

# Ciclos Termodinámicos

Material elaborado por Juan Carlos Posadas Basurto





<b>Espacio Académico:</b>	Facultad de Ingeniería
<b>Horas teóricas:</b>	4
<b>Horas prácticas:</b>	1
<b>Total de horas:</b>	5
<b>Créditos:</b>	9
<b>Tipo de Unidad de Aprendizaje:</b>	Curso
<b>Carácter de la Unidad de Aprendizaje:</b>	Obligatoria
<b>Núcleo de formación:</b>	Sustantivo
<b>Programas educativos o espacios académicos en los que se imparte:</b>	Ingeniería Mecánica

**Programa de estudio: Ingeniería Térmica**



## Presentación

La Unidad de Aprendizaje Ingeniería Térmica es obligatoria y se sugiere cursarla en el sexto periodo. Su antecedente es Termodinámica, donde se revisan los principios de la termodinámica, 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. El discente que aprueba la Unidad de Aprendizaje Termodinámica es capaz de analizar ciclos termodinámicos.



## Propósito

El propósito de la Unidad de Aprendizaje Ingeniería Térmica es que el discente aplique los principios y métodos de la Termodinámica para la elaboración de análisis termodinámicos, usando los ciclos termodinámicos para la generación de la energía, la refrigeración y la calefacción de sistemas abiertos y cerrados, en cualquiera de sus tres aplicaciones: Industrial, doméstica y científica. Para lograrlo se sugiere la estructura siguiente:



## Estructura

- Ciclos de potencia.
  - Ciclo de Stirling
  - Ciclo de Ericsson
  - Ciclo de Otto
  - Ciclo de Diésel.
  - Ciclo Dual
  - Ciclo de Brayton
  - Ciclo de Rankine
- Ciclos de refrigeración.
  - Por compresión de un gas.
  - Por compresión de un vapor.
  - Por absorción de un vapor.



## Contenido

La información inicial: simbología, superíndices y subíndices, son para referencia del profesor al explicar los ciclos.

Después se revisan las relaciones termodinámicas útiles para realizar balances energéticos y que se estudiaron en la Unidad antecedente. Se presentan todos los ciclos termodinámicos que competen al curso, en diagramas Ts o pv, así como los balances de energía para obtener trabajo, calor, flujos de masa y rendimientos.



## Contenido (continuación)

El docente podrá explicar el funcionamiento de cada uno de los ciclos para que el discente, con los conocimientos de Termodinámica, pueda corroborar los balances energéticos y los rendimientos. No se dan definiciones, ni existe texto, ya que toda la información requerida para realizar balances energéticos fue dada en el curso antecedente.



## Contenido (continuación)

El orden de la presentación es el siguiente:

- Ecuaciones termodinámicas
- Ciclos de potencia estándar de aire
- Ciclos de potencia reales
- Ciclos de potencia que utilizan vapor de agua
- Ciclos de refrigeración

El docente debe tener conocimiento de los dispositivos que componen cada uno de los sistemas de potencia y de refrigeración así como su funcionamiento y características.





# Simbología

$C$ : Velocidad lineal, m/s.

$COP$ : Coeficiente de operación o rendimiento.

$c_p$ : Calor específico a presión constante, kJ/(kg·K).

$c_v$ : Calor específico a volumen constante, kJ/(kg·K).

$d$ : Derivada total.

$e$ : Suma de energías específicas interna, cinética y potencial, kJ/kg.

$E$ : Suma de energías extensivas interna, cinética y potencial, kJ.

$g$ : Aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>.

$h$ : Entalpía específica, kJ/kg.

$H$ : Entalpía extensiva, kJ.

$I$ : Irreversible.

$k$ : Constante adiabática.

$\ln$ : Logaritmo natural.

$M$ : Masa molar, kmol.

$m$ : masa gravitacional, kg.

$\dot{m}$ : Flujo de masa, kg/s.

$n$ : Número de moles, mol.

$n_p$ : Constante politrópica

$P$ : Presión, kPa.

$q$ : Calor específico, kJ/kg.

$Q$ : Calor extensivo, kJ.

$\dot{q}$ : Potencia térmica, kW.

$r$ : Relación.

$R$ : Constante del gas en estudio, kJ/(kg·K).

$\bar{R}$ : Constante universal de los gases, kJ/(kmol·K).

$s$ : Entropía específica, kJ/kg.

$S$ : Entropía extensiva, kJ/(kg·K).

$T$ : Temperatura, K.

$t$ : tiempo, s.

$u$ : Energía interna específica, kJ/kg.

$U$ : Energía interna extensiva, kJ.

$v$ : Volumen específico, m<sup>3</sup>/kg.

$V$ : Volumen extensivo, m<sup>3</sup>.

$\bar{v}$ : Volumen molar, m<sup>3</sup>/kmol.

$w$ : Trabajo específico, kJ/kg.

$W$ : Trabajo extensivo, kJ.

$\dot{w}$ : Potencia mecánica, kW.

$y$ : porcentaje de vapor de agua.

$z$ : Altura respecto a un sistema de referencia, m



## Letras griegas y operadores matemáticos

$\Delta$ : Incremento.

$\partial$ : Derivada parcial.

$\delta$ : Derivada inexacta.

$\eta$ : Eficiencia.

$\int$ : Integral simple.

X: Exergía extensiva, kJ.

$\chi$ : Factor de concentración de amoníaco.

$\phi$ : Integral de  $[c_p(T)/T]dT$ .

$\varphi$ : Exergía específica de un sistema cerrado, kJ/kg.

$\psi$ : Exergía específica de un sistema abierto, kJ/kg.

$\Sigma$ : Suma.



## Subíndices y superíndices

### Subíndices

1, 2, 3, 4, 5,...: Estado termodinámico.

*I*: Referencia al primer principio de la termodinámica.

*II*: Referencia al segundo principio de la termodinámica.

*a*: Aire.

*c*: Corte.

*e*: Entrada.

*f*: Combustible.

*f*: Líquido saturado.

*g*: Vapor saturado.

*gen*: Generada.

*0*: Condiciones ambientales.

*pr*: punto de referencia

*r*: refrigerante

*s*: Salida.

*v*: Compresión.

*va*: Vapor de agua

*VC*: Volumen de control.

### Superíndices

' : Líquido.

" : Vapor.

# **Ecuaciones termodinámicas**

Sistemas abiertos y cerrados





## Ecuación de Estado

$$Pv = RT$$

$$v = \frac{V}{m}$$

$$R = c_p - c_v$$

$$k = c_p / c_v$$

$$P\bar{v} = \bar{R}T$$

$$\bar{v} = \frac{V}{n}$$

$$\bar{R} = MR$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

Si  $c_p$  y  $c_v$   
son constantes

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$c_p$  y  $c_v$  en función  
de la temperatura

$$\Delta h = \int_1^2 c_p (T) dT$$

$$\Delta u = \int_1^2 c_v (T) dT$$

$$H = U + PV$$

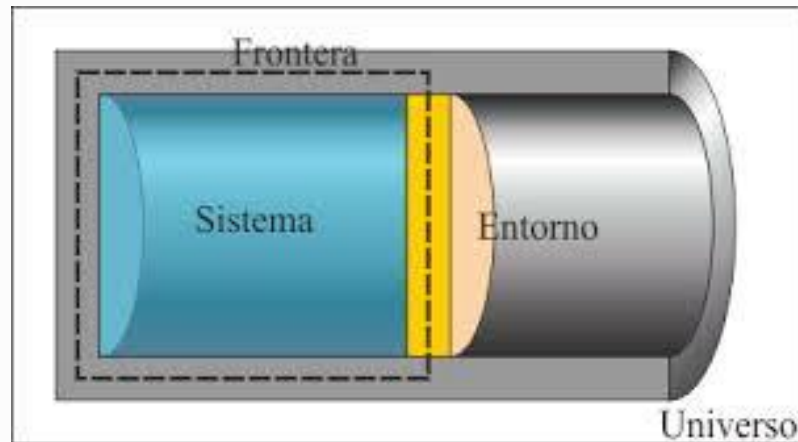
$$h = u + Pv$$



# Trabajo Termodinámico

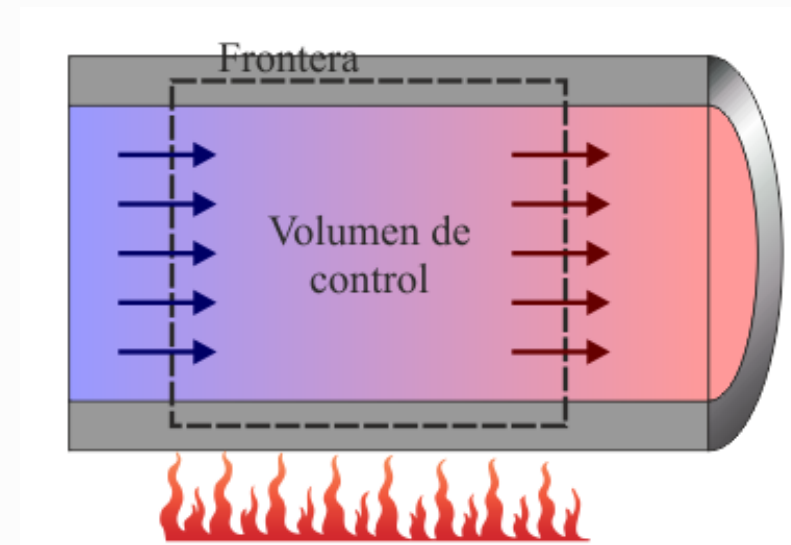
## Sistema cerrado

- $w = \int Pdv$



## Sistema abierto

- $w = - \int v dP$





## Cambio de entropía

- Desigualdad de Clausius:  $dS \geq \int \frac{\delta Q}{T}$
- Cambio de entropía para  $c_p = c_p(T)$
- $\Delta s = \int_1^2 \frac{c_p}{T} (T) dT - \int_1^2 \frac{v}{T} dp = \phi_2 - \phi_1 - R \ln \frac{p_2}{p_1}$
- Cambio de entropía para  $c_p = \text{constante}$
- $\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$



