

Bibliografía: Cengel

# EXERGÍA: UNA MEDIDA DEL POTENCIAL DE TRABAJO

1 / 44

## **UNIDAD 8: EXERGÍA O DISPONIBILIDAD**

### **8.A. Concepto**

Concepto de exergía: energía útil y no útil. Estado muerto. Exergía Mecánica: cinética y potencial. Sistemas cerrados. Exergía por Presión: expansión y compresión. Diagramas P-v. Trabajo reversible e irreversible. Irreversibilidad. Exergía Térmica. Exergía Termomecánica. Cálculo de la exergía para sistemas cerrados. Diagrama T-s.

### **8.B. Sistemas Abiertos**

Máquinas Térmicas: rendimiento exergético. Balance de exergía: transformaciones reversibles e irreversibles. Sistemas cerrados y abiertos.

Principios  
Termodinámicos

1er. Ppio.

Cantidad de  
Energía

2do. Ppio.

Calidad de Energía

Degradación de  
la Energía

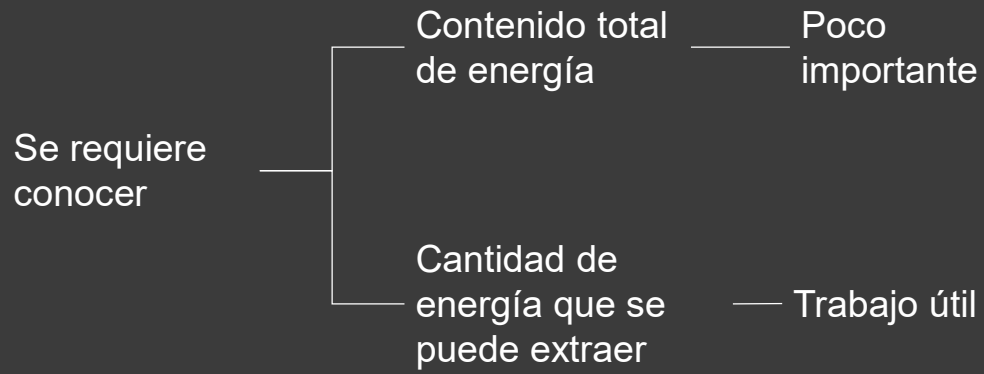
⊙ Exergía – Disponibilidad – Energía disponible

Trabajo Máximo Útil  
Potencial que puede  
obtenerse de un Sistema

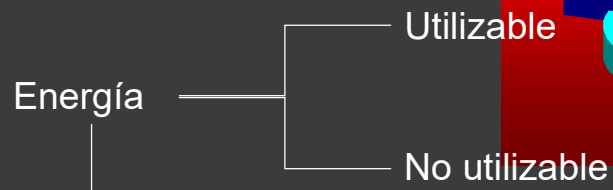


## ⦿ En busca de una nueva Fuente de Energía

- Ejemplo: energía geotérmica



## ⊙ Energía

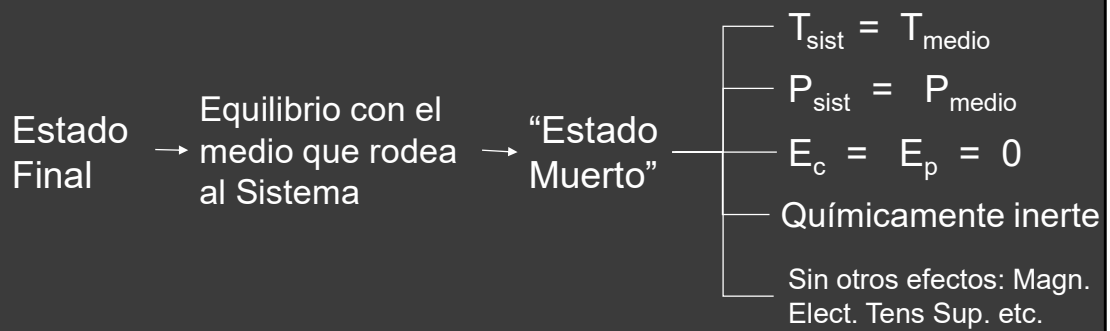
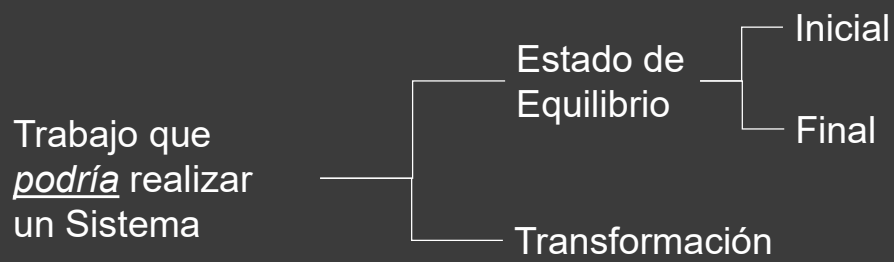


