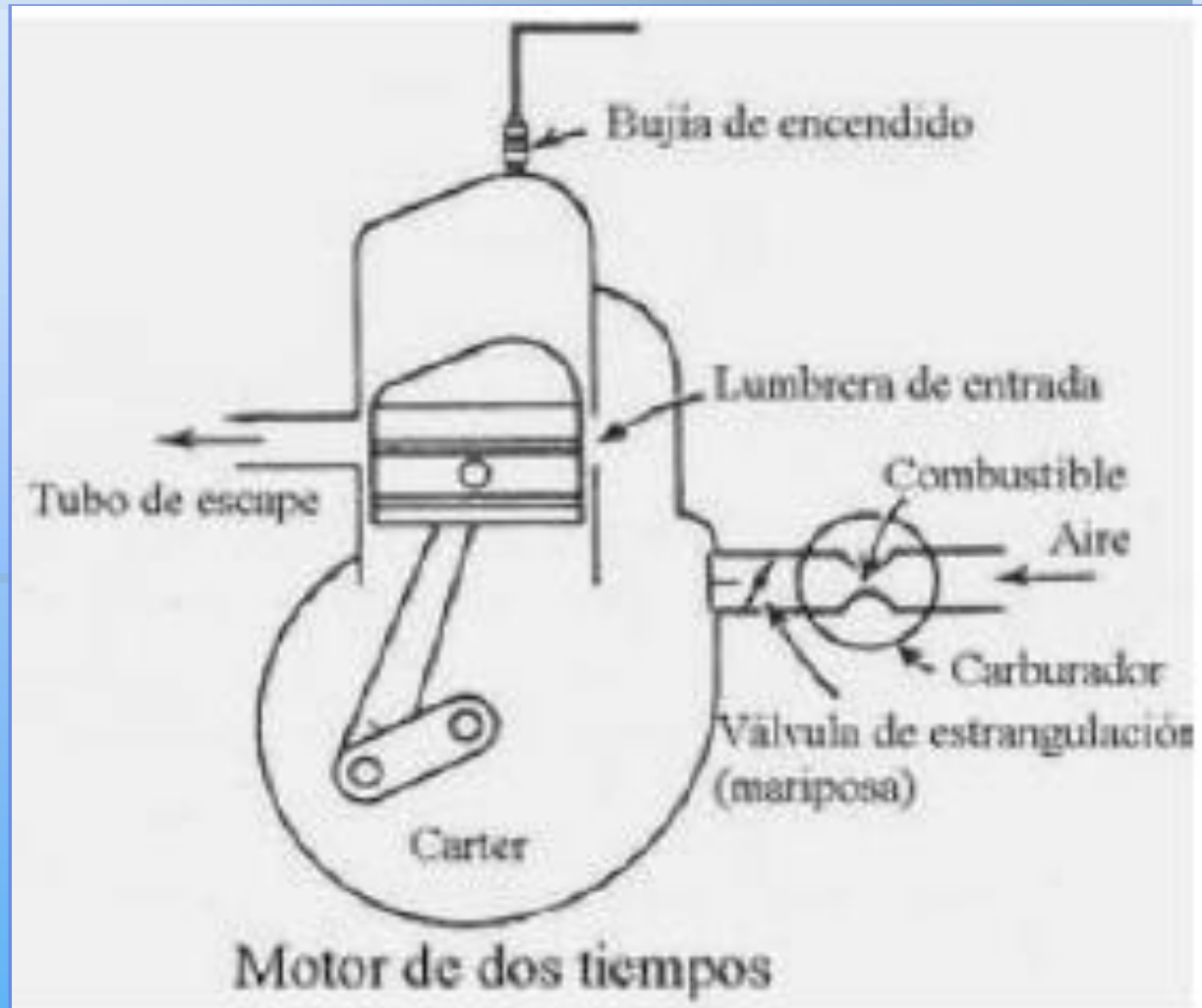
Motores

Ciclos de Aire Cerrados

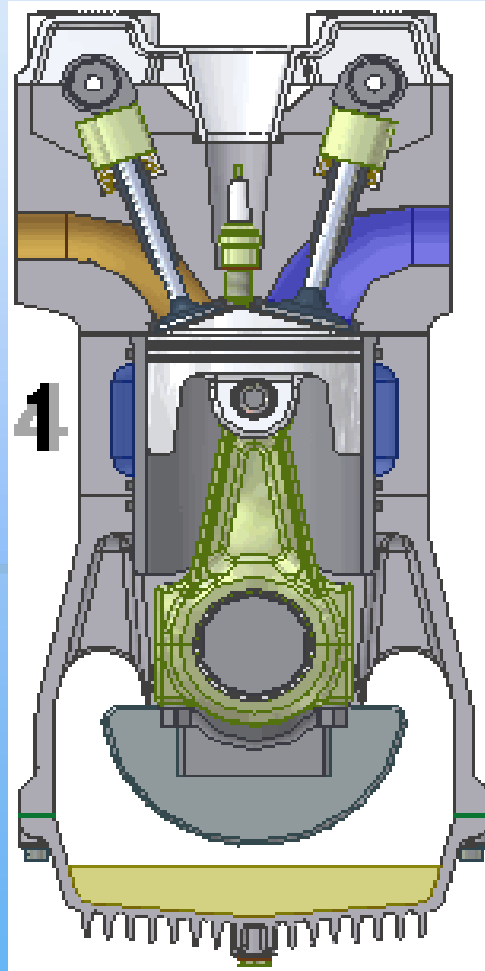
Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## Motor de dos tiempos



## Principio



**Fase 1:** El pistón se desplaza hasta el PMI y la válvula de admisión permanece abierta, permitiendo que se aspire la mezcla de combustible y aire hacia dentro del cilindro.

**Fase 2:** Las válvulas permanecen cerradas y el pistón se mueve hacia el PMS, comprimiendo la mezcla de aire y combustible. Cuando el pistón llega al final de esta fase, la bujía se activa y enciende la mezcla.

