



**UC** | Chile

# Termodinámica (FIS1523)

## Ciclos de potencia

**Felipe Isaule**

[felipe.isaule@uc.cl](mailto:felipe.isaule@uc.cl)

Lunes 16 de Junio de 2025

# Clase 26: Ciclos de potencia

- Tipos de ciclos.
- Ciclos de potencia ideales.
- Máquinas reciprocantes.

- Bibliografía recomendada:
  - Cengel (9-1, 9-2, 9-3, 9-4).

# Clase 26: Ciclos de potencia

- **Tipos de ciclos.**
- Ciclos de potencia ideales.
- Máquinas reciprocantes.

# Ciclos de potencia y de refrigeración

- Dos áreas importantes de aplicaciones de la termodinámica en ingeniería son la generación de potencia y refrigeración.
- Usualmente, los dispositivos que se utilizan para tales objetivos operan en un ciclo.
- Por tanto, podemos dividir los ciclos en dos categorías:

- **Ciclos de potencia:**

Se utilizan en dispositivos que producen una salida neta de potencia (motores o máquinas térmicas).

- **Ciclos de refrigeración:**

Se utilizan en dispositivos que consumen una potencia neta de entrada para refrigerar.

# Ciclos de gas y ciclos de vapor

- Los **ciclos termodinámicos** también se pueden **clasificar** según el **tipo de fluido de trabajo**:

- **Ciclos de gas:**

Se utiliza un **fluido** que se **mantiene** en forma de **gas** en **todo el ciclo**.

- **Ciclos de vapor:**

Se utiliza un **fluido** que **existe** en forma de **vapor** y en forma **líquida** en **distintas partes del ciclo**.

# Ciclos de combustión interna y externa

- Otra forma adicional de **clasificar** los **ciclos termodinámicos** es:

- **Ciclos de combustión interna:**

La **combustión** se realiza dentro de las fronteras del sistema (ej: motor de un automóvil).

- **Ciclos de combustión externa:**

El **calor** se **suministra** al fluido **desde** una **fuentes externa** como un quemador, un reactor nuclear, e incluso el Sol (ej: centrales termoeléctricas).

# Ciclos de potencia de gas

- En **esta unidad** estudiaremos **ciclos de potencia de gas**.
- Es decir, **ciclos** que buscan **producir** una **potencia neta de salida** y que operan con **gas** durante **todo el ciclo**.
- Ciclos de potencia de vapor y ciclos de refrigeración no serán estudiados en este curso.

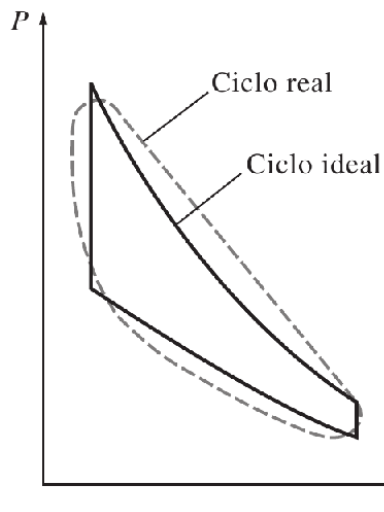
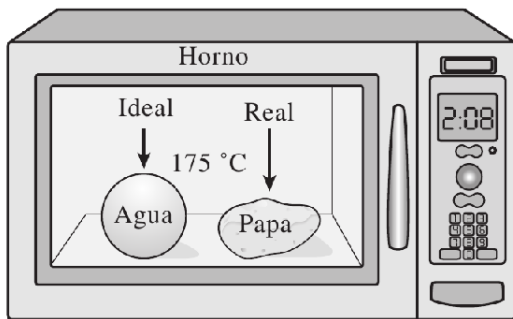
# Clase 26: Ciclos de potencia

- Tipos de ciclos.
- **Ciclos de potencia ideales.**
- Máquinas reciprocantes.



# Ciclos de potencia ideales

- Como ya sabemos, los **ciclos reales** son **difíciles de analizar** debido a la **presencia de efectos complicados**.
- **Ejemplos de efectos difíciles** de incluir son la **fricción** y el **tiempo que tarda un sistema en llegar al equilibrio**.



