

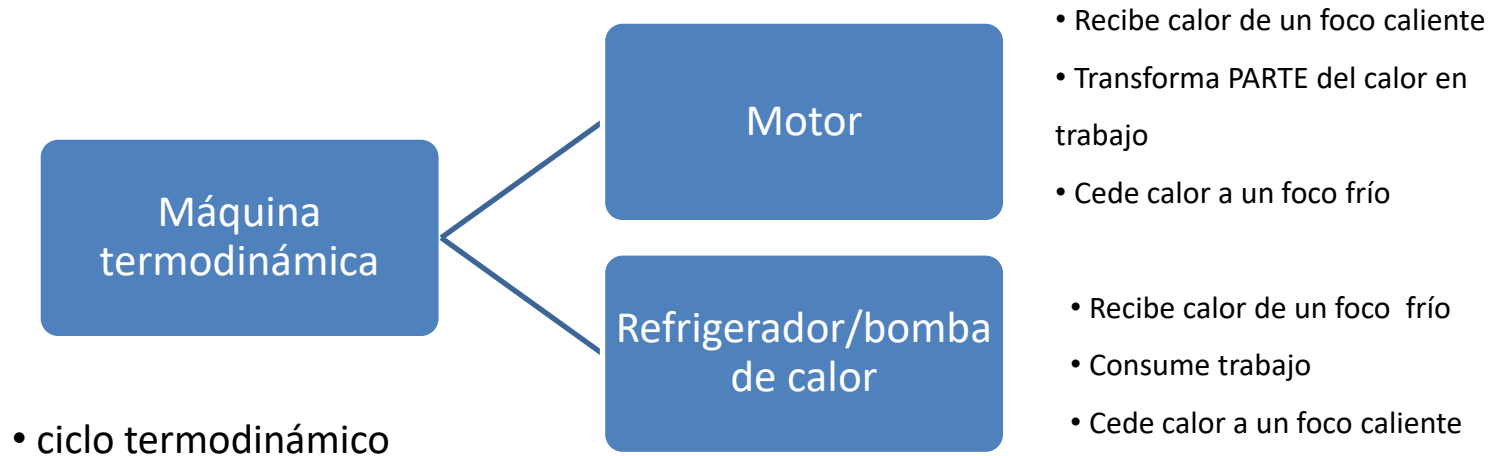
## Tema 5.- SEGUNDO PRINCIPIO

- El Segundo Principio (SP) dota de “contenido” a la Termodinámica
- El PP constituye una CONDICIÓN NECESARIA para que un proceso ocurra, pero NO suficiente
- El SP establece una CONDICIÓN NECESARIA Y SUFICIENTE
- Este tema se va a desarrollar en tres partes:
  - Parte I: **Formulación clásica**: máquinas termodinámicas, corolarios de Carnot
  - Parte II: **Entropía**: aparece una herramienta para aplicar el SP
  - Parte III: **Exergía**: aparece una herramienta para interpretar el SP

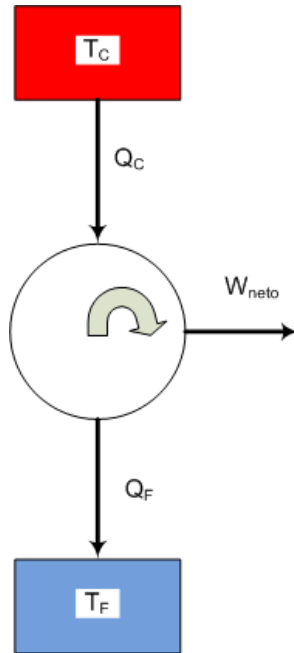
## **PARTE I: FORMULACIÓN CLÁSICA**

## FOCOS Y MÁQUINAS TÉRMICAS

- **Foco:** sistema ideal:
  - libre de irreversibilidades internas
  - mantiene temperatura constante independientemente de las interacciones energéticas



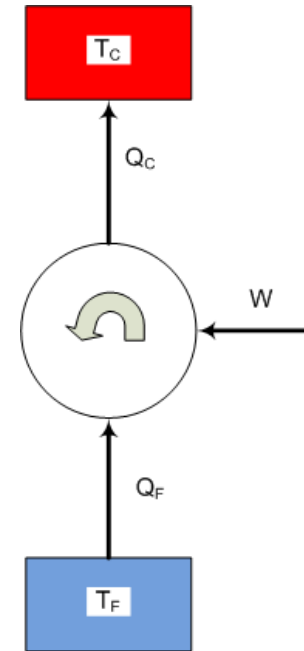
## MOTOR



$$\oint dE = 0 = Q_C - Q_F - W_{\text{neto}} \Leftrightarrow Q_C = Q_F + W_{\text{neto}}$$

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C}$$

## REFRIGERADOR / BOMBA DE CALOR



$$\oint dE = 0 = Q_F - Q_C - (-W_{\text{neto}}) \Leftrightarrow Q_F + W_{\text{neto}} = Q_C$$

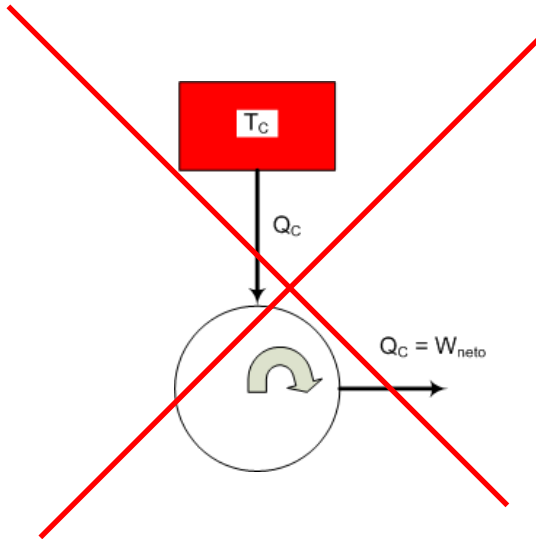
$$COP_{\text{ref}} = \frac{Q_F}{W_{\text{neto}}} = \frac{Q_F}{Q_C - Q_F} \left\{ \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} \right\} 1$$

$$COP_{\text{bc}} = \frac{Q_C}{W_{\text{neto}}} = \frac{Q_C}{Q_C - Q_F} > 1$$

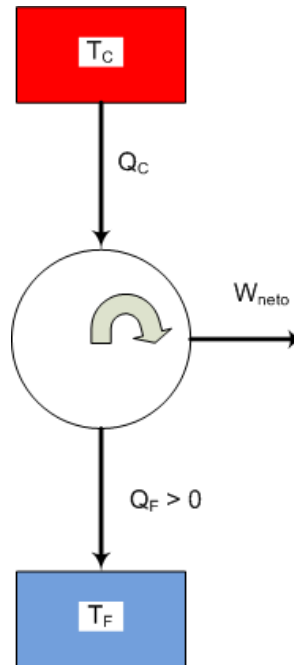
## ENUNCIADOS DEL SEGUNDO PRINCIPIO

### Kelvin-Planck:

- Referido a ciclos de potencia
- Un ciclo termodinámico que se comunice con un solo foco y transforme todo el calor absorbido en trabajo NO puede existir
- Un ciclo de potencia NO puede alcanzar el 100% de rendimiento