Se requiere definir una nueva Propiedad

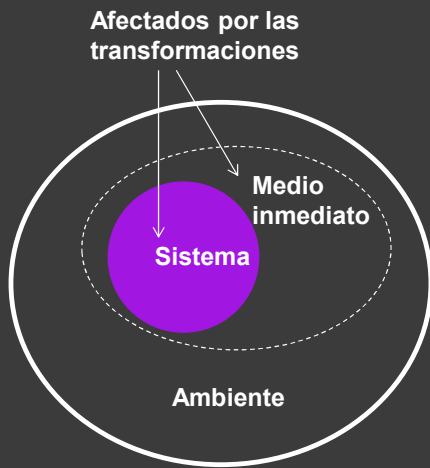
**EXERGIA:**

energía disponible en un estado de equilibrio especificado

● *Exergía*



## ○ Sistema y Medio



“Estado Muerto”

Exergía = 0

Las propiedades del medio ambiente son las del lugar en donde se encuentra el sistema

A menos que se especifiquen otras:

$P_{\text{medio}} = 1 \text{ atm}$

$T_{\text{medio}} = 25 \text{ °C}$



⦿ ejemplos de Sistemas con Exergía



Viento



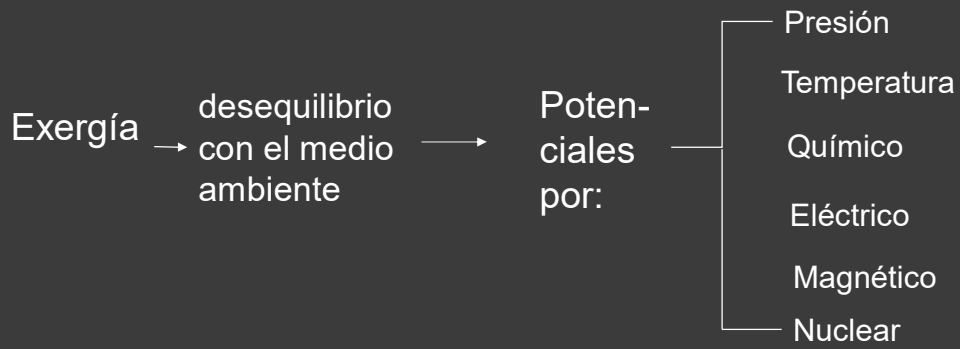
Madera



● *Exergía*

Trabajo que podría realizar un Sistema

— desequilibrio — potencial



◉ *Exergía Termomecánica:*

Presión y Temperatura

“Estado Sistema”  $\xrightarrow{\text{Exergía} \neq 0}$

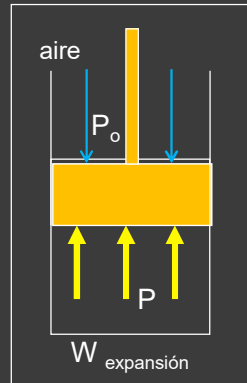
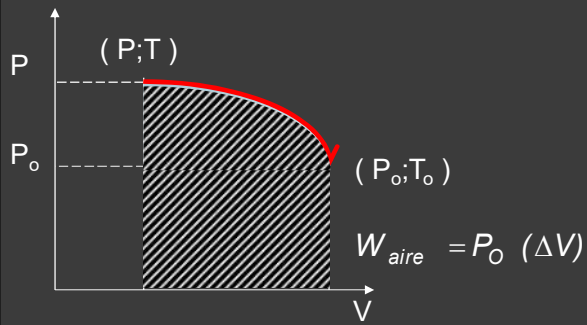
$$P_{\text{sistema}} \neq P_{\text{medio}}$$

$$T_{\text{sistema}} \neq T_{\text{medio}}$$

Pueden existir otros desequilibrios pero que no tienen mayor importancia en Termodinámica: por ejemplo desequilibrio eléctrico, magnético, nuclear, etc.