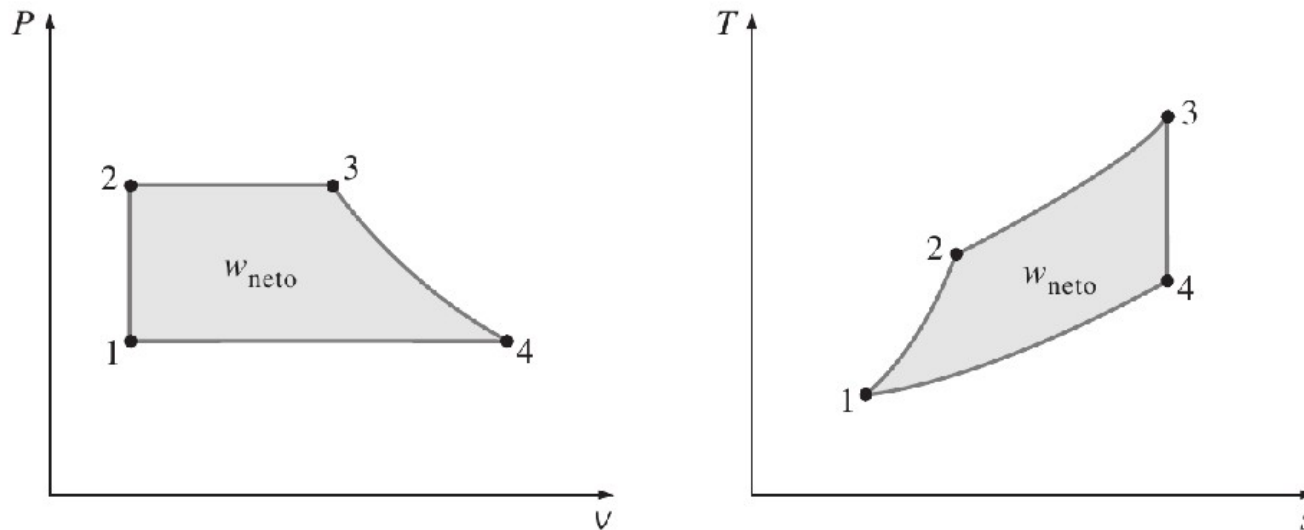
- Llamaremos **ciclos ideales** a ciclos reales a los que se le han **eliminado las irreversibilidades y complejidades internas**.
- Los **ciclos ideales** son internamente **reversibles**.
- Sin embargo, **no son necesariamente totalmente reversibles** como sí lo es el Ciclo de Carnot.

# Ciclos de potencia ideales

- Las **idealizaciones** utilizadas se pueden resumir en:
  1. El ciclo no implica **ninguna fricción**. Por lo tanto, el fluido de trabajo no experimenta ninguna caída de presión.
  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**.
- **En general** también podemos **despreciar** las **energías cinéticas y potenciales**.
- Una **excepción a lo anterior** son las **toberas y difusores**, ya que precisamente buscan cambiar mucho la velocidad.

# Diagramas $P-\nu$ y $T-s$

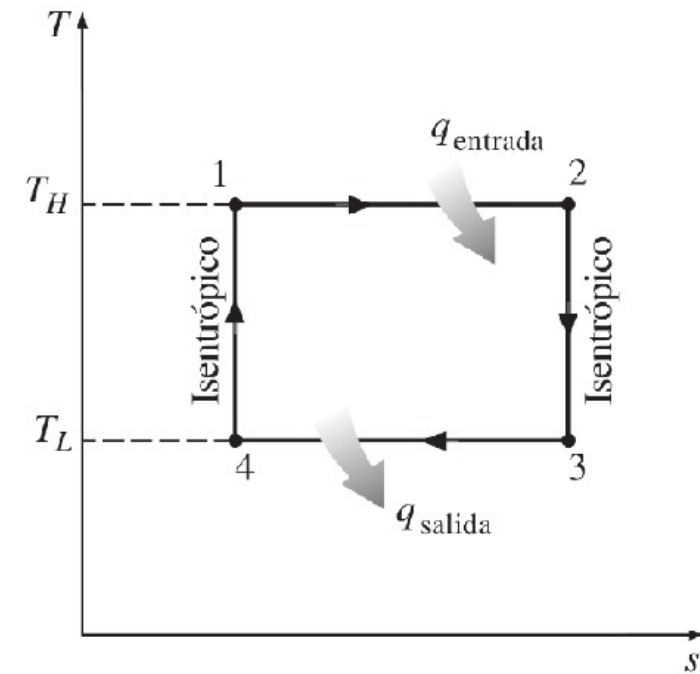
- Recordemos que en los diagramas  $P-\nu$  y  $T-s$  el **área encerrada** corresponde al **trabajo neto producido**.