$$\underbrace{W_{\text{neto}} = Q_{\text{neto}}}_{\text{único foco}} \leq 0$$

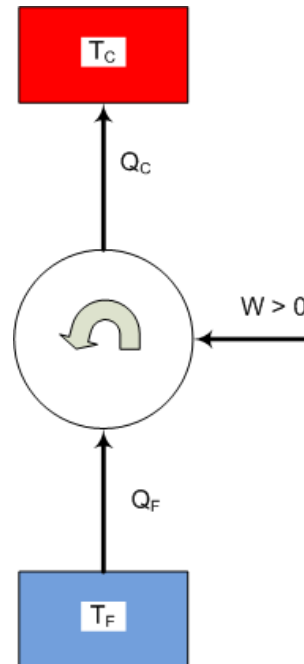
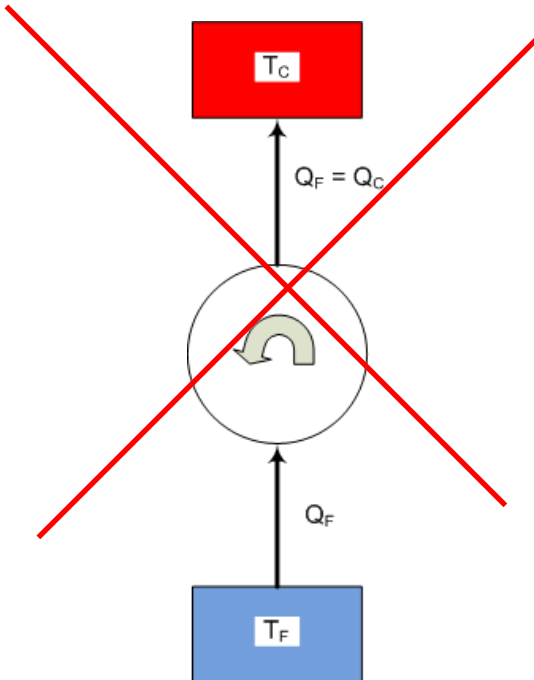


$$\eta < 100\%$$

## ENUNCIADOS DEL SEGUNDO PRINCIPIO

### Clausius:

- Referido a ciclos de refrigeración/bombas de calor
- Un ciclo termodinámico NO puede transferir calor de un foco frío a otro caliente sin consumir trabajo
- Un ciclo de refrigeración NO puede alcanzar un COP infinito



$$COP < \infty$$

## PROCESOS REVERSIBLES E IRREVERSIBLES

- Un proceso reversible se puede invertir sin que el entorno se vea afectado
- Son útiles:
  - como procesos de comparación: carecen de efectos disipantes
  - para facilitar los cálculos: son cuasiestáticos, con trayectorias conocidas
- Los procesos reversibles NO existen (SP)
  - Internamente reversibles: definición “inteligente” de la frontera
  - Totalmente reversibles : ficticios

$$\underbrace{W_{neto} = Q_{neto}}_{\text{único foco}} \begin{cases} < 0 \text{ ciclos irreversibles} \\ = 0 \text{ ciclos reversibles} \end{cases}$$

## EL CICLO DE CARNOT

- Ciclo TOTALMENTE reversible (ficticio) constituido por cuatro procesos:
  - 1-2: expansión isoterma
  - 2-3: expansión adiabática
  - 3-4: compresión isoterma
  - 4-1: compresión adiabática

**Ejemplo:** Demostrar que el rendimiento de un ciclo de Carnot de potencia recorrido por un gas perfecto que tome calor de un foco caliente a  $T_C$  y lo ceda a uno frío a  $T_F$  viene dado por:

$$\eta = 1 - \frac{T_F^{TGV=cte}}{T_C^{TGV=cte}} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C}$$

Nótese que:

- Las temperaturas del gas son las del termómetro de gas a  $V = \text{cte}$  ( $p \cdot v = R \cdot T$ )
- Las temperaturas de los focos coinciden con las del gas en los procesos isotermos para anular las irreversibilidades



## LOS TEOREMAS DE CARNOT

### Primer Teorema

El rendimiento de **cualquier** motor irreversible siempre es menor que el de **cualquier** motor reversible que opere entre los **mismos focos**.

### Segundo Teorema

El rendimiento de **todos** los motores reversibles que operen entre los **mismos focos** siempre es el mismo.

- Basado en el Segundo Teorema se demuestra que existe una escala de temperatura (Termodinámica o Absoluta) que es independiente de la sustancia/propiedad termométrica
- Con ayuda del ciclo de Carnot realizado con un gas perfecto se demuestra que la Escala Termodinámica de temperatura queda materializada por el termómetro de gas a volumen constante

$$\underbrace{\frac{T_F^{TGV=cte}}{T_C^{TGV=cte}}}_{\text{ciclo Carnot}} = \frac{Q_F}{Q_C} = \underbrace{\frac{T_F^{\text{escala termo}}}{T_C^{\text{escala termo}}}}_{\text{cualquier ciclo reversible}}$$

## PRESTACIONES MÁXIMAS DE MÁQUINAS TÉRMICAS

- El rendimiento de Carnot es el que alcanzaría cualquier ciclo reversible operando entre unos focos dados (segundo teorema)
- El rendimiento de Carnot es la cota máxima de cualquier ciclo irreversible (real): primer teorema

$$\eta \begin{cases} < 1 - \frac{T_F}{T_C} & \text{en ciclos irreversibles (reales)} \\ = 1 - \frac{T_F}{T_C} & \text{en ciclos reversibles (ideales)} \\ > 1 - \frac{T_F}{T_C} & \text{nunca (contradice el Segundo Principio)} \end{cases}$$

$T [K] > 0$  : si se pudiese alcanzar 0K se usaría como foco frío y se tendría un ciclo de rendimiento 100%

$$COP_{\text{ref } \text{ó bc}} \begin{cases} < \frac{T_F \text{ ó } C}{T_C - T_F} & \text{en ciclos irreversibles (reales)} \\ = \frac{T_F \text{ ó } C}{T_C - T_F} & \text{en ciclos reversibles (ideales)} \\ > \frac{T_F \text{ ó } C}{T_C - T_F} & \text{nunca (contradice el Segundo Principio)} \end{cases}$$

## PARTE II: ENTROPÍA

## DESIGUALDAD DE CLAUSIUS

$$\oint \frac{\delta Q}{T} + \sigma = 0 \begin{cases} \sigma = 0 & \text{en ciclos INTERNAMENTE reversibles} \\ \sigma > 0 & \text{en ciclos con irreversibilidades INTERNAS} \end{cases}$$

- Se deriva del enunciado de Kelvin-Planck
- Se aplica a ciclos termodinámicos
- Sólo considera las irreversibilidades internas
- Se ha de determinar el calor a la temperatura que cruza la frontera
- Es transparente al trabajo
- Sirve de base para definir la entropía y el balance entrópico