## Cambio de entropía (continuación)

- Cambio de entropía para  $c_v = c_v(T)$
- $$\Delta s = \int_1^2 \frac{c_v}{T}(T)dT + \int_1^2 \frac{p}{T} dv$$
- Cambio de entropía para  $c_v = \text{constante}$
- $$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$





## Relaciones termodinámicas en procesos constantes

Isométrico  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$

Isotérmico  $\frac{P_2}{P_1} = \frac{v_1}{v_2}$

Isobárico  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$

Adiabático  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k ; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} ; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$

Politrópico  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n_p} ; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n_p}{n_p-1}} ; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n_p-1}$



## Primer principio de la Termodinámica

- Sistemas cerrados:
  - $Q + U_1 + m \frac{c_1^2}{2} + mgz_1 = W + U_2 + m \frac{c_2^2}{2} + mgz_2$
  - $q + u_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 = w + u_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2$
- Sistemas abiertos:
  - $Q + H_1 + m \frac{c_1^2}{2} + mgz_1 = W + H_2 + m \frac{c_2^2}{2} + mgz_2$
  - $q + h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 = w + h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2$



## Rendimientos del primer principio de la Termodinámica

- $\eta_I = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{suministrado}}}$
- $COP_{\text{Refrigerador } I} = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{W_{\text{neto}}}$
- $COP_{\text{Bomba térmica } I} = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} = \frac{Q_{\text{expulsado}}}{W_{\text{neto}}}$



## Segundo principio de la Termodinámica

- Sistemas cerrados:
- $\sum_1^i \frac{Q_i}{T_i} + S_{generada} = \Delta S_{sistema}$
- $\sum_1^i \frac{q_i}{T_i} + s_{generada} = \Delta S_{sistema}$
- Sistemas abiertos:
- $\sum_1^i \frac{Q_i}{T_i} + \sum m_e s_e - \sum m_s s_s + S_{generada} = (S_2 - S_1)_{VC}$
- $\sum_1^i \frac{\dot{q}_i}{T_i} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{generada} = \frac{dS_{VC}}{dt}$



## Rendimientos del segundo principio de la Termodinámica

- $\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_{Carnot I}}$        $\eta_{compresor} = \frac{w_{ideal}}{w_{real}}$
- $\eta_{bomba} = \frac{w_{ideal}}{w_{real}}$        $\eta_{turbina} = \frac{w_{real}}{w_{ideal}}$
- $COP_{Refrigerador II} = \frac{COP_{Refrigerador I}}{COP_{Refrigerador Carnot I}}$
- $COP_{Bomba\ térmica II} = \frac{COP_{Bomba\ térmica I}}{COP_{Bomba\ térmica Carnot I}}$



## Exergía de un sistema cerrado

- $X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m\frac{c^2}{2} + mgz_1$
- $\varphi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{c^2}{2} + gz_1$
- $\varphi = (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$



## Cambio de exergía de un sistema cerrado

- $\Delta X = (X_2 - X_1) = m(\varphi_2 - \varphi_1)$   
 $= (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$
- $\Delta X = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) +$   
 $m \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1)$
- $\Delta \varphi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} +$   
 $g(z_2 - z_1)$
- $\Delta \varphi = (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1)$



## Balance de exergía de un sistema cerrado

- $\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i - [W - P_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_{gen} = X_2 - X_1$
- $\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i - \left[\dot{W} - P_0 \frac{dV_{sistema}}{dt}\right] - T_0 \dot{S}_{gen} = \frac{dX_{sistema}}{dt}$





## Exergía de un sistema abierto

- $X_{\text{fluido en movimiento}} = X_{\text{fluido no en movimiento}} + X_{\text{flujo}}$
- $X_{\text{flujo}} = PV - P_0V = (P - P_0)V$
- $X_{\text{fluido en movimiento}} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + m\frac{c^2}{2} + mgz$
- $\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{c^2}{2} + gz$

## Cambio de exergía de un sistema abierto

- $\Delta\psi = \psi_2 - \psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$



## Balance de exergía de sistemas abiertos

- $\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q - [W - P_0(V_2 - V_1)] + \sum_{entrada} m\psi - \sum_{salida} m\psi - X_{destruida} = (X_2 - X_1)_{VC}$
- $\sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right] + \sum_{entrada} \dot{m}\psi - \sum_{salida} \dot{m}\psi - \dot{X}_{destruida} = \frac{dX_{VC}}{dt}$
- $\dot{X}_{destruida} = I = T_0 S_{gen}$

# Ciclos de potencia

Estándar de aire





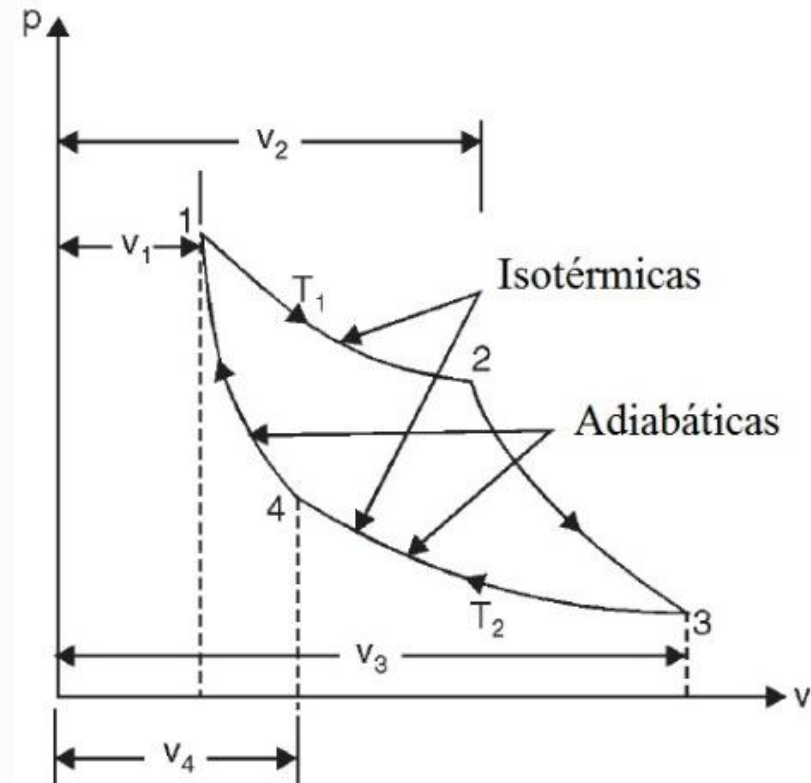
## Ciclo de Carnot

$$w_{neto} = RT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + RT_2 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)$$

$$q_{1-2} = RT_2 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

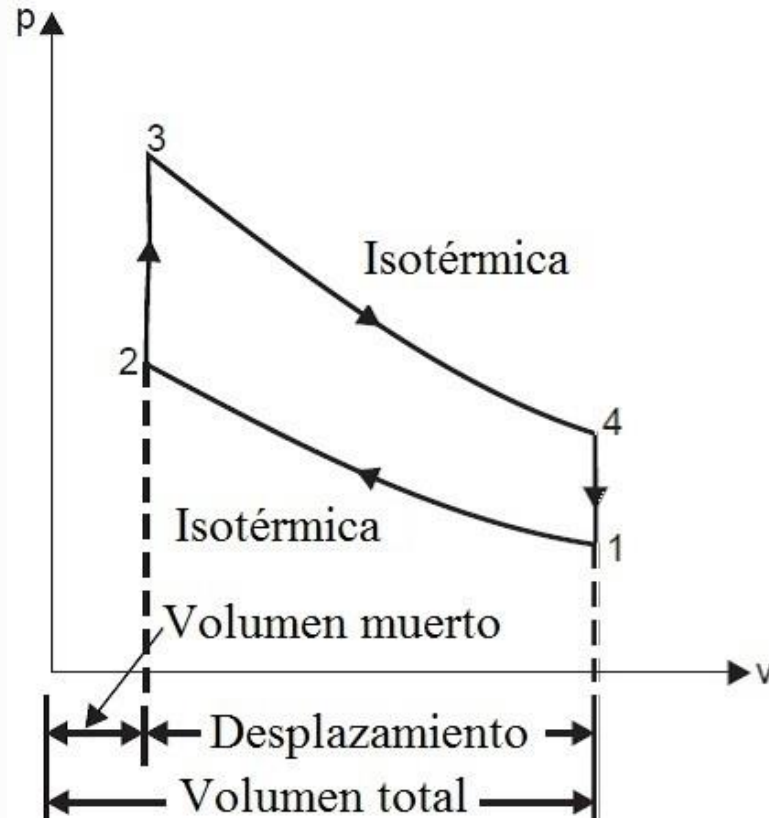
$$q_{3-4} = RT_1 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$