- En un ciclo, como la energía no cambia, el **trabajo neto** es **equivalente** a la **transferencia de calor neto**.

# Diagramas $P$ - $v$ y $T$ - $s$

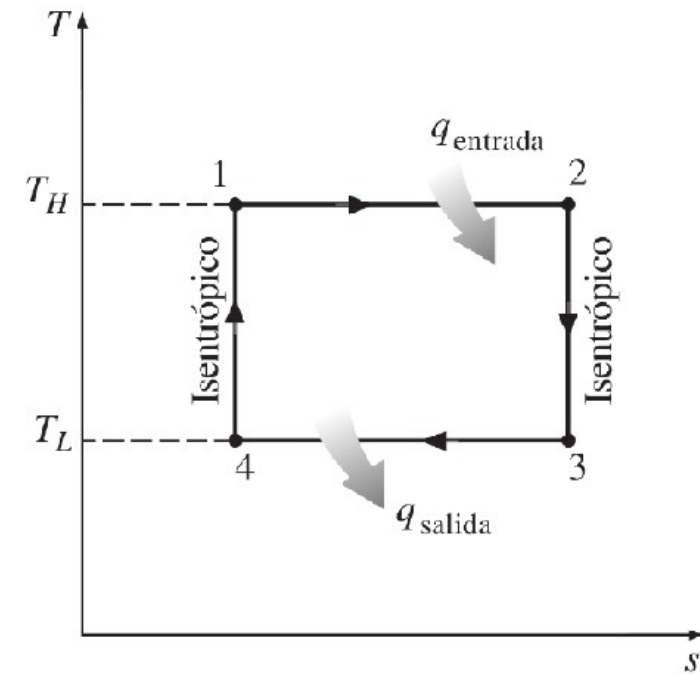
- Los diagramas  $T$ - $s$  son particulares útiles para los ciclos de potencia.
  - En un proceso de adición de calor la entropía aumenta.
  - En un proceso de rechazo de calor la entropía disminuye.
  - En un proceso isentrópico (internamente reversible y adiabático) la entropía se mantiene constante.