## ENTROPÍA

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \Bigg|_{\text{int.rev}} \quad [\text{kJ/K}]$$

- Función de estado
- Para calcularla se sustituye el proceso real por cualquiera que sea internamente reversible y transcurra entre 1 y 2

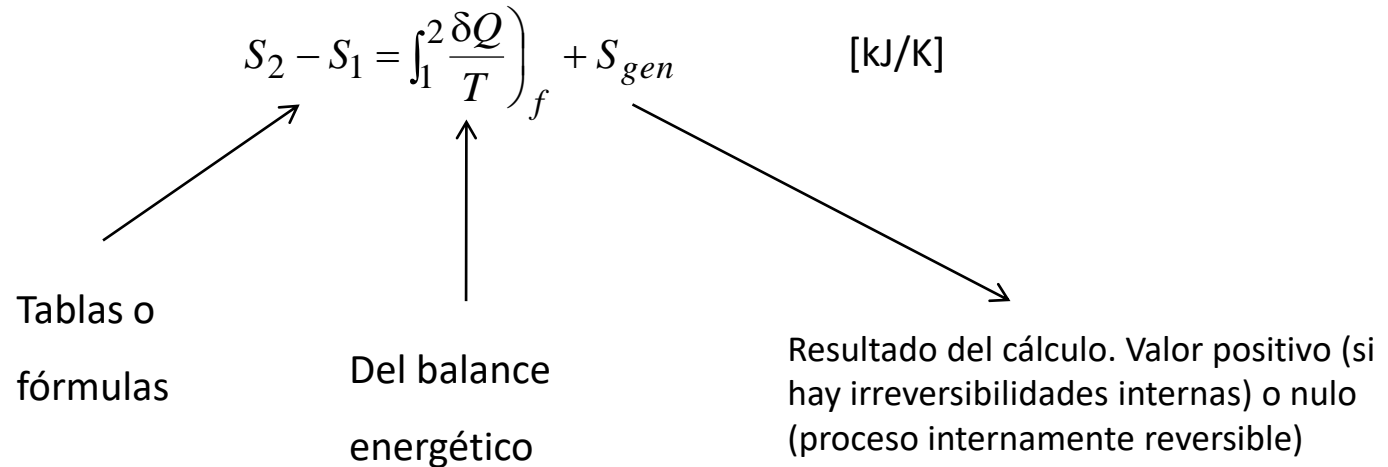
$$\delta Q = dU + p dV = dH - V dp \Rightarrow \begin{cases} \Delta S = \int_1^2 \frac{dU + p dV}{T} \\ \Delta S = \int_1^2 \frac{dH - V dp}{T} \end{cases}$$

### Relaciones de Gibbs

$$T ds = du + p dv$$

$$T ds = dh - v dp$$

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS



- Generaliza el Segundo Principio a procesos no cíclicos
- Permite valorar los procesos: peores cuando mayor sea la entropía generada
- Establece la dirección de proceso: la entropía generada ha de ser positiva o nula
- Sólo atiende a irreversibilidades INTERNAS. Es preciso variar la frontera para evaluar las externas

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS

Temperatura media:

$$\bar{T}_{12} = \frac{Q_{12}}{\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}}_f$$

Forma práctica:

$$S_2 - S_1 = \frac{Q_{12}}{\bar{T}_{12}} + S_{gen}$$

“Mito” del Segundo Principio: la entropía siempre aumenta

Realidad:

- La entropía siempre aumenta en procesos adiabáticos (con irreversibilidades internas)
- En un proceso refrigerado internamente reversible la entropía siempre disminuye
- En un proceso refrigerado con irreversibilidades internas la entropía puede aumentar, disminuir o permanecer constante

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS CERRADOS

Es preciso calcular las temperaturas de frontera

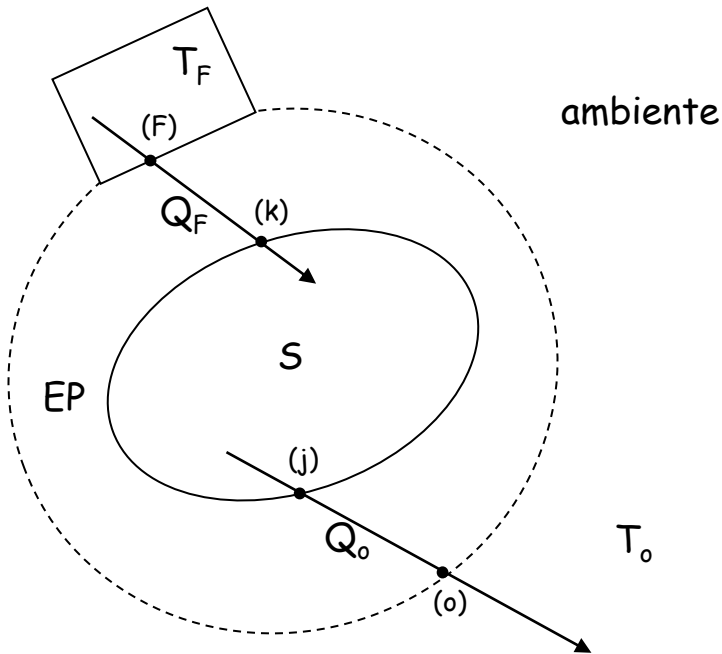
$$\Delta S_S = \frac{Q_F}{\bar{T}_k} - \frac{Q_o}{\bar{T}_j} + S_{gen,int}$$

Irreversibilidades externas

$$\Delta S_{EP} \approx 0 = \frac{Q_F}{T_F} - \frac{Q_F}{\bar{T}_k} + \frac{Q_o}{\bar{T}_j} - \frac{Q_o}{T_o} + S_{gen,ep}$$

Lo más cómodo, aunque se pierden detalles

$$\Delta S_{SA} \approx \Delta S_S = \frac{Q_F}{T_F} - \frac{Q_o}{T_o} + S_{gen,tot}$$



Planteamiento clásico:

$$\Delta S_u = \frac{-Q_F}{T_F} + \frac{Q_o}{T_o} + \Delta S_S + \Delta S_{ep} = S_{gen,tot}$$

$$\Delta S_u \geq 0$$



**Ejemplo:** Un motor eléctrico de 100 CV tiene un rendimiento global de 97,5%. El coeficiente global de transferencia (UA) de calor entre su carcasa y el ambiente, a 20°C, es de 41,9 W/K. Determinar:

- a) Calor disipado al ambiente
- b) Entropía generada por irreversibilidades internas
- c) Entropía generada por irreversibilidades externas
- d) Variación de entropía del Universo

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS ABIERTOS

$$\frac{dS_{vc}}{d\tau} = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{\bar{T}_k} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{gen,vc} \quad [\text{kW/K}]$$

En régimen permanente es nula si el VC es acotado

Del balance energético

Tablas o fórmulas

Resultado del cálculo. Valor positivo (si hay irreversibilidades internas) o nulo (proceso internamente reversible)