## Ciclo de Stirling



$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$w_{neto} = RT_1 \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right) + RT_3 \ln \left( \frac{v_4}{v_3} \right)$$

$$q_{3-4} = RT_3 \ln \left( \frac{v_4}{v_3} \right)$$

$$q_{1-2} = RT_1 \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_2}; T_1 = T_2;$$

$$T_3 = T_4$$



## Ciclo de Ericsson

$$r_v = \frac{v_4}{v_2}$$

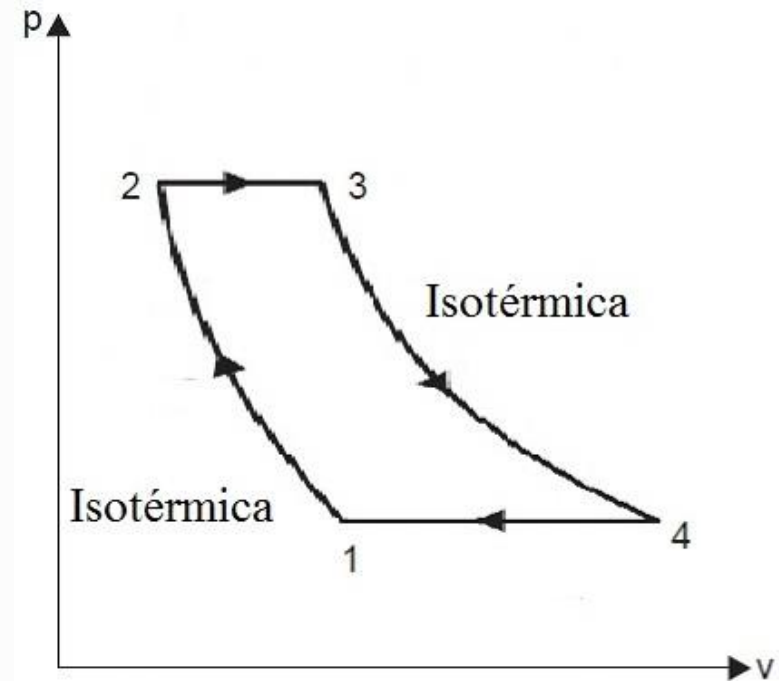
$$w_{neto} = RT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + RT_3 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)$$

$$q_{3-4} = RT_3 \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right)$$

$$q_{1-2} = RT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

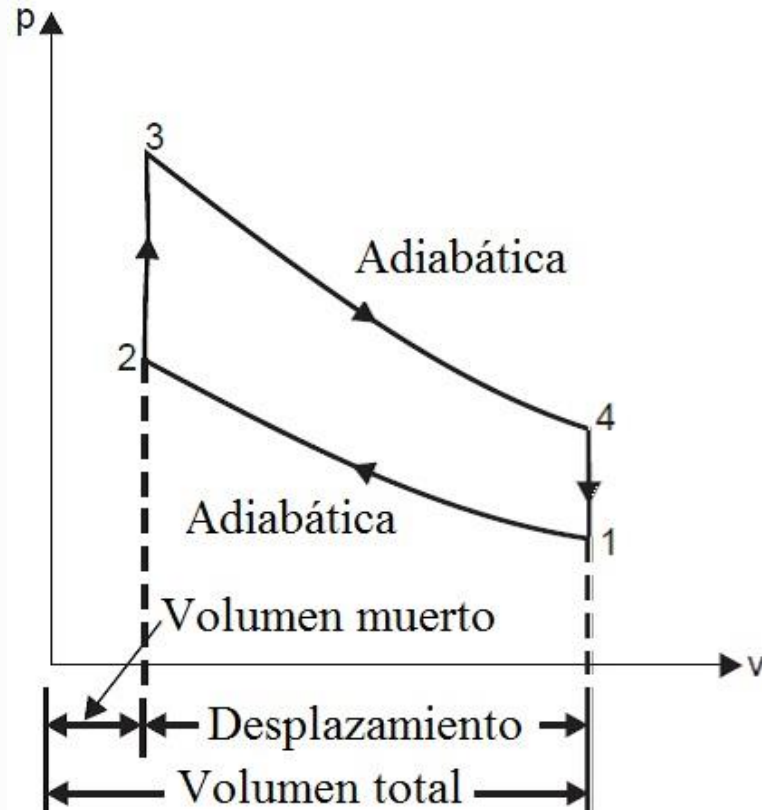
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3}; T_1 = T_2;$$

$$T_3 = T_4$$





## Ciclo de Otto



$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$w_{neto} = c_v(T_1 - T_2) + c_v(T_3 - T_4)$$

$$q_{2-3} = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{4-1} = c_v(T_1 - T_4)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$



## Ciclo de Diésel

$$r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

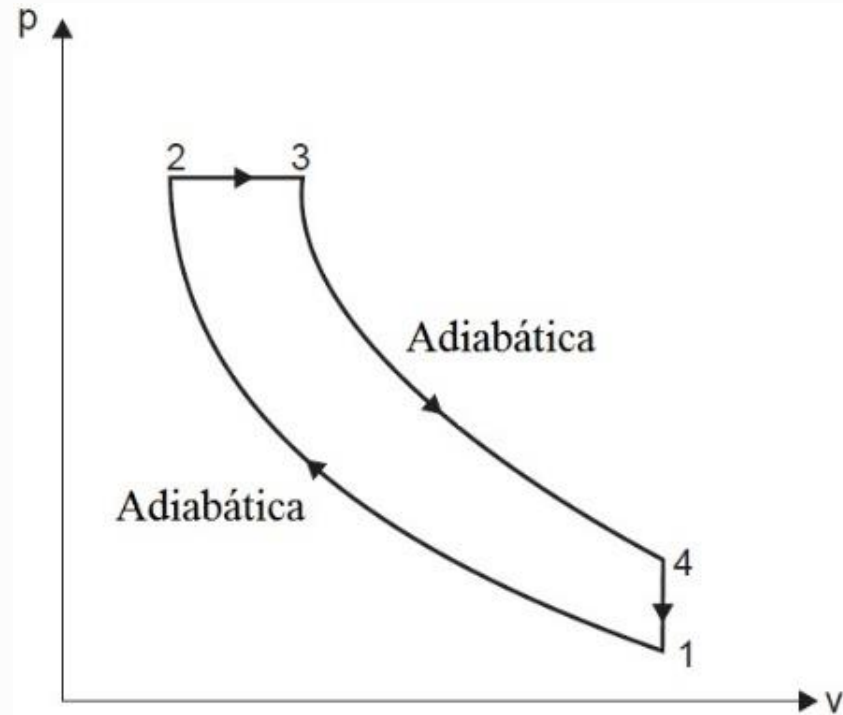
$$r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

$$w_{neto} = c_p(T_3 - T_2) + c_v(T_1 - T_4)$$

$$q_{2-3} = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{4-1} = c_v(T_1 - T_4)$$

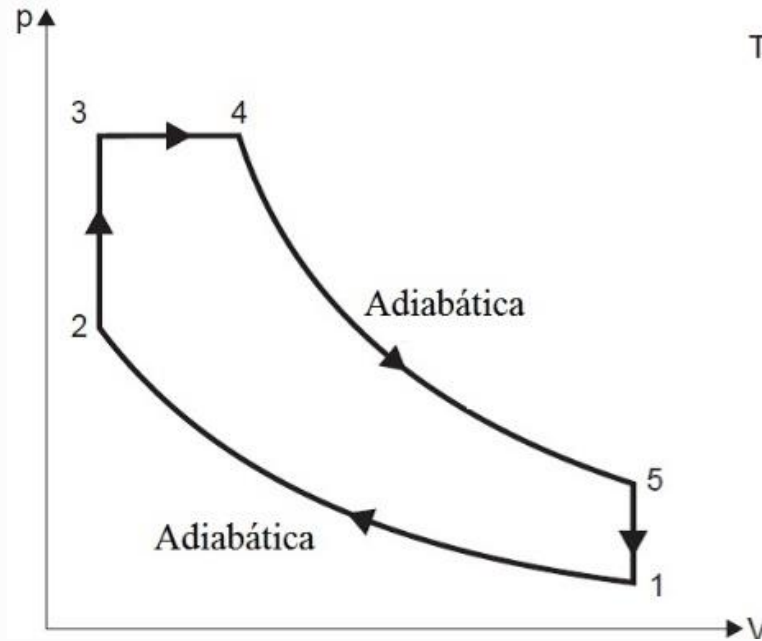
$$\eta = 1 - \frac{1}{k \cdot (r_v^{k-1})} \cdot \left[ \frac{r_c^k - 1}{r_c - 1} \right]$$







## Ciclo Dual



T

$$r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

$$r_c = \frac{v_4}{v_3}$$

$$r_p = \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$q_{5-1} = c_v(T_1 - T_5)$$



## Ciclo Dual (continuación)

$$W_{neto} = c_v(T_1 - T_2) + R(T_4 - T_3) + c_v(T_4 - T_5)$$

$$q_{2-4} = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{k \cdot (r_v^{k-1})} \cdot \left[ \frac{r_p \cdot r_c^k - 1}{(r_p - 1) + r_p \cdot k(r_c - 1)} \right]$$