**Fase 3:** Se produce la combustión de la mezcla, liberando energía que provoca la expansión de los gases y el movimiento del pistón hacia el PMI. Se produce la transformación de la energía química contenida en el combustible en energía mecánica transmitida al pistón. El la trasmite a la biela, y la biela la trasmite al cigüeñal, de donde se toma para su utilización.

**Fase 4:** Se abre la válvula de escape y el pistón se mueve hacia el PMS, expulsando los gases producidos durante la combustión y quedando preparado para empezar un nuevo ciclo.

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Otto

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

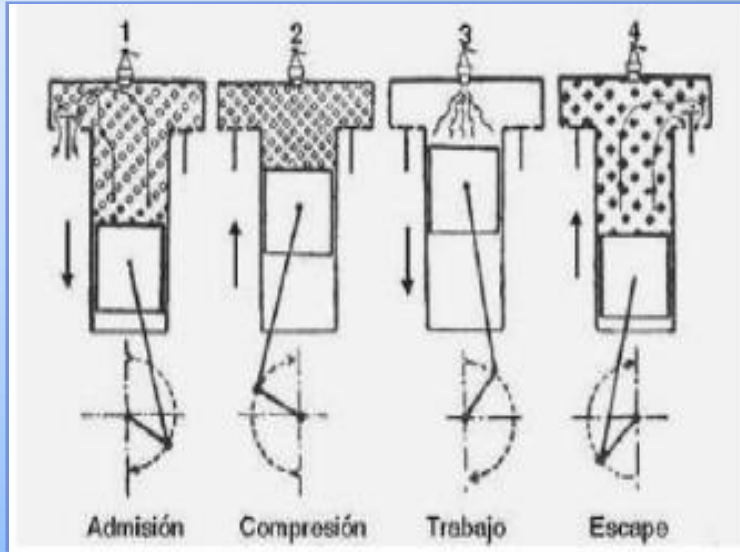
Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