Temperatura media en un conducto que intercambia calor

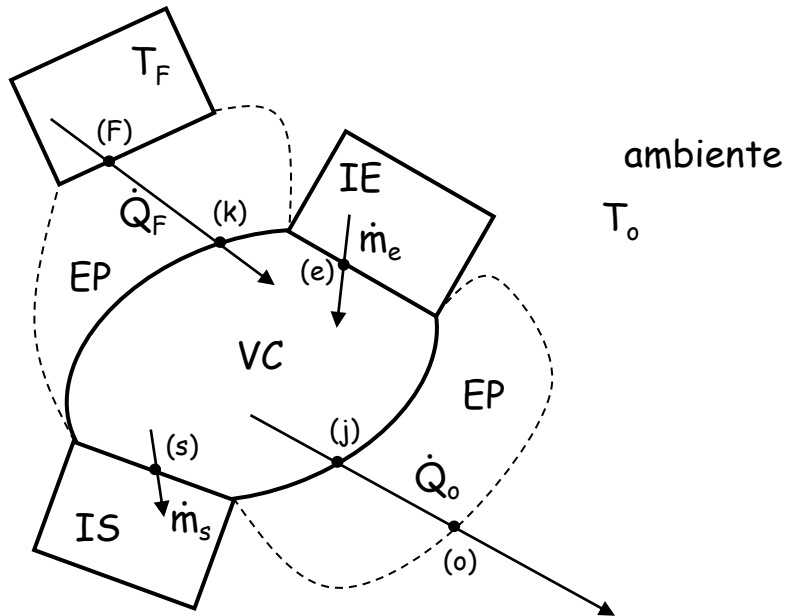
$$\bar{T}_{12} = \frac{\dot{Q}_{12}}{\int_1^2 \frac{\delta \dot{Q}}{T}} = \frac{\Delta h}{\int_1^2 \frac{dh}{T}} = \frac{\Delta h}{\underbrace{\Delta s}_{\Delta p=0}}$$

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS ABIERTOS

$$\frac{dS_{vc}}{d\tau}$$

- Si el volumen de control es un foco se ha de determinar del balance, imponiendo que la entropía generada es nula
- Si el volumen de control es finito (turbina, ...) y el sistema está en régimen permanente es nula
- Si el volumen de control es el entorno próximo se aproxima a cero por su pequeña masa

## BALANCE DE ENTROPÍA EN SISTEMAS ABIERTOS



Es preciso calcular las temperaturas de frontera

$$\frac{dS_{vc}}{d\tau} = \frac{\dot{Q}_F}{\bar{T}_k} - \frac{\dot{Q}_o}{\bar{T}_j} + \dot{m}_e s_e - \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{gen,vc}$$

Irreversibilidades externas

$$\frac{dS_{EP}}{d\tau} \approx 0 = \frac{\dot{Q}_F}{T_F} - \frac{\dot{Q}_F}{\bar{T}_k} + \frac{\dot{Q}_o}{\bar{T}_j} - \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \dot{S}_{gen,ep}$$

Lo más cómodo, aunque se pierden detalles

$$\frac{dS_{SA}}{d\tau} \approx \frac{dS_S}{d\tau} = \frac{\dot{Q}_F}{T_F} - \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \dot{m}_e s_e - \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{gen,tot}$$

Planteamiento clásico:

$$\frac{dS_u}{d\tau} = \frac{-\dot{Q}_F}{T_F} + \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \underbrace{\frac{dS_{vc}}{d\tau}}_{=0} + \underbrace{\frac{dS_{ep}}{d\tau}}_{\approx 0} - \dot{m}_e s_e + \dot{m}_s s_s = \dot{S}_{gen,tot}$$

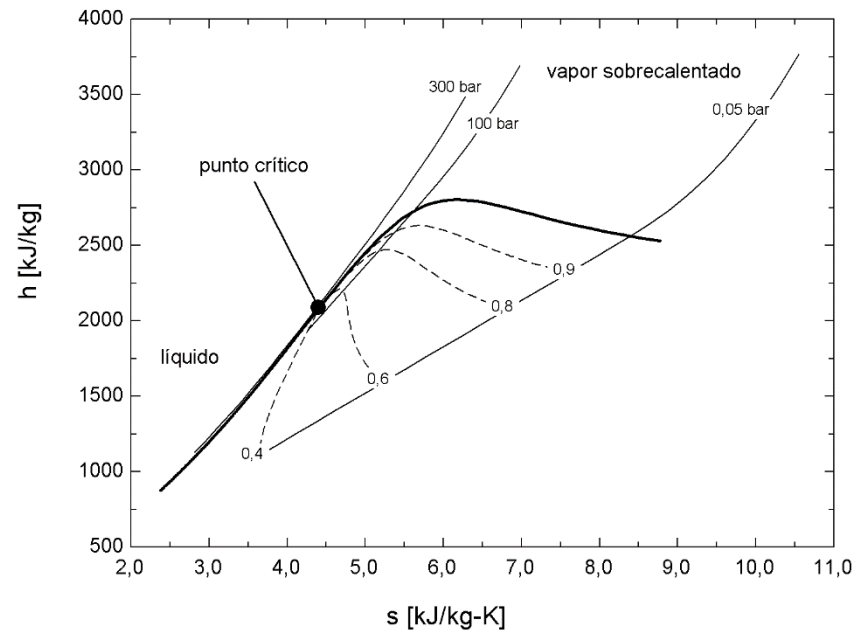
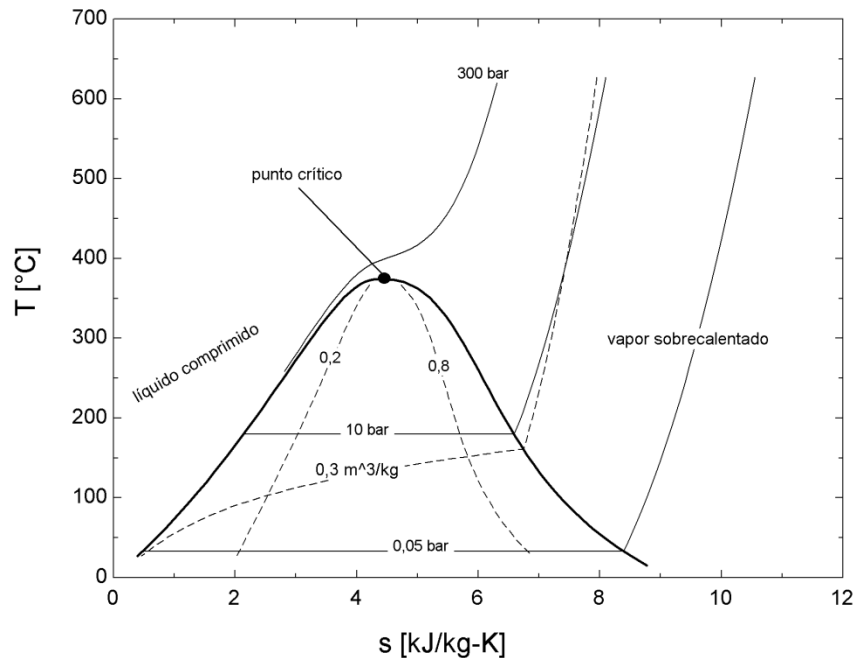
$$\frac{dS_u}{d\tau} \geq 0$$