## Ciclo Brayton Sencillo

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

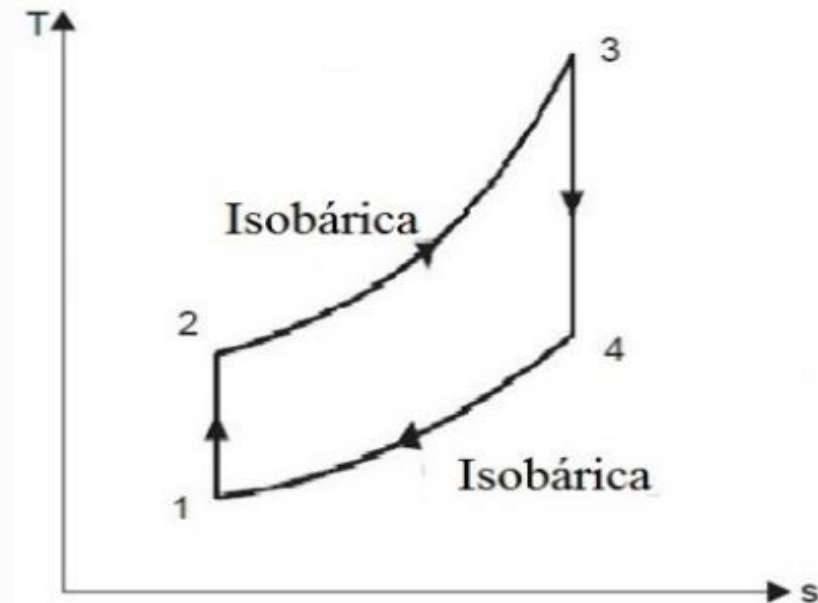
$$W_{3-4} = c_p(T_3 - T_4)$$

$$W_{1-2} = c_p(T_2 - T_1)$$

$$q_{2-3} = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{4-1} = c_v(T_1 - T_4)$$

$$\eta = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$



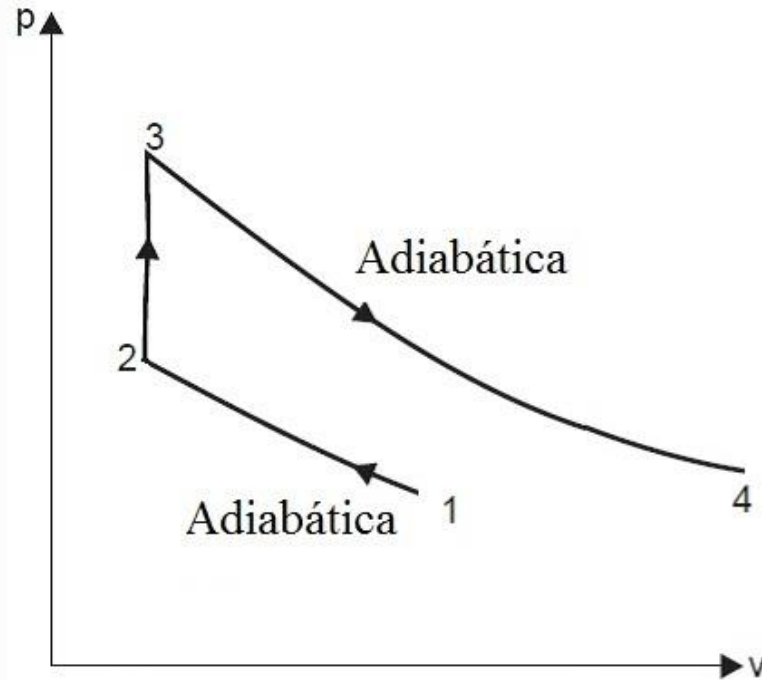
# Ciclos de potencia reales

Aire y combustible como fluido de trabajo





## Ciclo de Otto



$$p_1 = p_4$$
$$r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\dot{W}_{neta} = \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_f u_{pr} - (\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_4$$

$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_f u_{pr} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) u_3 - \dot{m}_a u_2$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{neta}}{\dot{q}_{2-3}}$$



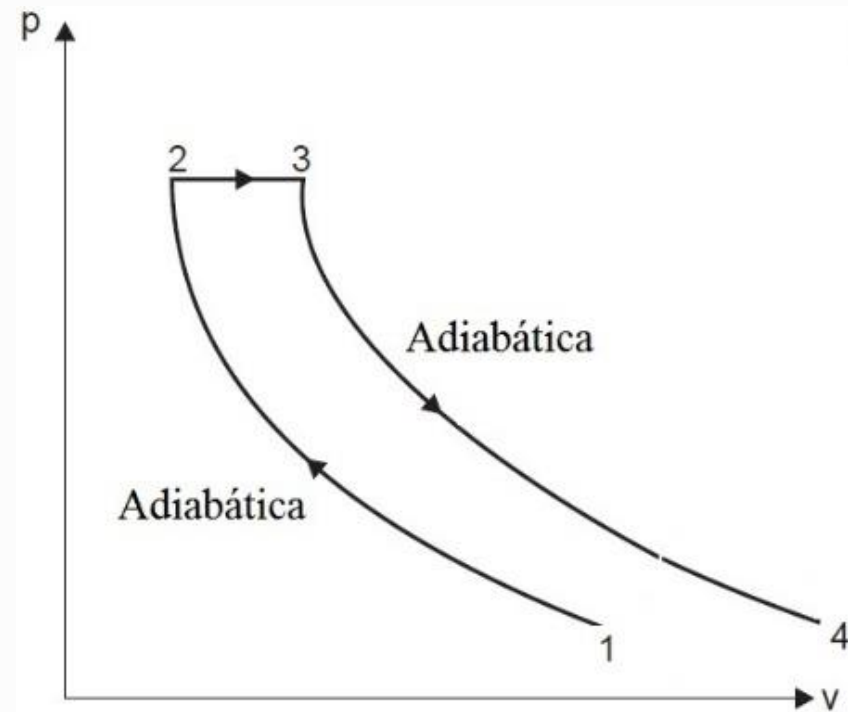
## Ciclo de Diésel

$$p_1 = p_4; r_v = \frac{v_1}{v_2}; r_c = \frac{v_3}{v_2}$$

$$\dot{w}_{neta} = \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_c h_{pr} - (\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_4$$

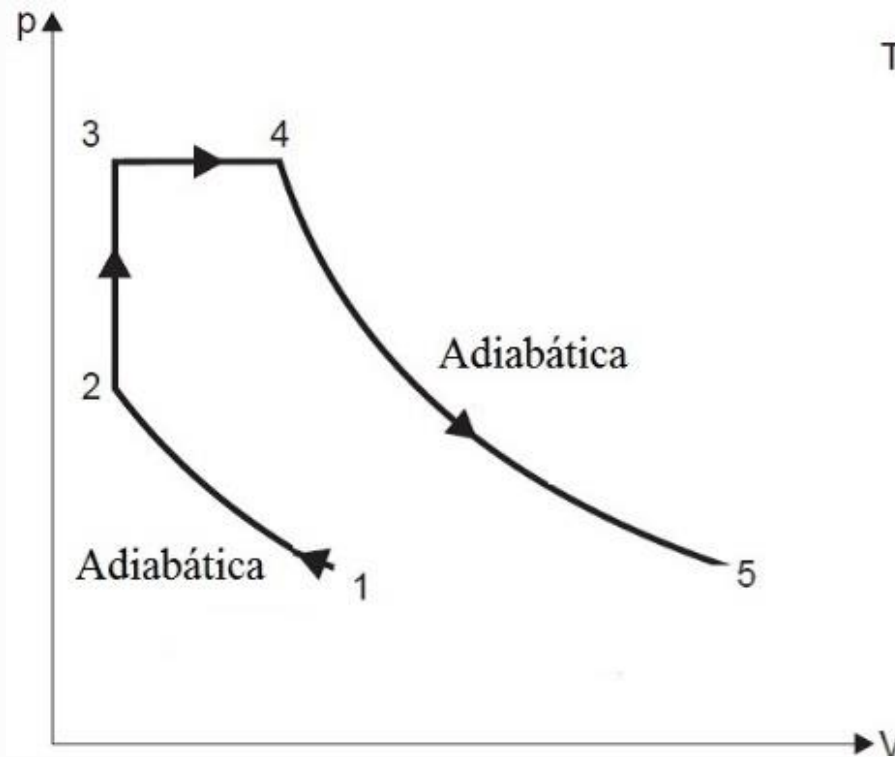
$$\begin{aligned} \dot{q}_{2-3} &= \dot{m}_f h_{pr} \\ &= (\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_3 - \dot{m}_a h_2 \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{neta}}{\dot{q}_{2-3}}$$





## Ciclo Dual



$$p_1 = p_5; r_v = \frac{v_1}{v_2}; r_c = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\dot{w}_{neta} = \dot{m}_a h_1 + \dot{m}_f (h_{pr} + u_{pr}) - (\dot{m}_a + \dot{m}_f) h_5$$

$$\dot{q}_{2-3-4} = \dot{m}_f (h_{pr} + u_{pr})$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{neta}}{\dot{q}_{2-3}}$$



## Ciclo de Brayton sencillo, con irreversibilidades

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} = \frac{p_{r3}}{p_{r4}}$$

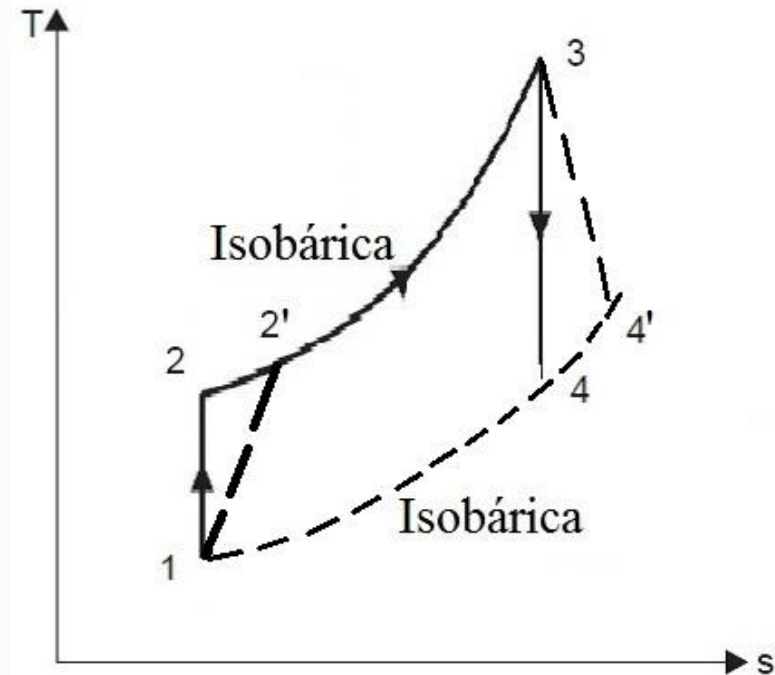
$$w_{3-4} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_3 - h'_4)$$