# CICLO OTTO

## Principio



1-2 *Compresión Isoentrópica.*

2-3 *Suministro de calor a volumen constante.*

3-4 *Expansión Isoentrópica.*

4-1 *Cesión de calor a volumen constante.*

## Análisis Energético

$$q + w = \Delta u$$

$$w = \Delta u$$

$$q = \Delta u$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Otto

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones



# CICLO OTTO

## Análisis Energético

Para aire estándar frío

$$q_{sum} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2)$$

y

$$q_{ced} = u_4 - u_1 = c_v (T_4 - T_1)$$

$$\eta_t = \frac{w_{net,sal}}{q_{sum}} = \frac{C_V (T_3 - T_2) - C_V (T_4 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{T_4 / T_1 - 1}{T_3 / T_2 - 1}$$

Isoentrópicamente se tiene que  $V_1 = V_4$  y  $V_2 = V_3$  entonces:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{K-1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1}$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Recíprocas

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Otto

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Otto

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

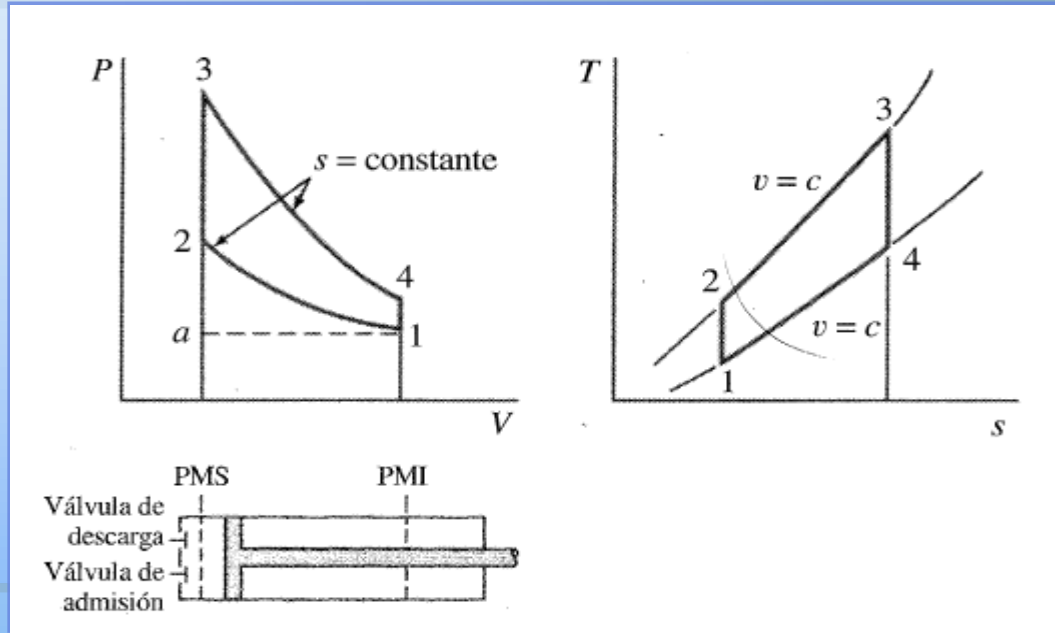
Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## Diagrama P-v y T-s