# DETERMINACIÓN DE LA ENTROPÍA

## 6.6.1. Sustancias puras

- Región monofásica (líquido)  $s(T, p) \approx s_f(T)$
- Región monofásica (vapor sobrecalentado): TABLAS

- Región bifásica (vapor húmedo)  $s = s_f + x \underbrace{(s_g - s_f)}_{s_{fg}}$



## DETERMINACIÓN DE LA ENTROPÍA

### 6.6.2. Modelo incompresible

$$s_2 - s_1 = c \ln \left[ \frac{T_2}{T_1} \right]$$

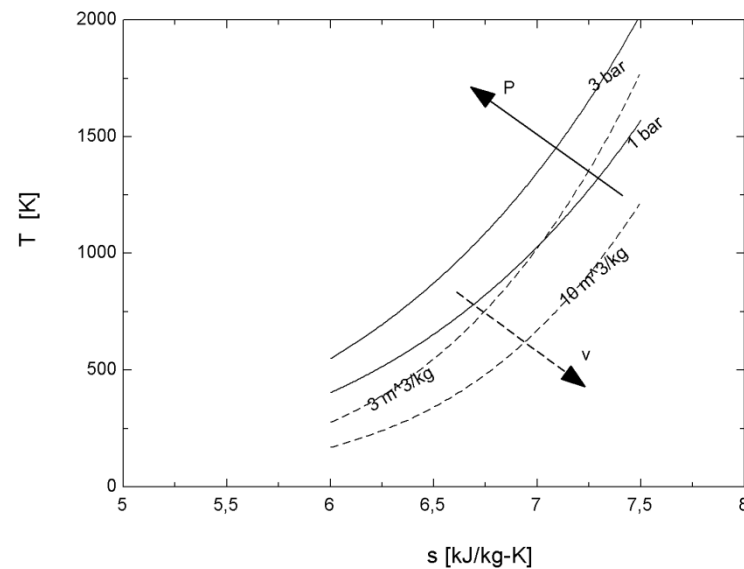
$$s = cte \Leftrightarrow T = cte$$

### 6.6.3. Modelo gas perfecto

$$s_2 - s_1 = C_p \ln \left[ \frac{T_2}{T_1} \right] - R \ln \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]$$

$$s_2 - s_1 = C_v \ln \left[ \frac{T_2}{T_1} \right] + R \ln \left[ \frac{v_2}{v_1} \right]$$

$$s = cte \Leftrightarrow p v^\gamma = cte$$



**Ejemplo:** Un compresor refrigerado por aire ( $C_p = 1,005 \text{ kJ/kg-K}$ ;  $\gamma = 1,4$ ) aspira  $220 \text{ g/s}$  del ambiente, a  $1 \text{ bar}$  y  $35^\circ\text{C}$ , consumiendo  $50 \text{ kW}$ . El proceso del aire en su interior puede asimilarse por una politrópica de índice  $1,25$ . A la salida del compresor la presión es de  $8 \text{ bar}$ .

El coeficiente global de transferencia de calor ( $UA$ ) entre su carcasa y el ambiente es de  $594 \text{ W/K}$ . Determinar:

- a) Calor disipado al ambiente
- b) Entropía generada por irreversibilidades internas
- c) Entropía generada por irreversibilidades externas
- d) Variación de entropía del Universo

## DETERMINACIÓN DE LA ENTROPÍA

### 6.6.4. Modelo gas ideal

$$s_2 - s_1 = s^o(T_2) - s^o(T_1) - R \ln \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]$$

$$s = cte \Leftrightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_r(T_2)}{p_r(T_1)}$$

Tablas de gas ideal

Otras representaciones menos habituales en el texto



**Ejemplo:** a una turbina llega aire a 1350°C y 15 bar, saliendo de la misma a 1,5 bar y sin variación de entropía. Determinar la temperatura de salida y el calor específico a presión constante medio en el caso de considerar el aire gas perfecto ( $\gamma=1,4$ ) o gas ideal. En ambos casos tómese  $R = 287 \text{ J/kg-K}$

# REPRESENTACIÓN DE PROCESOS CUASISTÁTICOS

## Sistemas cerrados

Balance de entropía:  $T ds = \delta q + \underbrace{T \delta s_{gen}}_{\delta \varepsilon}$

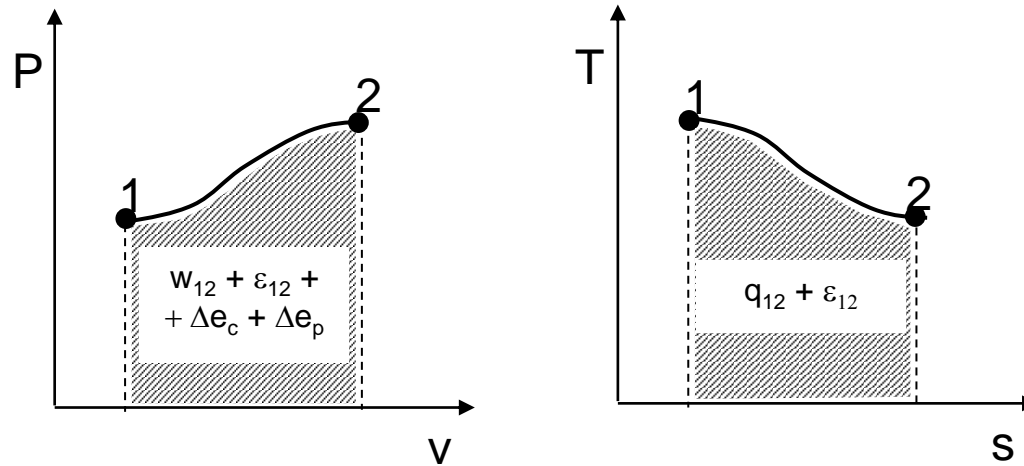
Conservación de la energía mecánica total:  $p dv = \delta w + \underbrace{\delta \varepsilon}_{-\delta w_d} + de_c + de_p$

**Solo en procesos cuasiestáticos**

Balance de energía:  $\delta q - \delta w = du + de_c + de_p$

**En todo proceso**

## REPRESENTACIÓN DE PROCESOS CUASIESTÁTICOS



## REPRESENTACIÓN DE PROCESOS CUASISTÁTICOS

### Ciclos termodinámicos

$$\oint T ds = q_{neto} + \varepsilon_{int}$$
$$\longrightarrow \oint T ds = \oint p dv$$
$$\oint p dv = w_{neto} + \varepsilon_{int}$$