$$w_{1-2} = \dot{m}_a(h'_2 - h_1)$$

$$q_{2-3} = \dot{m}_f h_{pr}$$

$$\eta = \frac{w_{3-4} + w_{1-2}}{q_{2-3}}$$

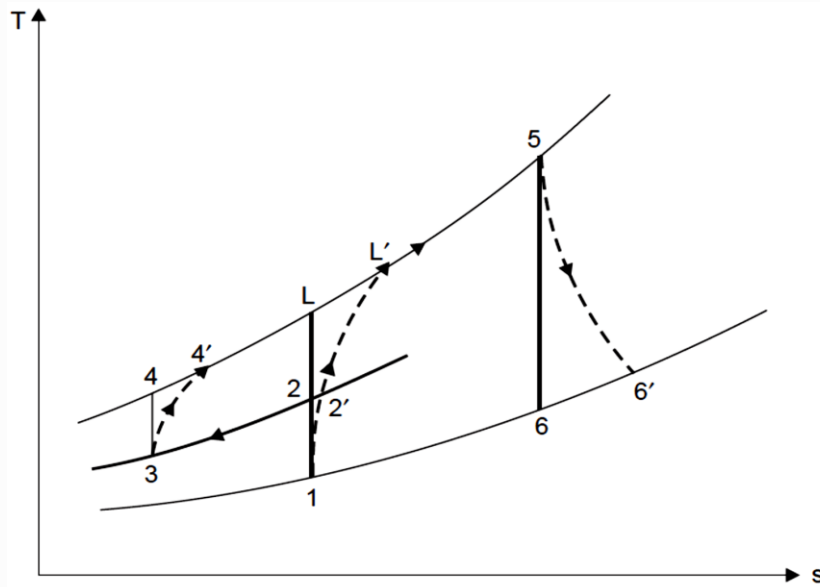
$$\eta_{sT} = \frac{h_4 - h_3}{h'_4 - h_3}; \eta_{sC} = \frac{h'_2 - h_1}{h_2 - h_1}$$







## Ciclo Brayton con interenfriamiento (Compresión en etapas)



$$r_p = \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_{4'}}{p_1} = \frac{p_5}{p_{6'}} = \frac{p_5}{p_6}$$

$$r_{p_{etapa1}} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{2'}}{p_1} = \frac{p_{r1}}{p_{r1}}$$

$$r_{p_{etapa2}} = \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_{4'}}{p_3} = \frac{p_{r4}}{p_{r3}}$$

$$q_{5-4'} = \dot{m}_f h_{pr}$$

$$\dot{w}_{1-2'} = \dot{m}_a (h_{2'} - h_1)$$

$$\dot{w}_{3-4'} = \dot{m}_a (h_{4'} - h_3)$$



## Ciclo Brayton con interenfriamiento (Continuación)

$$\dot{w}_{5-6'} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_5 - h_{6'})$$

$$\eta = \frac{w_{3-4'} + w_{1-2'} + \dot{w}_{5-6'}}{q_{5-4'}}$$

$$\eta_{sT} = \frac{h_6 - h_5}{h_{6'} - h_5}$$

$$\eta_{sC_{etapa1}} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$\eta_{sC_{etapa2}} = \frac{h_{4'} - h_3}{h_4 - h_3}$$



## Ciclo de Brayton con recalentamiento (Expansión en etapas)

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{2'}}{p_1} = \frac{p_3}{p_{6'}} = \frac{p_3}{p_6}$$

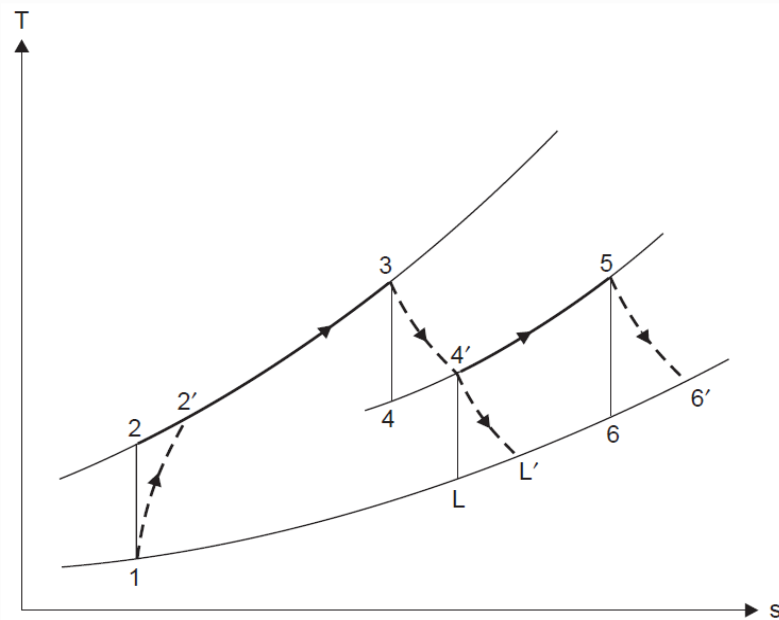
$$r_{petapa1} = \frac{p_3}{p_{4'}} = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_{r3}}{p_{r4}} = \frac{p_{r3}}{p_{r4}}$$

$$r_{petapa2} = \frac{p_5}{p_{6'}} = \frac{p_5}{p_6} = \frac{p_{r5}}{p_{r6'}} = \frac{p_{r5}}{p_{r6}}$$

$$\dot{W}_{3-4'} = (\dot{m}_a + \dot{m}_{f_1})(h_3 - h_{4'})$$

$$\dot{W}_{5-6'} = (\dot{m}_a + \dot{m}_{f_1} + \dot{m}_{f_2})(h_5 - h_{6'})$$

$$\dot{W}_{1-2'} = \dot{m}_a(h_{2'} - h_1)$$





## Ciclo de Brayton con recalentamiento (Continuación)

$$\dot{q}_{3-2'} = \dot{m}_{f_1} h_{pr}$$

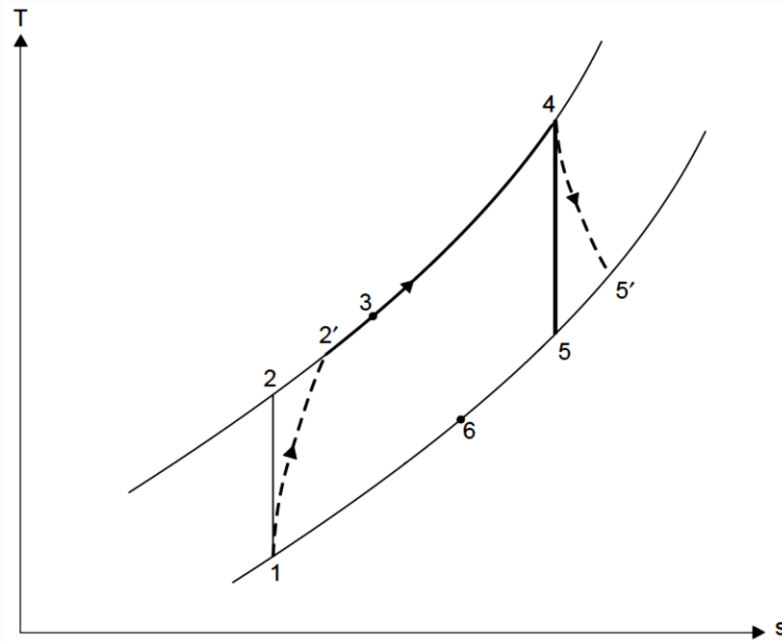
$$\dot{q}_{5-4'} = (\dot{m}_{f_1} + \dot{m}_{f_2}) h_{pr}$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2'} + \dot{w}_{3-4'} + \dot{w}_{5-6'}}{\dot{q}_{3-2'} + \dot{q}_{5-4'}}$$

$$\eta_{sT_{etapa1}} = \frac{h_4 - h_3}{h_{4'} - h_3} \quad \eta_{sT_{etapa2}} = \frac{h_6 - h_5}{h_{6'} - h_5} \quad \eta_{sC} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}$$



## Ciclo de Brayton con regeneración



$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{2'}}{p_1} = \frac{p_4}{p_{5'}} = \frac{p_4}{p_5}$$

$$\dot{w}_{4-5'} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_4 - h_{5'})$$

$$\dot{w}_{1-2'} = \dot{m}_a(h_{2'} - h_1)$$

$$\dot{q}_{4-3} = \dot{m}_f h_{pr}$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2'} + \dot{w}_{4-5'}}{\dot{q}_{4-3}}$$



## Ciclo de Brayton con regeneración (Continuación)

$$\eta_{sT} = \frac{h_5 - h_4}{h_{5'} - h_4}$$

$$\eta_{sC} = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$$\eta_R = \frac{\dot{m}_a (h_3 - h_{2'})}{(\dot{m}_a + \dot{m}_f)(h_{5'} - h_6)}$$