# Trabajo intercambiado por el sistema

- Desequilibrio  $P > P_o$ : Trabajo expansión



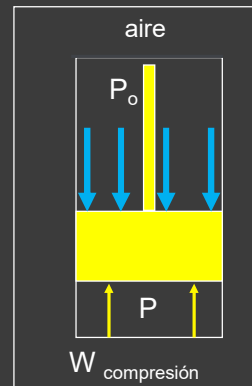
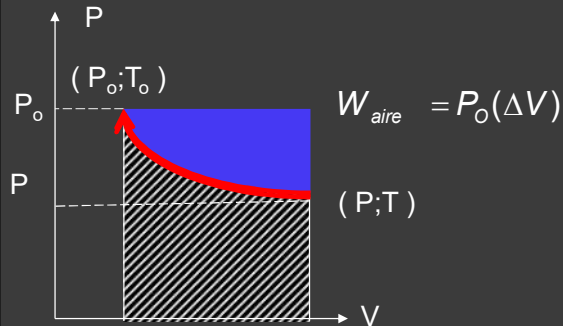
$$W_{\text{útil}} = W_{\text{sist}} - W_{\text{aire}}$$

Trabajo reversible de expansión: **máximo trabajo útil** que puede realizar un sistema entre 2 estados especificados

$$W_{\text{útil}} = W - P_o \Delta V$$

# Trabajo intercambiado por el sistema

●  $P < P_o$ : Trabajo compresión



$dW_{\text{útil}} = P_o dV - dW$

$dV < 0$   
 $dW < 0$



$dW_{\text{útil}} = dW - P_o dV$

Trabajo reversible de compresión: **mínimo trabajo útil** que requiere un sistema para ser comprimido entre 2 estados especificados

## Trabajo Reversible y Exergía

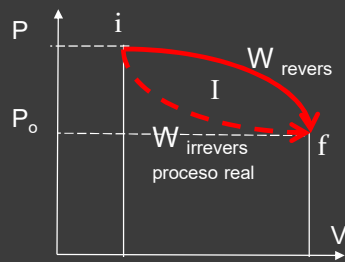
- **Trabajo Reversible:** máximo trabajo útil que se produce cuando un sistema se transforma entre 2 estados de equilibrio.
- **Exergía:** máximo trabajo útil que se produce cuando un sistema se transforma entre un estado de equilibrio y el estado muerto.

Requiere que se cumplan 2 condiciones:

$$\text{Exergía} \left\{ \begin{array}{l} W_{\text{útil reversible}} \\ \text{Estado final} = \text{Estado muerto} \end{array} \right.$$

## Trabajo reversible e irreversibilidad

- **Trabajo irreversible:** trabajo útil que se produce o se consume cuando un sistema se transforma entre 2 estados de equilibrio mediante una transformación irreversible.



$$W_{\text{útil}} \neq W_{\text{reversible}}$$

$$I = W_{\text{reversible}} - W_{\text{útil}}$$

*I = irreversibilidad*

# Trabajo Reversible e Irreversible

- ⊙ Trabajo Reversible:

no genera entropía  
no destruye Exergía

irreversibilidad  $I = 0$

- ⊙ Trabajo Irreversible:

$$I = W_{\text{reversible}} - W_{\text{útil}}$$

*Dispositivos productores de W*  $W_{\text{rev}} > W_{\text{util}}$

*Dispositivos consumidores de W*  $W_{\text{rev}} < W_{\text{util}}$

*Siempre:  $I \geq 0$*

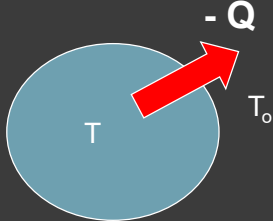
**Irreversibilidad:** potencial de trabajo desperdiciado