## Presión Media Efectiva

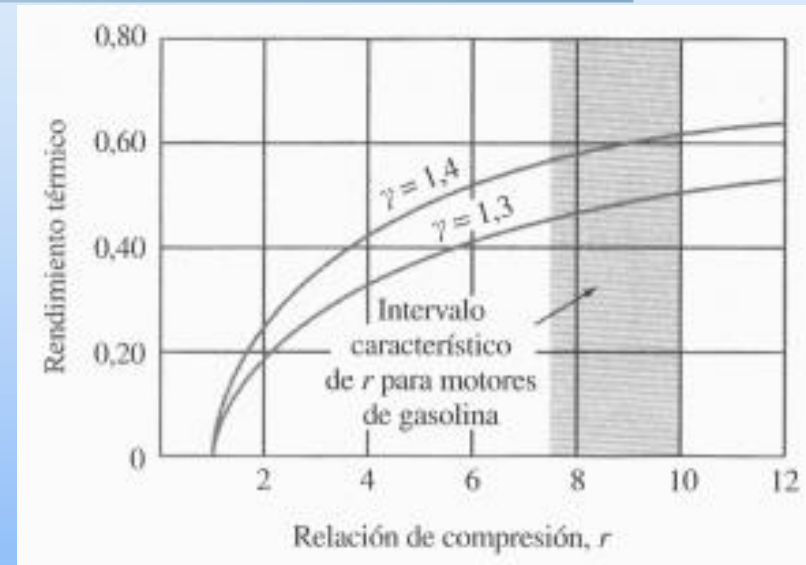
$$PME = \frac{W_{NETO}}{CILINDRADA}$$



# CICLO OTTO

$$\eta_{T,Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{K-1} = 1 - \frac{1}{r^{K-1}}$$

$$r \equiv \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$$



Las temperaturas en los estados 2 y 4 se obtienen a partir de:

$$v_{r4} = v_{r3} \frac{V_4}{V_3} = r v_{r3}$$

$$v_{r2} = v_{r1} \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_{r1}}{r}$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Otto

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones





# CICLO DIESEL

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Recíprocas

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Diesel

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## Principio

Los motores que operan bajo este ciclo se conocen como Motores de Encendido por Compresión. Este difiere del ciclo Otto en que la combustión ocurre a presión constante. La mayoría de los motores diesel tienen también cuatro tiempos, si bien las fases son diferentes de las de los motores de gasolina. Sólo el aire se comprime durante el proceso de compresión, con lo cual se elimina la posibilidad de autoencendido, por tanto, son diseñados para trabajar a relaciones de compresión mucho más altas, por lo común entre 12 y 24. Se sustituye la bujía por un inyector.

## Análisis Energético

$$q_{Sum} = C_P (T_3 - T_2)$$

$$q_{Ced} = C_V (T_4 - T_1)$$

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Diesel

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

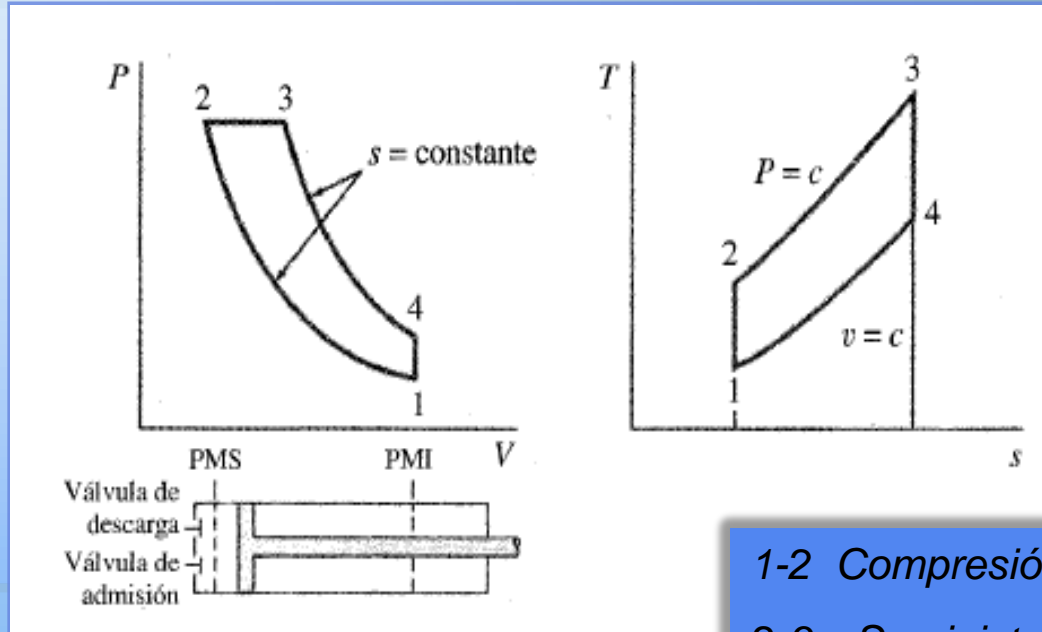
Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## Diagrama P-v y T-s



## Presión Media Efectiva

$$PME = \frac{W_{NETO}}{CILINDRADA}$$

1-2 Compresión Isoentrópica.