# Diagramas $P$ - $v$ y $T$ - $s$

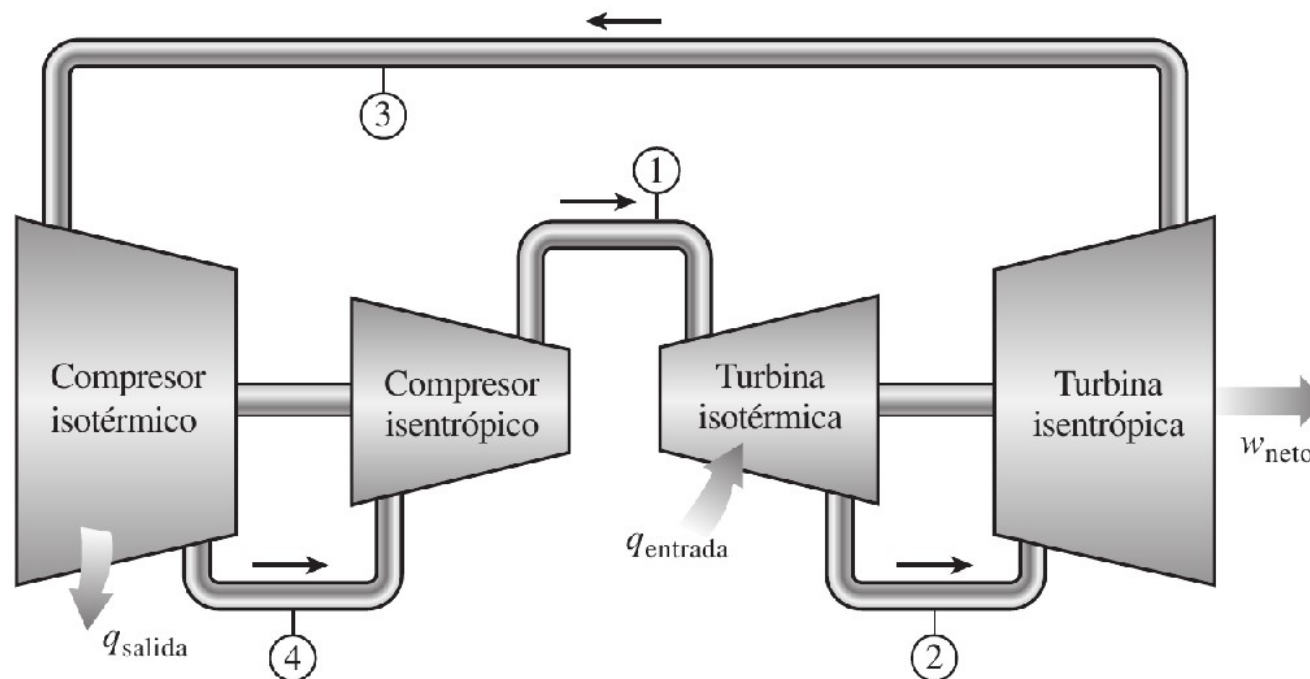
- Además, en los diagramas  $T$ - $s$  la división entre el área encerrada y el área bajo la curva del proceso de adición otorga la eficiencia termodinámica:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}}.$$



# Ciclo de Carnot revisitado

- En clases pasadas vimos que el **ciclo de Carnot** puede **ejecutarse** en un **sistema cerrado cilindro émbolo**.
- Sin embargo, **también puede ejecutarse** en un **sistema que opera de manera estacionaria**.



# Ciclo de Carnot revisitado

- Ahora podemos visitar la eficiencia del ciclo de Carnot.
- El calor sólo se transfiere en los procesos  $1 \rightarrow 2$  y  $3 \rightarrow 4$ . Al ser procesos isotérmicos, se tiene que:

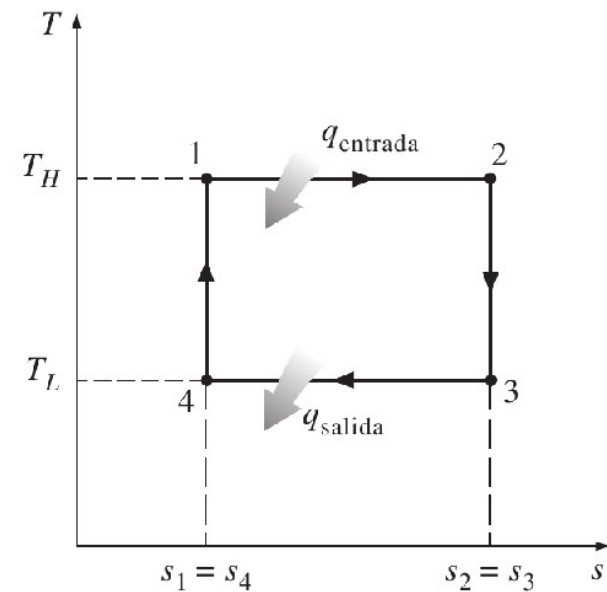
$$q_{\text{entrada}} = T_H(s_2 - s_1), \quad q_{\text{salida}} = T_L(s_3 - s_4).$$

- Los procesos  $2 \rightarrow 3$  y  $4 \rightarrow 1$  son isentrópicos, por tanto  $s_3 = s_2$  y  $s_4 = s_1$ . Entonces:

$$q_{\text{salida}} = T_L(s_2 - s_1).$$

- La eficiencia:

$$\eta = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} \longrightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}}.$$