18 / 44

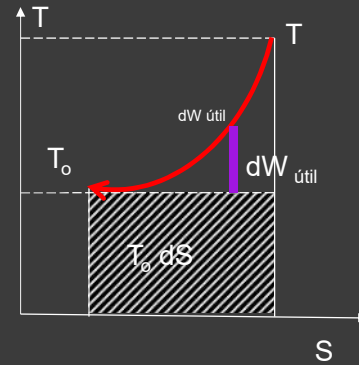


## Exergía del Calor de un sistema con capacidad calorífica limitada

- Entrega de calor al medio:  $T > T_0$



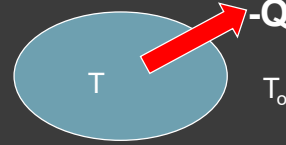
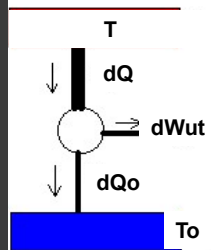
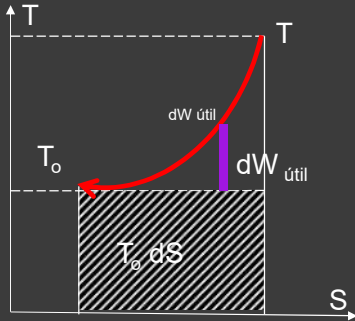
El sistema como consecuencia de la pérdida de calor, reduce su Temperatura hasta lograr el equilibrio con el medio ( $T_0$ ).



$dW_{\text{útil}}$  : Trabajo realizado por infinitos ciclos de Carnot con Fuentes Calientes a  $T$  variables y una FF a  $T_0$

# Exergía Calor: sistema capacidad calorífica limitada

- Entrega de calor al medio:  $T > T_0$

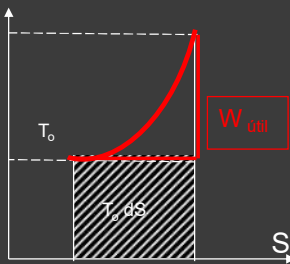


$$dW_{\text{útil}} = dQ - T_0 dS$$

$$dS < 0$$

$$dQ < 0$$

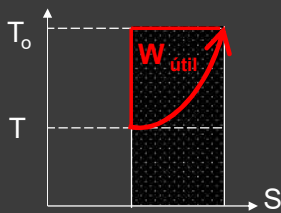
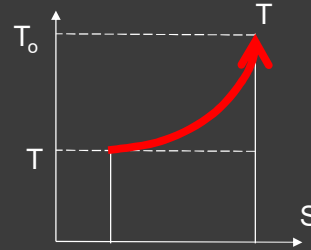
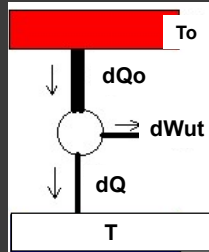
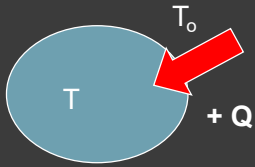
$$dW_{\text{útil}} = T_0 dS - dQ$$



$$W_{\text{útil}} = \int [T_0 dS - dQ]$$

# Exergía del Calor

- Recibe calor del medio:  $T < T_0$



$$T_0 dS$$

$$dW_{util} = T_0 dS - dQ$$

## Exergía del Trabajo

- Entrega de trabajo al medio:  $P > P_0$
- Recibe trabajo del medio:  $P < P_0$

$$dW_{\text{útil}} = dW - P_0 dV$$

## Exergía del Calor

- Recibe calor del medio:  $T < T_0$
- Entrega de calor al medio:  $T > T_0$

$$dW_{\text{útil}} = T_0 dS - dQ$$

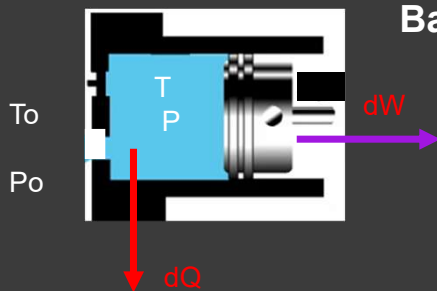
- Conclusión:** Independientemente del sentido en que se transfiere energía, la Exergía tiene la misma ecuación

## Exergía Mecánica y Térmica



### Sistema en equilibrio

- El sistema se encuentra a  $T$  y  $P$  distintas a las del medio ambiente inmediato.