2-3 Suministro de calor a presión constante.

3-4 Expansión Isoentrópica.

4-1 Cesión de calor a volumen constante.



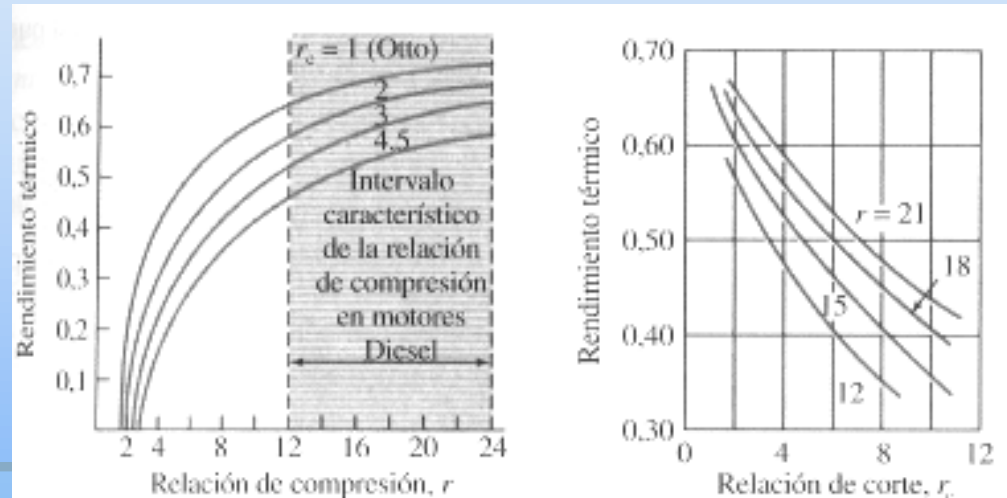
# CICLO DIESEL

$$\eta_{t,Diesel} = \frac{q_{sum} - q_{Ced}}{q_{sum}} = \frac{C_P(T_3 - T_2) - C_V(T_4 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{K(T_3 - T_2)}$$

Relación de Corte  $r_C$  : Tomando como referencia el diagrama P-V, se define como el cociente entre el volumen  $V_3$  posterior al suministro de calor y el volumen  $V_2$  anterior a ese suministro.

$$r_C \equiv \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

$$v_{r4} = v_{r3} \frac{V_4}{V_3} = \frac{r v_{r3}}{r_c}$$



$$y \quad v_{r2} = v_{r1} \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_{r1}}{r} \quad r = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{Relación de compresión}$$

$v_r$  son función de la temperatura.

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

Introducción

Ciclo de Gas de Carnot

Consideraciones para ciclos de aire estándar

Relaciones Isoentrópicas

Máquinas Reciprocantes

Relación de Compresión

Presión Media Efectiva

Motores

Ciclos de Aire Cerrados

Ciclo Diesel

Principio

Análisis Energético

Diagrama P-V y T-s

Presión media efectiva

Rendimiento Térmico

Ciclos de Aire Abiertos

Conclusiones

## ***Referencias bibliográficas***

- •Avellone. Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw-Hill.
- •Irving Granet. Termodinámica. PHH. Prentice May. Tercera Edición.
- •Levenspiel, O (2001). Fundamentos de Termodinámica. Pearson Educación.
- •Potter, M; Somerton, C (2004). Termodinámica para Ingenieros. Editorial McGraw-Hill.
- •Van Wylen G, Sonntag R. (1999). Fundamentos de Termodinámica. México: Limusa.
- •Wark K; Richards D (2001). Termodinámica. España: Mc Graw Hill.
- •Yunus C; Boles, M (2006). Termodinámica. México: Mc Graw Hill.