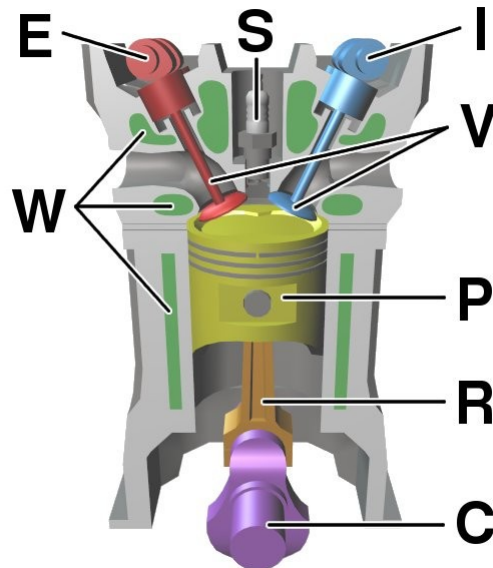
# Clase 26: Ciclos de potencia

- Tipos de ciclos.
- Ciclos de potencia ideales.
- **Máquinas reciprocantes.**



# Máquinas reciprocantes

- Una **máquina reciprocante** es un **dispositivo cilindro-émbolo** que se usa como **fuentes de poder** en muchos motores:
  - Automóviles, aviones, barcos, etc.
- También se conocen como **motores de pistón** o **motores de émbolo**.



Componentes típicos de un motor de émbolo de cuatro tiempos.

E - Árbol de levas del escape

I - Árbol de levas de la admisión

S - Bujía en los diésel inyector

V - Válvulas de asiento

P - Pistón

R - Biela

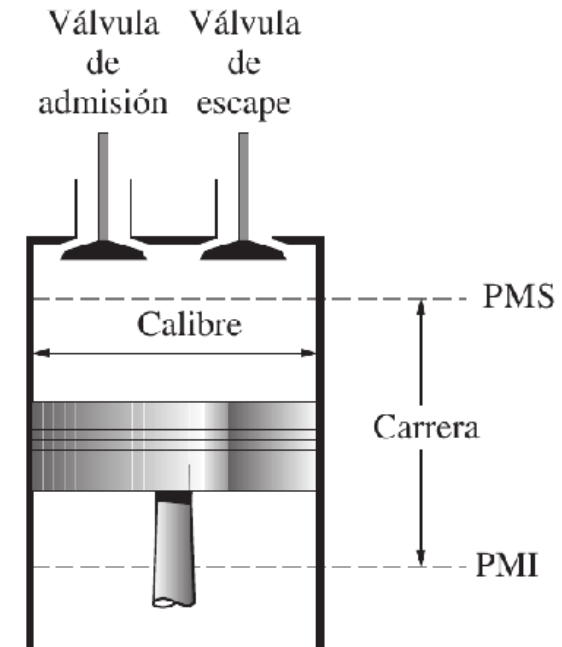
C - Cigüeñal

W - Camisa de agua de refrigeración

# Máquinas reciprocantes

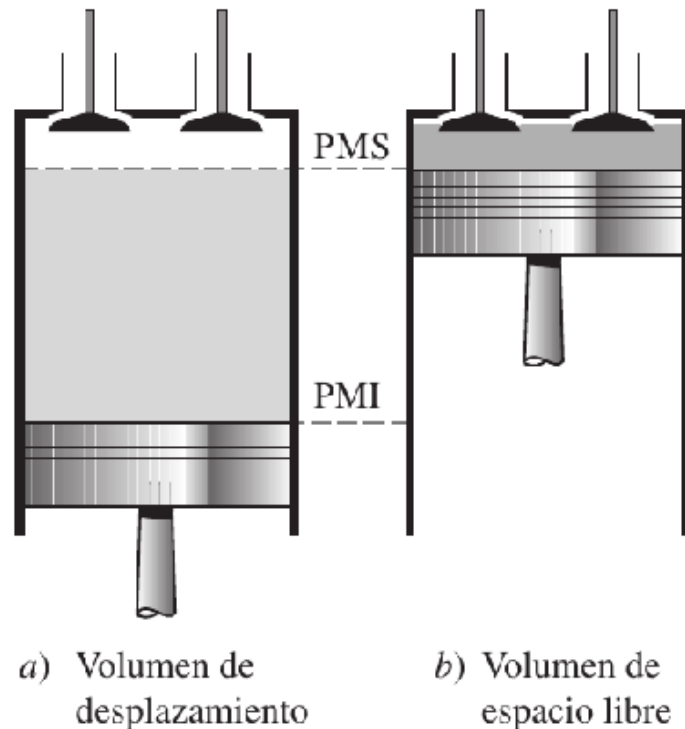
- Componentes básicos:

- **Punto muerto superior (PMS)**: la posición del **émbolo** cuando se forma el **menor volumen** en el cilindro.
- **Punto muerto inferior (PMI)**: la posición del **émbolo** cuando se forma el **volumen más grande** en el cilindro.
- **Carrera del motor**: La **distancia** más larga **entre el PMS y el PMI** que el émbolo puede recorrer en una dirección.
- **Calibre**: **díámetro del pistón**.
- **Válvula de admisión**: **Entrada** del aire o mezcla aire-combustible.
- **Válvula de escape**: **Salida** de los productos de la combustión.



# Máquinas reciprocantes

- El **volumen desplazado** por el émbolo cuando se mueve entre el PMS y el PMI se llama **volumen de desplazamiento**.
- El **volumen mínimo** formado en el cilindro cuando el émbolo está en el **PMS** se denomina **volumen de espacio libre**.



# Máquinas reciprocantes

- Llamamos **relación de compresión** del motor a la **relación** entre el **volumen máximo y mínimo** formado en el cilindro:

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

- También definimos la **presión media efectiva** (PME) como:

$$\text{PME} = \frac{W_{\text{neto}}}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{w_{\text{neto}}}{\nu_{\max} - \nu_{\min}}.$$

- Es una **presión ficticia** que **produciría la misma cantidad de trabajo neto** que el **producido** durante el **ciclo real**:

$$W_{\text{neto}} = \text{PME} \times \underbrace{\text{Área émbolo} \times \text{Carrera.}}_{\text{Volumen de desplazamiento}}$$

# Máquinas reciprocantes

- Las **máquinas reciprocantes** se pueden **clasificar** según **cómo se inicie el proceso de combustión**.

→ Máquinas de **encendido** (ignición) **por chispa** (ECH):

La **combustión** de la mezcla de aire y combustible se **inicia** con una **chispa en la bujía** (Ciclo de Otto).

→ Máquinas de **encendido** (ignición) **por compresión** (ECOM):

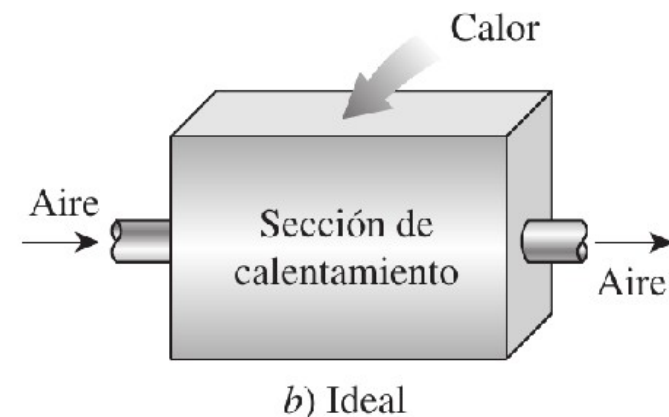
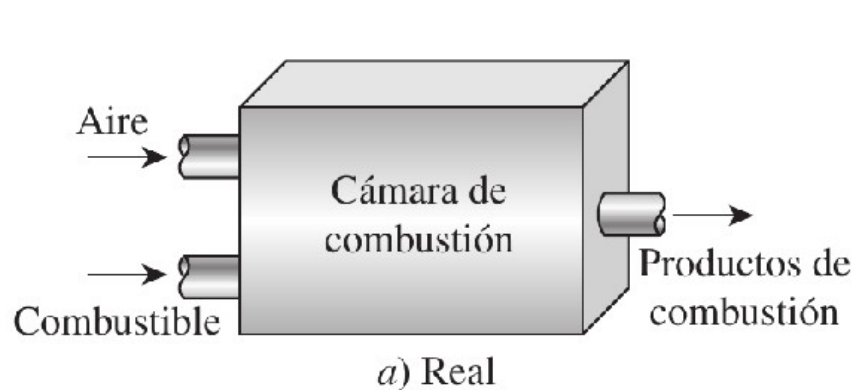
La mezcla de aire y combustible se **autoenciende** como resultado de **comprimirla arriba** de su **temperatura de autoencendido** (Ciclo de Diesel).