$T_C$  : temperatura del foco caliente

$T_A$  : temperatura del proceso de aceptación de calor

$T_R$  : temperatura del proceso de rechazo de calor

$T_F$  : temperatura del foco frío

### Cualquier ciclo

$$\eta = 1 - \frac{T_F}{T_C} - \frac{T_F}{Q_C} (S_{gen,ext} + S_{gen,int})$$

$$\eta = 1 - \frac{T_R}{T_A} - \frac{T_R}{Q_C} S_{gen,int}$$

### Ciclos reversibles

$$\eta_{tot,rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

$$\eta_{int,rev} = 1 - \frac{T_R}{T_A}$$

# REPRESENTACIÓN DE PROCESOS CUASISTÁTICOS

## Sistemas abiertos

Balance de entropía:  $T ds = \delta q + \underbrace{T \delta s_{gen}}_{\delta \epsilon}$

Conservación de la energía mecánica total:  $-v dp = \delta w + \underbrace{\delta \epsilon}_{-\delta w_d} + de_c + de_p$

**Solo en procesos  
cuasistáticos**

Balance de energía:  $\delta q - \delta w = dh + de_c + de_p$

**En todo proceso**

## REPRESENTACIÓN DE PROCESOS CUASISTÁTICOS

### Particularización a gases perfectos

- Los procesos cuasiestáticos en toda sustancia pueden modelarse con una politrópica
- En el caso de un gas perfecto se puede definir el calor específico de una politrópica:

$$C_n = C_v \frac{n - \gamma}{n - 1}$$

- Una vez calculado:

$$\int_1^2 p \, dv = (C_n - C_v)(T_2 - T_1)$$

$$\int_1^2 T \, ds = C_n (T_2 - T_1)$$

$$-\int_1^2 v \, dp = (C_n - C_p)(T_2 - T_1)$$

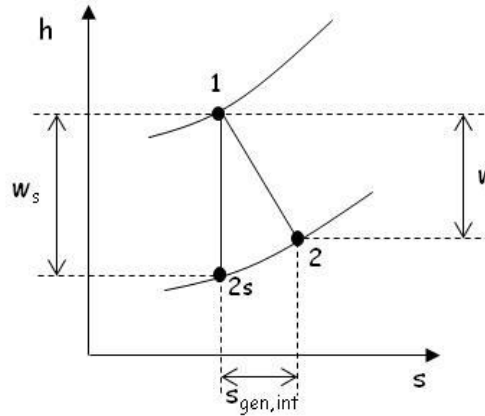
- Según las irreversibilidades internas las expresiones anteriores representarán trabajo, calor y/o energía disipada

## RENDIMIENTOS ISENTRÓPICOS

- Se definen en procesos adiabáticos
- Permiten modelar máquinas, especialmente turbomaquinaria

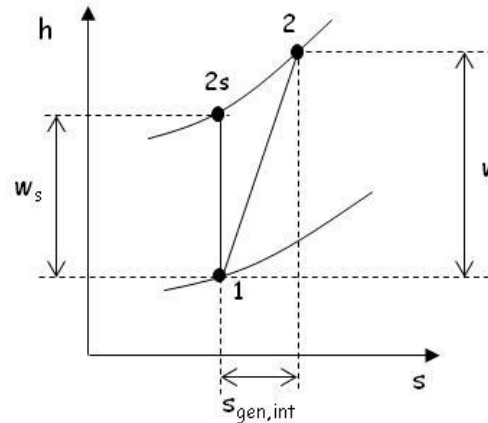
### Turbinas

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$



### Compresores

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$



## Realizar el ejemplo 6.5

**Ejemplo:** Un compresor adiabático aspira 600 kg/s de aire ( $R = 287 \text{ J/kg-K}$ ) a  $15^\circ\text{C}$  y 1 bar, impulsándolos hasta 15 bar. El rendimiento isentrópico es del 70%. Determinar la temperatura de salida del aire y el trabajo consumido considerando el aire:

- a) gas perfecto ( $\gamma = 1,4$ )
- b) gas ideal (tablas)

**Ejemplo:** Un compresor adiabático aspira 12 kg/s de amoníaco a  $10^\circ\text{C}$  como vapor saturado, impulsándolo hasta 14 bar. El rendimiento isentrópico es del 85%. Determinar la temperatura de salida y el trabajo consumido.



## PARTE III: EXERGÍA

## DEFINICIONES

- La entropía cuantifica el Segundo Principio pero es difícil de interpretar: unidades NO energéticas
  - El rendimiento de ciclos de potencia parece bajo, comparado con el 100%
  - El rendimiento isentrópico NO es aplicable a máquinas no adiabáticas
  - ¿Cuánta energía de la almacenada en un sistema es convertible en trabajo?Cuál es la energía utilizable o disponible de un sistema?
- 
- **Energía disponible o utilizable o exergía:** máxima cantidad de trabajo útil que se puede obtener de un sistema cuando evoluciona hasta el estado muerto intercambiando calor solo con el ambiente. El ambiente no puede ser el receptor del trabajo

- **Trabajo útil:** Trabajo entregado en valor neto al receptor  $W_u = W_{12} - p_o \Delta V$

(coincide con el trabajo en ciclos o en sistemas abiertos en régimen permanente)

- **Estado muerto:** Estado de un sistema en equilibrio con el ambiente. En dicho estado el sistema tiene eNergía, pero no eXergía.

$$(p_o; T_o) \left\{ \begin{array}{l} v_o = v(p_o, T_o) \\ u_o = u(p_o, T_o) \\ h_o = h(p_o, T_o) \\ s_o = s(p_o, T_o) \end{array} \right.$$

- **Trabajo reversible:** máxima cantidad de trabajo útil que se puede obtener de un sistema cuando evoluciona entre 2 estados dados manteniendo constantes las transferencias de calor salvo con el ambiente.

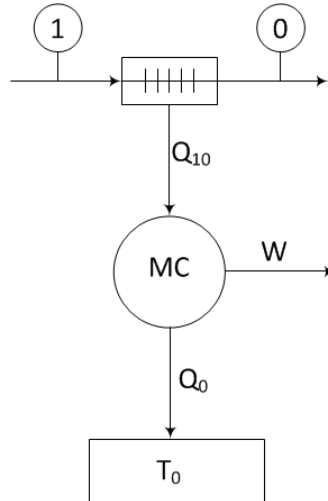
- **Irreversibilidad, Exergía destruida o energía utilizable perdida:**

$$I = W_{rev} - W_u = T_o \Delta S_u$$

## Balance exergético en sistemas abiertos

$$\dot{\Phi}_S = \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W}_u + \dot{m}_e \psi_e - \dot{m}_s \psi_s - \underbrace{\dot{I}_{\text{int}}}_{T_0 \dot{S}_{\text{gen,int}}}$$

Aparece la exergía de una corriente o exergía de flujo:



$$\psi = h - h_0 - T_0 (s - s_0) + \frac{c^2}{2} + g(z - z_0)$$

$$\begin{aligned} \dot{m} \cdot \psi &= \dot{Q}_{10} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{10}}\right) = \dot{Q}_{10} - T_0 \frac{\dot{Q}_{10}}{T_{10}} = \dot{m} \cdot \left( h_1 - h_0 + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 \right) - T_0 \cdot \dot{m} \cdot (s_1 - s_0) = \\ &= \dot{m} \cdot \left\{ \underbrace{(h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)}_{\text{exergía térmica}} + \underbrace{\frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1}_{\text{ex. mecánica}} \right\} \end{aligned}$$

que no hay que confundir con la variación de exergía del volumen de control:  $\frac{d\Phi}{dt} = \dot{\Phi}_S$