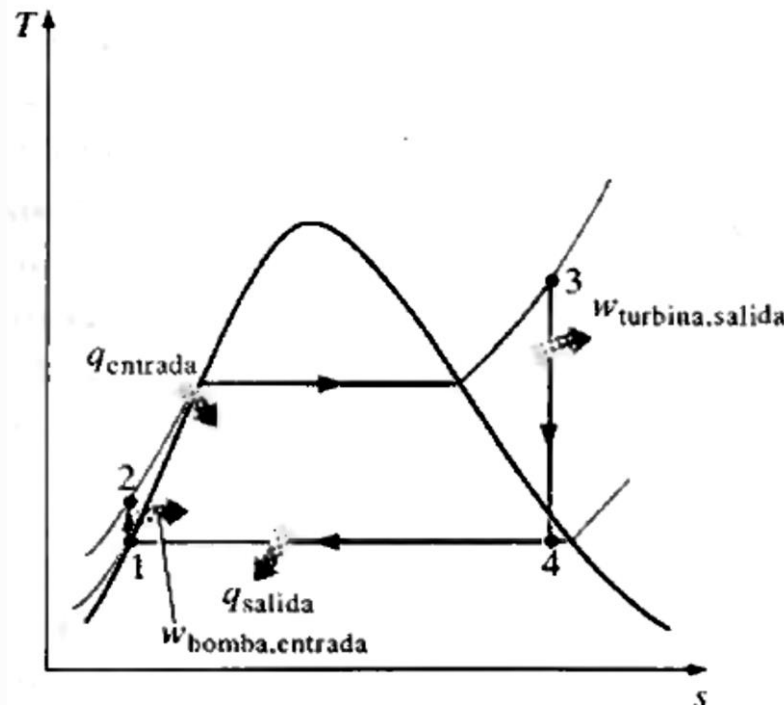
# Ciclos de potencia que utilizan vapor de agua

Ciclo de Rankine





## Ciclo de Rankine sencillo y reversible



$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$\dot{w}_{3-4} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_4)$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_2)$$

$$h_2 = v_1(p_2 - p_1) + h_1$$

$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_2)$$

$$\dot{q}_{4-1} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_4)$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{3-4}}{\dot{q}_{2-3}}$$





## Ciclo de Rankine sencillo e irreversible

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_{2'}}{p_1} = \frac{p_3}{p_{4'}}$$

$$\dot{w}_{3-4} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_{4'})$$

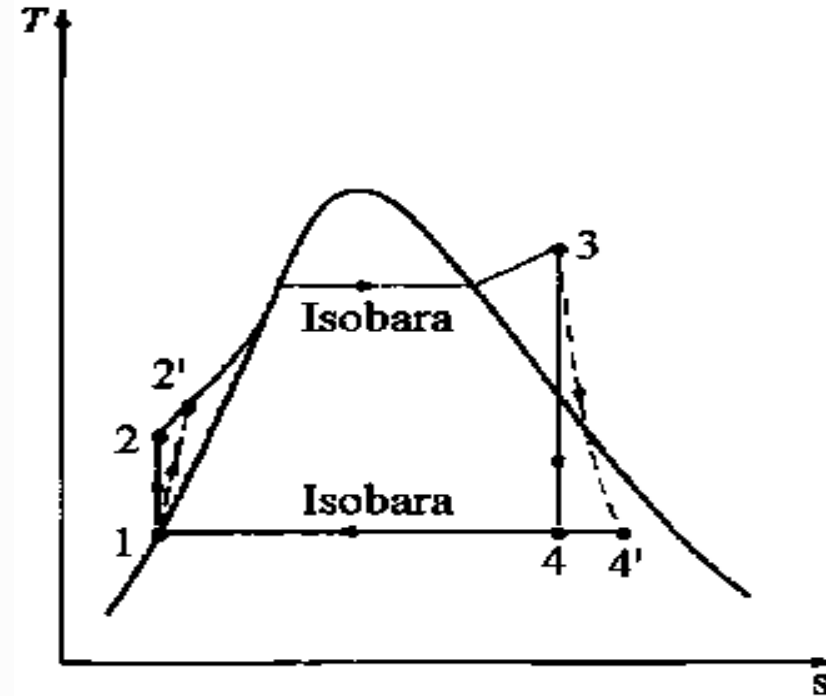
$$\dot{w}_{1-2'} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_{2'})$$

$$\dot{q}_{2'-3} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_{2'})$$

$$\dot{q}_{4'-1} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_{4'})$$

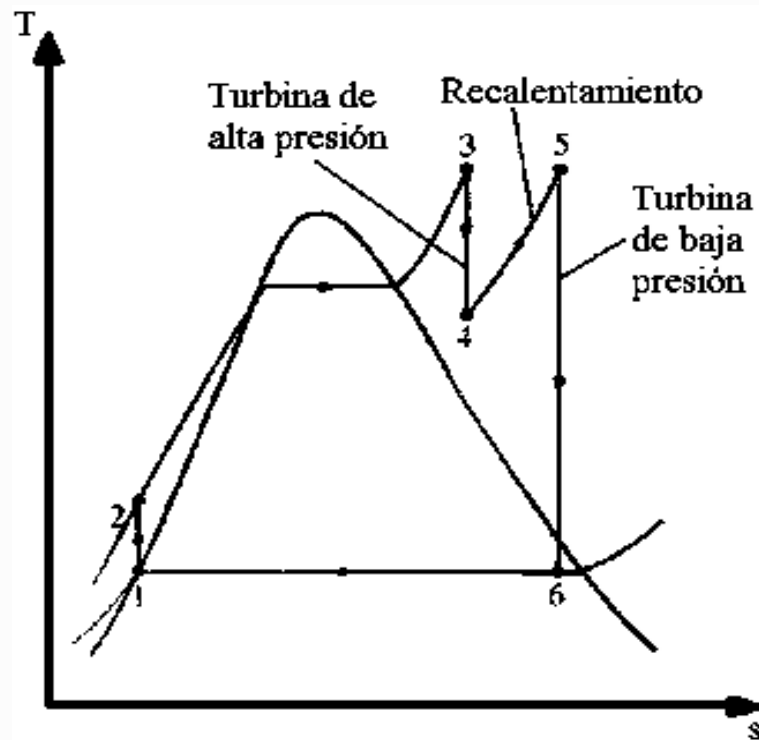
$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2'} + \dot{w}_{3-4}}{\dot{q}_{2'-3}}$$

$$\eta_{sT} = \frac{h_{4'} - h_3}{h_4 - h_3} \quad \eta_{sB} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$





## Ciclo de Rankine ideal con recalentamiento



$$r_p = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_6} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right) \cdot \left(\frac{p_5}{p_6}\right)$$

$$\dot{W}_{3-4} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_4)$$

$$\dot{W}_{5-6} = \dot{m}_{va}(h_5 - h_6)$$

$$\dot{W}_{1-2} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_2)$$

$$\dot{q}_{4-5} = \dot{m}_{va}(h_5 - h_4)$$

$$\dot{q}_{6-1} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_6)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{1-2} + \dot{W}_{3-4} + \dot{W}_{5-6}}{\dot{q}_{2-3} + \dot{q}_{4-5}}$$



## Ciclo de Rankine ideal regenerativo con calentador abierto de agua de alimentación (CAA)

$$r_p = \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_5}{p_7} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right) \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\dot{w}_{5-6} = \dot{m}_{va}(h_5 - h_6)$$

$$\dot{w}_{6-7} = \dot{m}_{va}(h_6 - h_7)(1 - y)$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_2)(1 - y)$$

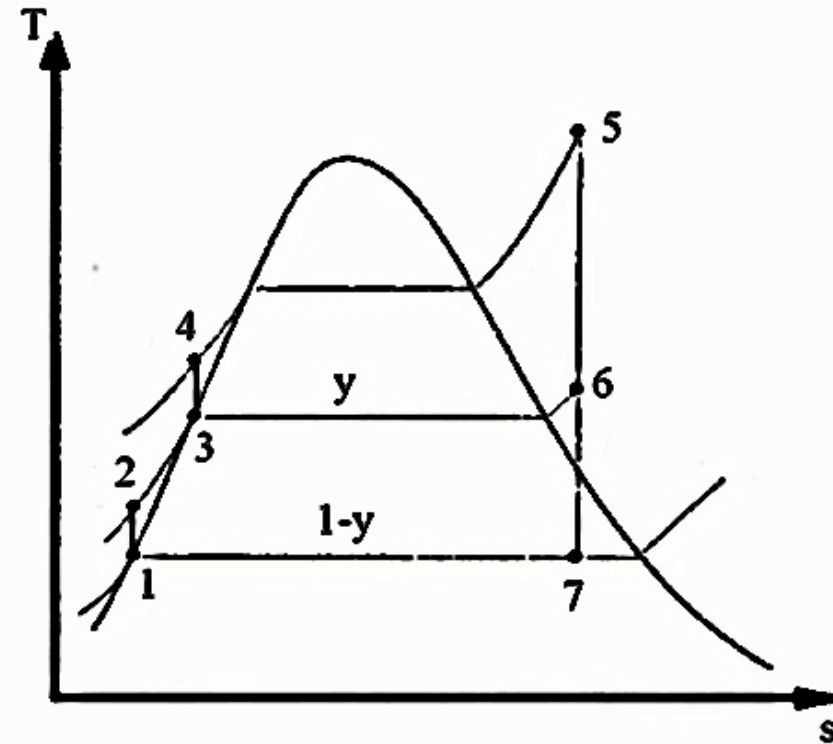
$$\dot{w}_{3-4} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_4)$$

$$\dot{q}_{4-5} = \dot{m}_{va}(h_5 - h_4)$$

$$\dot{q}_{7-1} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_7)(1 - y)$$

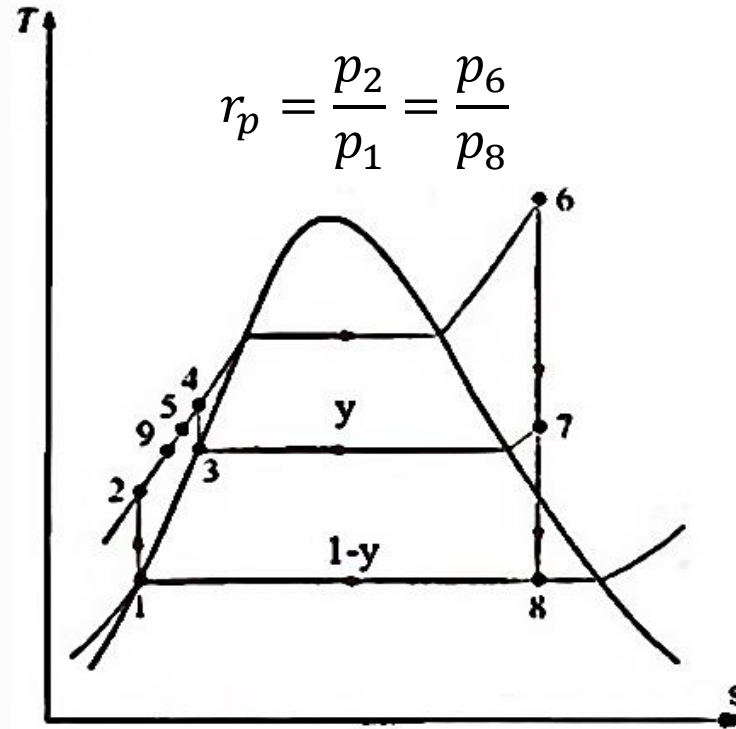
$$h_2(1 - y) + h_6y = h_3$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{3-4} + \dot{w}_{5-6} + \dot{w}_{6-7}}{\dot{q}_{7-1}}$$