# Suposiciones de aire estándar

- En general **trabajaremos con máquinas de combustión interna**, es decir, donde el **combustible se quema dentro de las fronteras del sistema**.
- A pesar que el **fluido de trabajo** va cambiando durante el ciclo, el fluido **se parece mucho al aire**.
- Las **máquinas de combustión interna** operan en **ciclos abiertos**. Es decir, el **fluido de trabajo no se somete a un ciclo completo** (ej: gases de escape).
- Para **simplificar el análisis** de ciclos de potencia se utilizan **aproximaciones llamadas suposiciones de aire estándar**.

# Suposiciones de aire estándar

- Las suposiciones de aire estándar son:
  1. El fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado como un gas ideal.
  2. Todos los procesos que integran el ciclo son internamente reversibles.
  3. El proceso de combustión es sustituido por uno de adición de calor desde una fuente externa.
  4. El proceso de escape es sustituido por un uno de rechazo de calor que regresa el fluido de trabajo a su estado inicial.



# Suposiciones de aire estándar frío

- **Con frecuencia** también se emplea la **suposición** de que el **aire** tiene **calores específicos constantes**.
- El **calor específico** se determina a **temperatura ambiente** (25°C).
- Al añadir esta aproximación adicional hablamos de **suposiciones de aire estándar frío**.

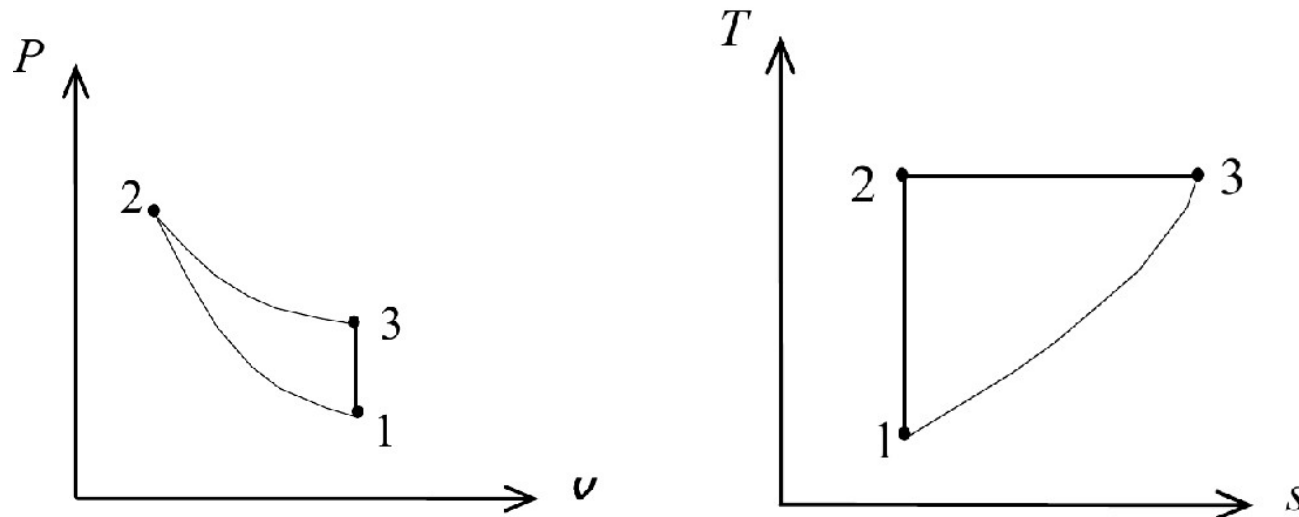


# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
  - Trace los **diagramas  $P-\nu$  y  $T-s$**  para el ciclo.
  - Determine la **temperatura máxima** del ciclo.
  - Calcule el **trabajo de expansión**.
  - Calcule el **trabajo de compresión**.
  - Calcule la **eficiencia térmica** del ciclo.

# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
- Trace los **diagramas  $P-\nu$  y  $T-s$**  para el ciclo.



# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
- Determine la **temperatura máxima** del ciclo.

La temperatura máxima ocurre en el proceso 2-3:

$$T_{\max} = T_2 = T_3.$$

Utilizamos que es un **gas ideal** y que el proceso 1-2 es **isentrópico** (primera relación isentrópica):

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{s=\text{cte}} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1}$$

Obtenemos:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{k-1}$$

De la relación de compresión:

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{\nu_1}{\nu_2}.$$

Entonces:

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 r^{k-1} \\ &= (273 + 27)^\circ\text{K} \cdot 6^{1.5-1} \end{aligned}$$

$$\longrightarrow \boxed{T_{\max} = 734.8^\circ\text{K}}$$

# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
- Calcule el **trabajo de expansión**.

Simplemente calculamos el trabajo de frontera en el proceso 2-3 (proceso de expansión):

$$w_{\text{exp}} = \int_{\nu_2}^{\nu_3} P d\nu = \int_{\nu_2}^{\nu_3} \frac{RT}{\nu} d\nu$$
$$= RT_2 \ln(\nu_3/\nu_2) = RT_2 \ln(r)$$

$$= 0.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} 734.8 \text{ } ^\circ\text{K} \ln(6) \longrightarrow \boxed{w_{\text{exp}} = 395.0 \text{ kJ/kg}}$$

# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
- Calcule el **trabajo de compresión**.

Imponemos conservación de la energía en el proceso 1-2 (proceso de compresión):

$$\cancel{q_{1 \rightarrow 2}} - \underbrace{w_{1 \rightarrow 2}}_{+w_{\text{compr}}} = \Delta u$$

Isentrópico

$$\longrightarrow w_{\text{compr}} = c_V(T_2 - T_1)$$

Remplazando:

$$w_{\text{compr}} = 0.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} (734.8 - (273 + 27)) ^\circ\text{K}$$

$$\longrightarrow \boxed{w_{\text{compr}} = 260.9 \text{ kJ/kg}}$$

# Ejemplo:

- Un **ciclo de potencia** con **gas ideal** se lleva a cabo dentro de un **sistema cerrado** de **émbolo-cilindro** y consiste de tres procesos. El **proceso 1-2** es una **compresión isentrópica** desde una **temperatura inicial** de **27°C**, con una **relación de compresión** de **6**. El **proceso 2-3** es una **expansión isotérmica** al **volumen inicial**. El **proceso 3-1** es un **rechazo de calor a volumen constante** al **estado inicial**. Suponga que el **gas** tiene **propiedades constantes** con  $c_v=0.6$  kJ/kg°K,  $c_p=0.9$  kJ/kg°K,  $R=0.3$  kJ/kg°K y  $k=1.5$ .
- Calcule la **eficiencia térmica** del ciclo.

Primero calculamos el trabajo neto:

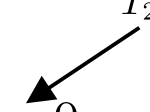
$$\begin{aligned}w_{\text{neto}} &= w_{\text{exp}} - w_{\text{compr}} \\&= (395.0 - 260.9) \text{ kJ/kg} \\&= 134.1 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

La eficiencia:

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

El calor de entrada se obtiene al imponer conservación de la energía en el proceso 2-3:

$$\begin{aligned}q_{\text{entrada}} - w_{\text{salida}} &= \Delta u \\&= c_v(T_3 - T_2) = 0\end{aligned}$$

$T_2 = T_3$  

El trabajo de salida del proceso 2-3 es el trabajo de expansión:

$$\longrightarrow q_{\text{entrada}} = w_{\text{exp}}$$

Entonces:

$$\eta = \frac{134.1}{395} \longrightarrow \boxed{\eta = 0.339}$$

# Conclusiones

- Definimos los **ciclos de potencia de gas** y sus versiones **ideales**.
- Revisitamos el **Ciclo de Carnot**.
- Definimos las **máquinas reciprocantes**.
- Próxima clase:
  - Ciclo de Otto.