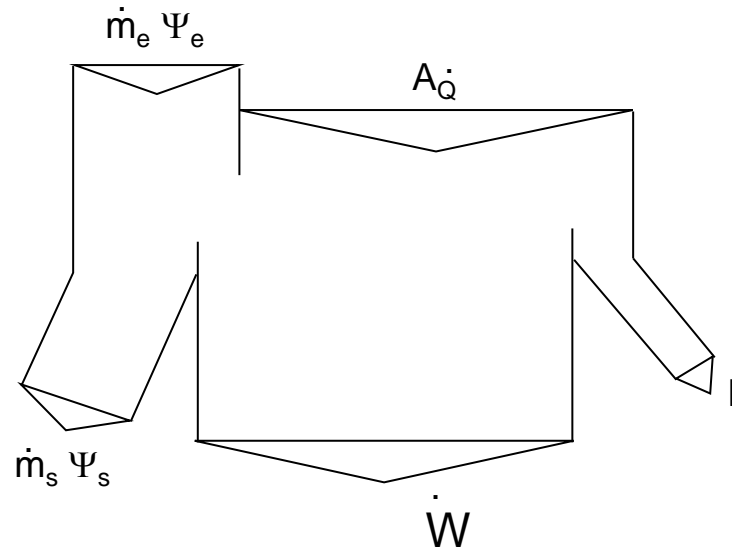
Al igual que pasaba con la entropía, la variación de exergía del volumen de control:

- Si el volumen de control es un foco se ha de determinar del balance, imponiendo que la entropía generada es nula
- Si el volumen de control es finito (turbina, ...) y el sistema está en régimen permanente es nula
- Si el volumen de control es el entorno próximo se aproxima a cero por su pequeña masa

## Diagrama de Sankey

- Se puede definir para abiertos o cerrados, aunque es más común para abiertos
- Consiste en plantear el balance exergético en forma de términos que entran y salen, interpretando cada magnitud con flechas de ancho proporcional

$$\dot{m}_e \psi_e + A_{\dot{Q}} = \dot{m}_s \psi_s + \dot{W}_u + i$$



Realizar el **Ejemplo 7.3** del texto

Realizar el **Ejemplo 7.4** del texto

## Eficiencia exergética

- Establece un rendimiento con base en el Segundo Principio

**Sistemas que intercambian trabajo:**

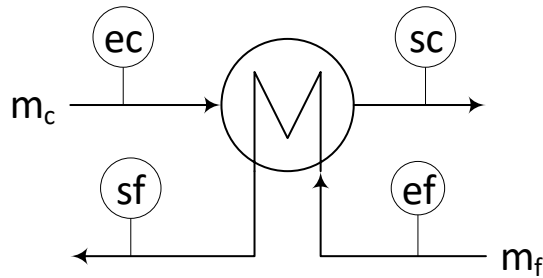
$$\varphi = \begin{cases} \frac{w_u}{w_u + i} & \text{si se produce trabajo} \\ \frac{w_u - i}{w_u} & \text{si se consume trabajo (todos los términos positivos)} \end{cases}$$

**Sistemas que NO intercambian trabajo (válvulas, toberas y difusores):**

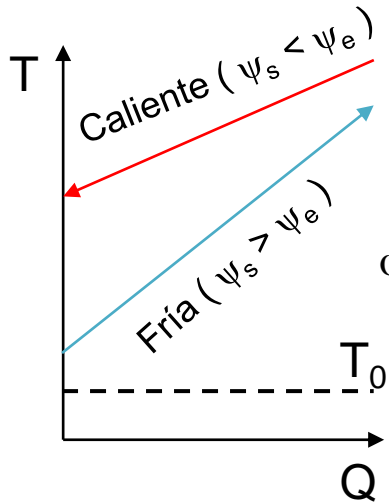
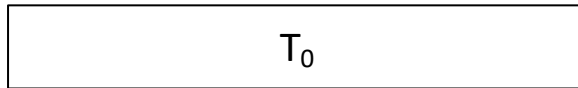
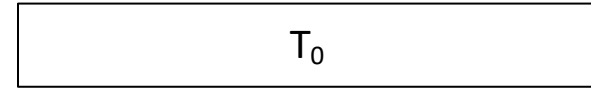
$$EX_1 = EX_2 + I \Rightarrow \varphi = \frac{EX_2}{EX_1} \quad \begin{array}{l} \text{(algunos autores usan este criterio} \\ \text{siempre, aunque haya trabajo)} \end{array}$$

# Eficiencia exergética

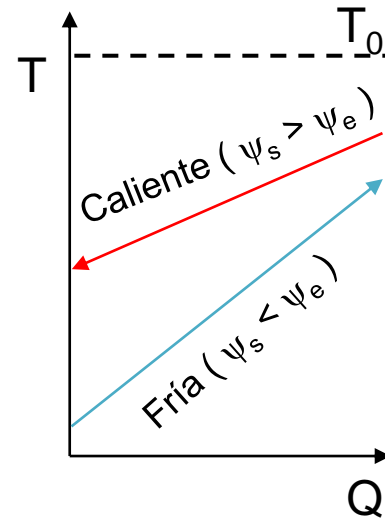
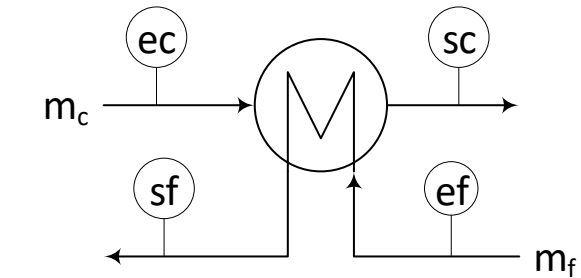
## Sistemas que NO intercambian trabajo (intercambiadores de calor)



Versión corrientes:



$$\phi_{HX} = \frac{\dot{m}_f \cdot (\psi_{sf} - \psi_{ef})}{\dot{m}_c \cdot (\psi_{ec} - \psi_{sc})}$$



$$\phi_{HX} = \frac{\dot{m}_c \cdot (\psi_{sc} - \psi_{ec})}{\dot{m}_f \cdot (\psi_{ef} - \psi_{sf})}$$

Síntesis:

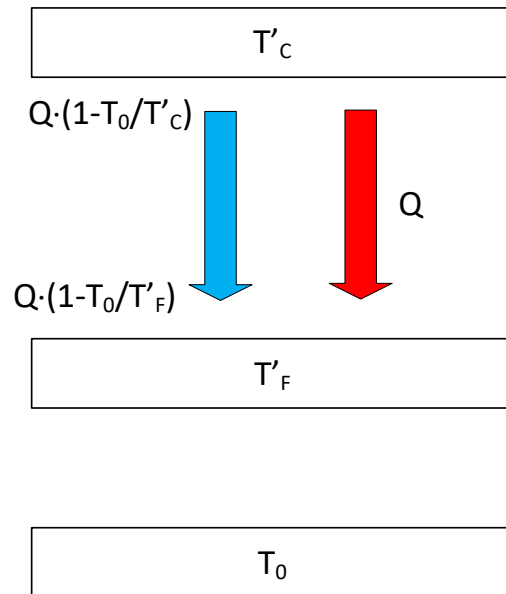
(los incrementos de exergía se miden en cada corriente como “salida-entrada”, con el signo que tengan)

$$\phi_{HX} = \frac{\max\{\Delta\dot{\Psi}_c, \Delta\dot{\Psi}_f\}}{\min\{\Delta\dot{\Psi}_c, \Delta\dot{\Psi}_f\}}$$

# Eficiencia exergética

Sistemas que NO intercambian trabajo (intercambiadores de calor)

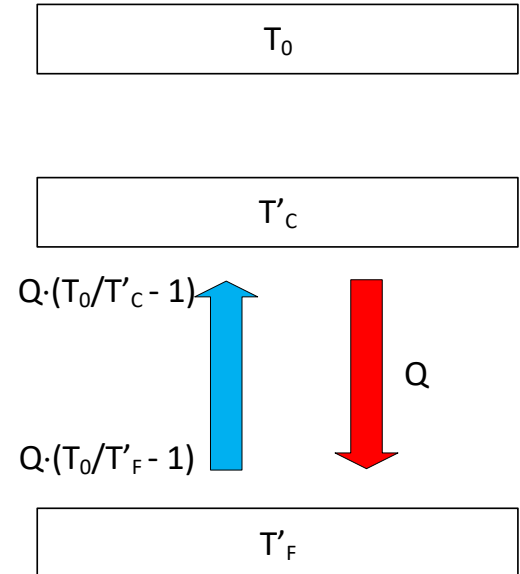
Versión focos:



$$\varphi_{HX} = \frac{\dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T'_F}\right)}{\dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T'_C}\right)}$$

$$T'_X = \frac{h_{sx} - h_{ex}}{s_{sx} - s_{ex}}$$

La temperatura del foco coincidirá con la media entrópica si  $\Delta p = 0$



$$\varphi_{HX} = \frac{\dot{Q} \cdot \left(\frac{T_0}{T'_C} - 1\right)}{\dot{Q} \cdot \left(\frac{T_0}{T'_F} - 1\right)}$$



# Eficiencia exergética

Sistemas que NO intercambian trabajo (intercambiadores de calor)

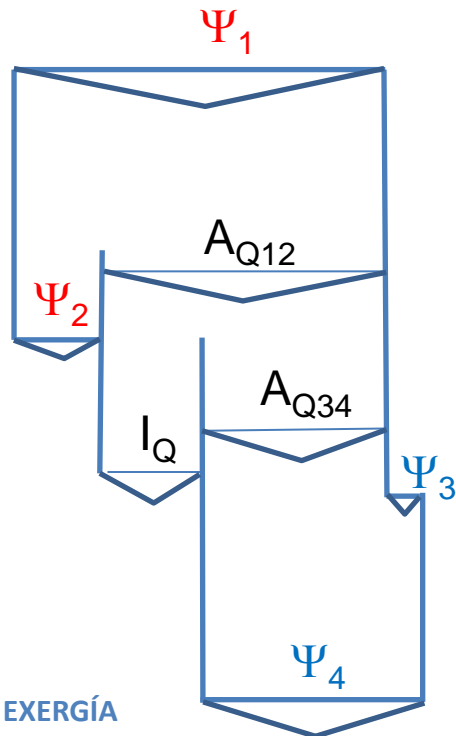
Sankey de un intercambiador de calor de superficie sin pérdidas de carga

Visto como corrientes que intercambian calor:

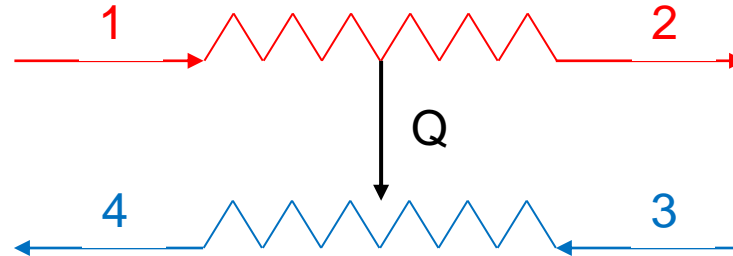
$$\Psi_1 = A_{Q12} + \Psi_2$$

$$A_{Q12} = I_Q + A_{Q34}$$

$$\Psi_3 + A_{Q34} = \Psi_4$$



$$\varphi = \frac{A_{Q34}}{A_{Q12}}$$



$$A_{Q12} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{12}}\right)$$

$$A_{Q34} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{34}}\right)$$

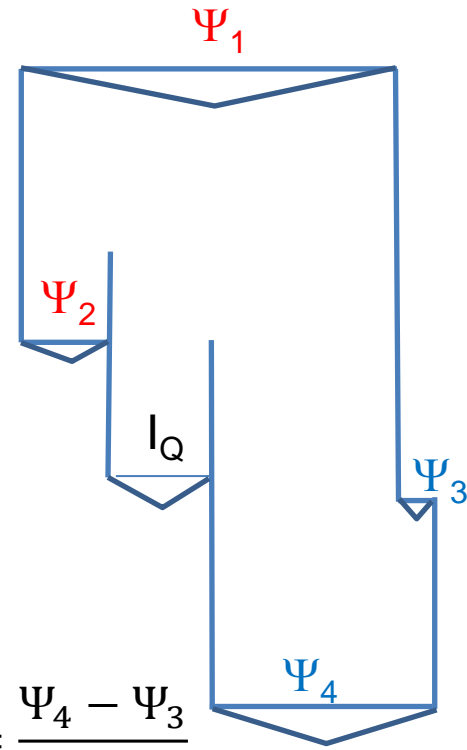
$$I_Q = T_0 \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{\bar{T}_{34}} - \frac{1}{\bar{T}_{12}}\right)$$

Visto como volumen de control 1-3/2-4:

$$\Psi_1 + \Psi_3 = \Psi_2 + \Psi_4 + I_Q$$

↓

$$(\Psi_1 - \Psi_2) = (\Psi_4 - \Psi_3) + I_Q$$



$$\varphi = \frac{\Psi_4 - \Psi_3}{\Psi_1 - \Psi_2}$$

## Ciclos:

Si sólo hay 2 focos y uno de ellos es el ambiente:

Ciclo de potencia:  $\varphi = \frac{\eta}{\eta_{Carnot}}$

Ciclo inverso:  $\varphi = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$

En general:

Ciclo de potencia:  $\varphi = \frac{W_u}{W_u + I}$

Ciclo inverso:  $\varphi = \frac{W_u - I}{W_u}$

En ciclos la eficiencia exergética facilita la interpretación:

Primer Principio:  $\eta \leq \eta_{Carnot} < 100\%$

Segundo Principio:  $\varphi \leq 100\%$