## Ciclo Rankine regenerativo con CCA cerrado



$$\dot{w}_{6-7} = \dot{m}_{va}(h_6 - h_7)$$

$$\dot{w}_{7-8} = \dot{m}_{va}(h_7 - h_8)(1 - y)$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_2)(1 - y)$$

$$\dot{w}_{3-4} = \dot{m}_{va}(h_3 - h_4)y$$

$$\dot{q}_{5-6} = \dot{m}_{va}(h_6 - h_5)$$

$$\dot{q}_{8-1} = \dot{m}_{va}(h_1 - h_8)(1 - y)$$

$$h_2(1 - y) + h_7y = h_3y + h_9(1 - y)$$

$$h_9(1 - y) + h_4y = h_5$$

$$\eta = \frac{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{3-4} + \dot{w}_{6-7} + \dot{w}_{7-8}}{\dot{q}_{5-6}}$$

# Ciclos de refrigeración

Diferentes fluidos de trabajo





## Ciclo de refrigeración por compresión de un gas

$$r_p = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1}$$

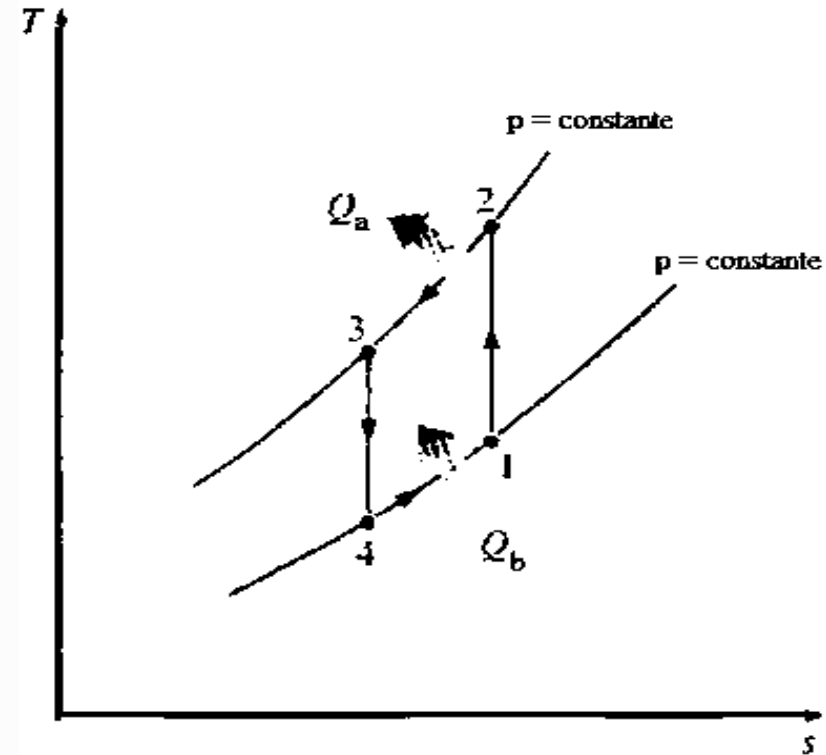
$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$$

$$\dot{w}_{3-4} = \dot{m}_a(h_3 - h_4)$$

$$\dot{q}_{4-1} = \dot{m}_a(h_1 - h_4)$$

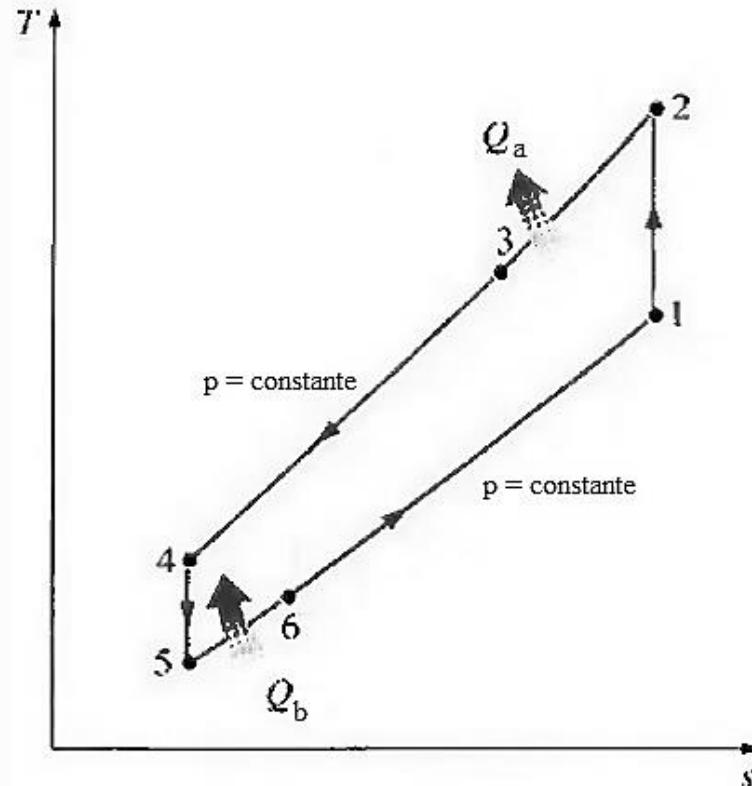
$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_a(h_3 - h_2)$$

$$COP = \frac{\dot{q}_{4-1}}{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{3-4}}$$





## Ciclo de refrigeración por compresión de un gas y regeneración



$$r_p = \frac{p_4}{p_5} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_a(h_1 - h_2)$$

$$\dot{w}_{4-5} = \dot{m}_a(h_4 - h_5)$$

$$\dot{q}_{5-6} = \dot{m}_a(h_6 - h_5)$$

$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_a(h_3 - h_2)$$

$$\eta_R = \frac{(h_1 - h_6)}{(h_3 - h_4)}$$

$$COP = \frac{\dot{q}_{5-6}}{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{4-5}}$$



## Ciclo de refrigeración por compresión de un vapor

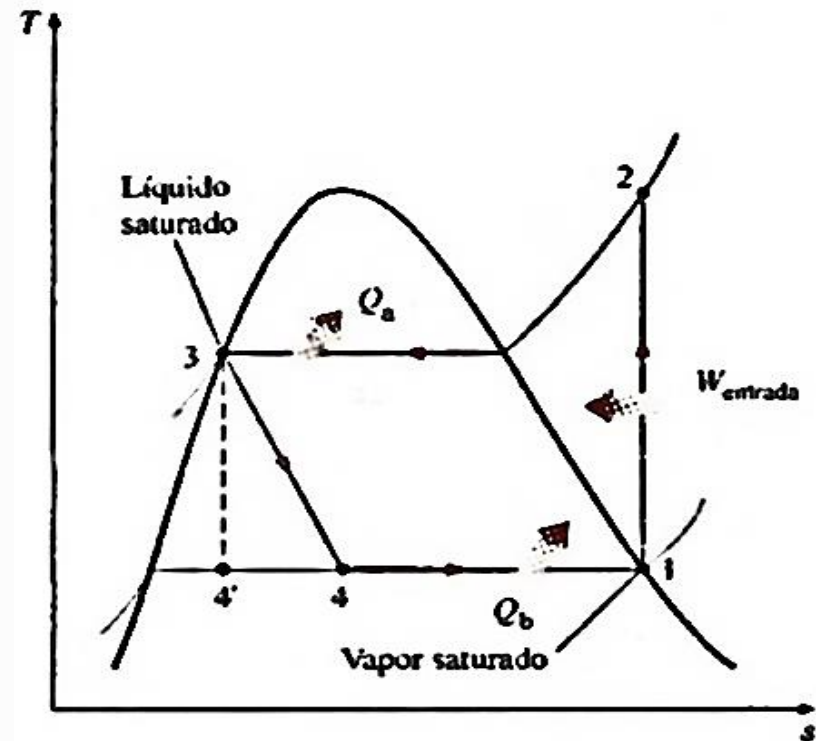
$$r_p = \frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_r (h_2 - h_1)$$

$$\dot{q}_{4-1} = \dot{m}_r (h_1 - h_4)$$

$$\dot{q}_{2-3} = \dot{m}_r (h_3 - h_2)$$

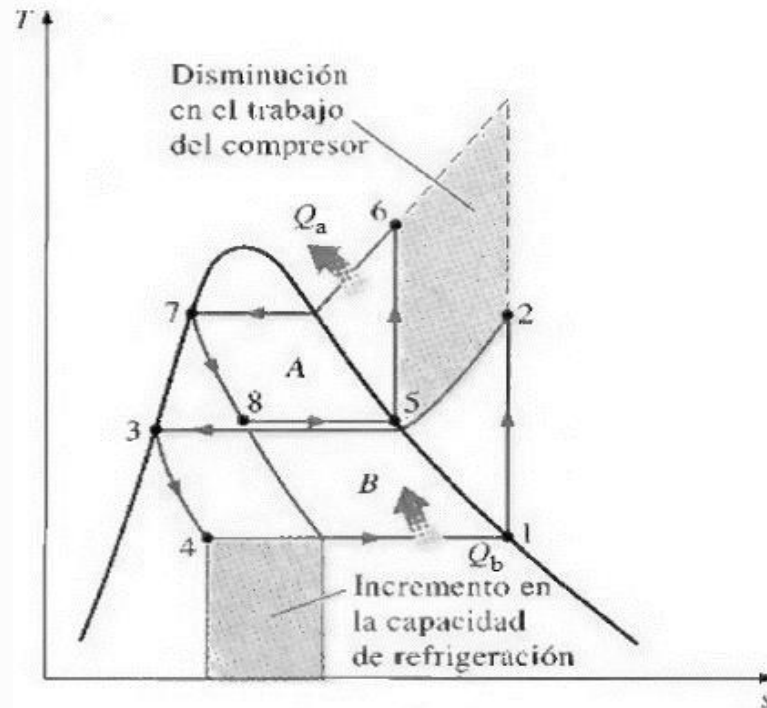
$$COP = \frac{\dot{q}_{4-1}}{\dot{w}_{1-2}}$$







## Ciclo de refrigeración por compresión de un vapor y arreglo en cascada



$$r_p = \frac{p_7}{p_4} = \frac{p_6}{p_1}$$

$$\dot{w}_{1-2} = \dot{m}_{r_1} (h_1 - h_2)$$

$$\dot{w}_{5-6} = \dot{m}_{r_2} (h_5 - h_6)$$

$$\dot{q}_{4-1} = \dot{m}_{r_1} (h_1 - h_4)$$

$$\dot{q}_{6-7} = \dot{m}_{r_2} (h_7 - h_6)$$

$$h_2 \dot{m}_{r_1} + h_8 \dot{m}_{r_2} \\ = h_3 \dot{m}_{r_1} + h_5 \dot{m}_{r_2}$$

$$COP = \frac{\dot{q}_{4-1}}{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{5-6}}$$



## Ciclo de refrigeración por compresión de vapor en etapas múltiples

$$r_p = \frac{p_5}{p_8} = \frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{p_4}{p_9}\right) \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\dot{w}_{1-2} = y \cdot \dot{m}_r (h_1 - h_2)$$

$$\dot{w}_{9-4} = \dot{m}_r (h_9 - h_4)$$

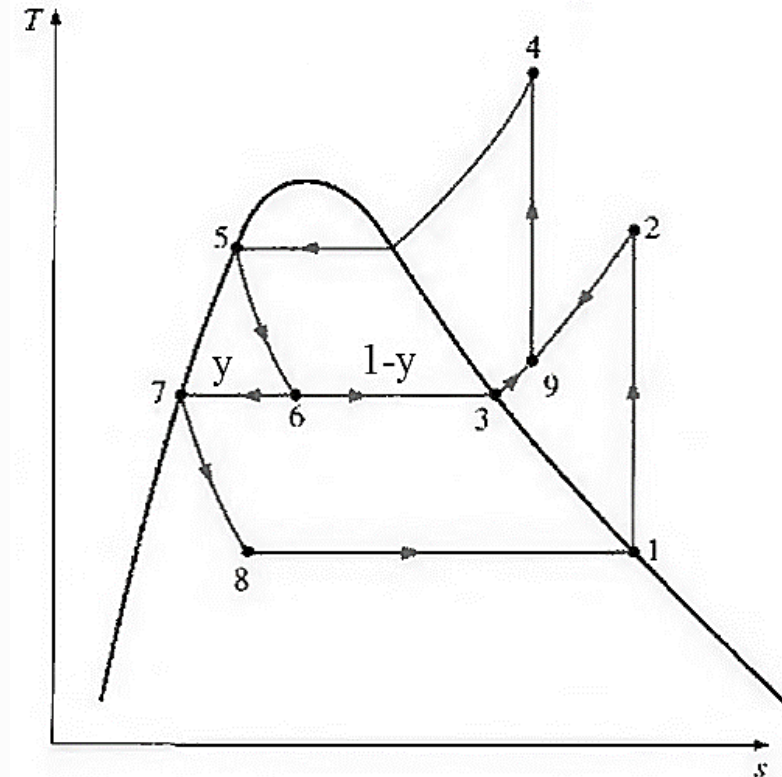
$$\dot{q}_{8-1} = y \cdot \dot{m}_r (h_1 - h_8)$$

$$\dot{q}_{4-5} = \dot{m}_r (h_5 - h_4)$$

$$h_6 = h_7 y + h_3 (1 - y)$$

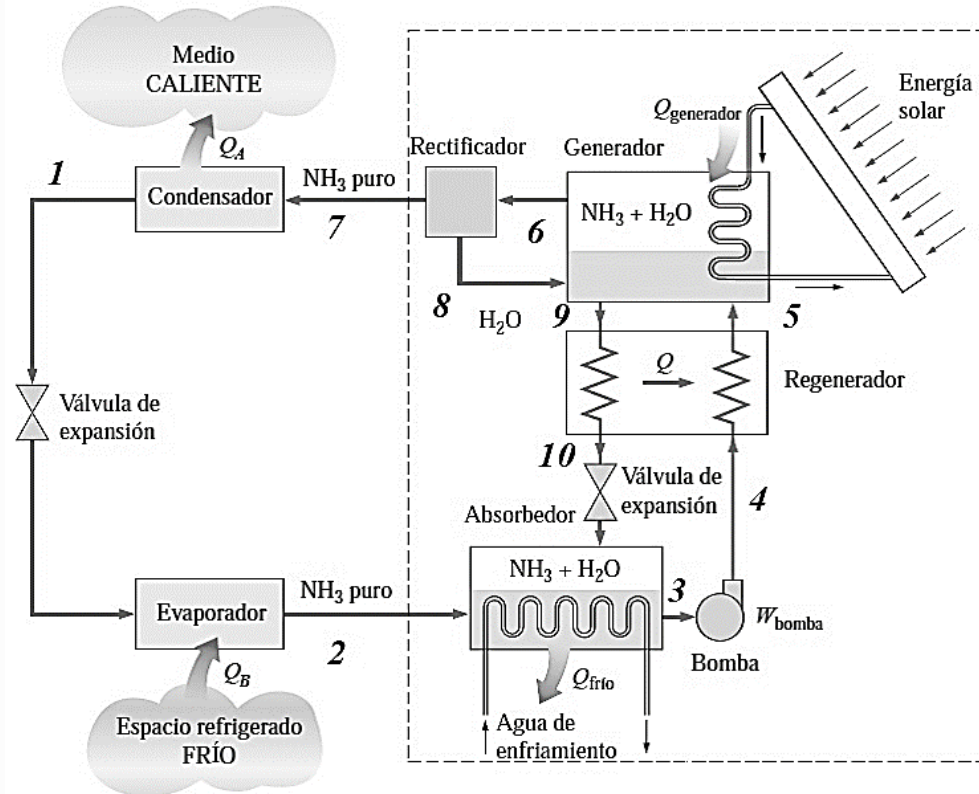
$$h_3 (1 - y) + h_2 y = h_9$$

$$COP = \frac{\dot{q}_{8-1}}{\dot{w}_{1-2} + \dot{w}_{9-4}}$$





# Ciclo de refrigeración por absorción de un vapor





## Ciclo de refrigeración por absorción de un vapor (Continuación)

$$r_p = \frac{p_1}{p_2}$$

$$p_1 = p_4 = p_5 = p_6 = p_7 = p_8 = p_9 = p_{10}$$

$$p_2 = p_3$$

$$\dot{W}_{Bomba} = \dot{m}_3(h_3 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{Evaporador} = \dot{m}_4(h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{Condensador} = \dot{m}_7(h_1 - h_7)$$

$$\dot{Q}_{Absorbedor} = \dot{m}_3h_3 - \dot{m}_2h_2 - \dot{m}_{10}h_{10}$$

$$\dot{Q}_{Regenerador} = -\dot{m}_9(h_{10} - h_9) = \dot{m}_4(h_5 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{Generador} = \dot{m}_6h_6 + \dot{m}_9h_9 - \dot{m}_5h_5 - \dot{m}_8h_8$$



## Ciclo de refrigeración por absorción de un vapor (Conclusión)

$$\dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Evaporador}}{\dot{W}_{Bomba} + \dot{Q}_{Generador}}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_7$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_3$$

$$\chi'_2 \dot{m}_2 + \chi'_{10} \dot{m}_{10} = \chi'_3 \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_8 = \dot{m}_6 + \dot{m}_9$$

$$\chi'_5 \dot{m}_5 = \chi''_6 \dot{m}_6 + \chi'_9 \dot{m}_9$$



## Bibliografía

1. Burghardt, M. D., & Harbach, J. A. (1993). Engineering Thermodynamics. New York: HarperCollins College Publishers.
2. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). Termodinámica. México: McGraw-Hill.
3. Jones, J. B., & Dugan, R. E. (1997). Ingeniería termodinámica. México: Prentice Hall.
4. Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2008). Fundamentals of engineering thermodynamics. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.