### Balance de Energía Sistema Cerrado

$$dE_{ent} - dE_{sal} = dE_{sistema}$$

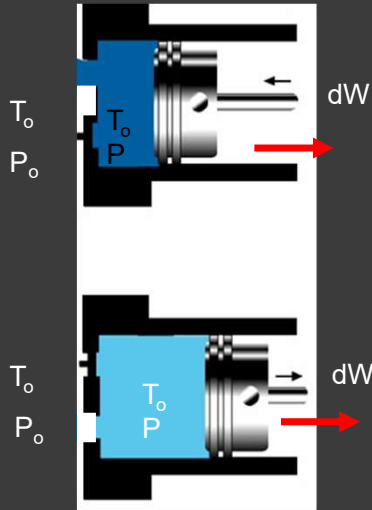
$$0 - (dQ + dW_{total}) = dU$$

25 / 44

Primero consideramos que solo existe diferencia en las presiones

## Exergía mecánica: diferencia de Presión

- Se emplea un Cilindro-Pistón ideal entre el Sistema y Medio



$$dW = P dV$$

$$dW = P dV + P_o dV - P_o dV$$

$$dW = (P - P_o) dV + P_o dV$$

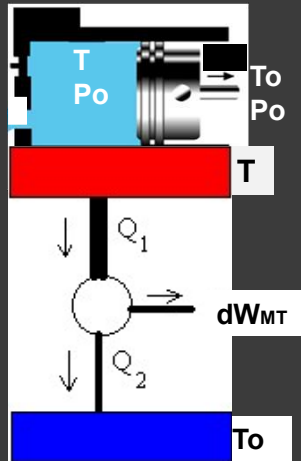
$$dW = dW_{util\ sist} + P_o dV$$

26 / 44

Posteriormente consideramos que solo existe diferencia en las Temperaturas

## Exergía Térmica: diferencia de Temperatura

- Se emplea una Máquina Térmica entre el Sistema y Medio
- Se utiliza la Máquina de Carnot (rendimiento máximo)



$$\eta = \frac{dW_{MT}}{dQ} = 1 - \frac{T_o}{T}$$

$$dW_{MT} = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) dQ = \left(dQ - \frac{T_o dQ}{T}\right)$$

$$dW_{MT} = \left(dQ - \frac{T_o}{T} \underbrace{dQ}_{-dS}\right) = dQ - (-T_o dS)$$

$$dQ = dW_{MT} - T_o dS$$

27 / 44

consideramos que existen diferencias en las Temperaturas y en las Presiones

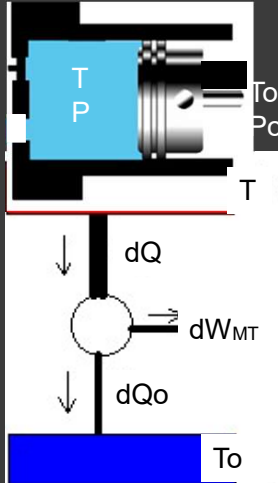
## Exergía del Calor y Mecánica

$$dE_{ent} - dE_{sal} = dE_{sistema}$$

$$0 - (dQ + dW) = dU$$

$$dW = dW_{util\ sist} + P_0 dV$$

$$dQ = dW_{MT} - T_0 dS$$



Reemplazando:

$$-[(dW_{MT} - T_0 dS) + (dW_{util\ sist} + P_0 dV)] = dU$$

$$-[(dW_{MT} + dW_{util\ sist} - T_0 dS + P_0 dV)] = dU$$

$$dW_{MT} + dW_{util\ sist} = dW_{Total}$$

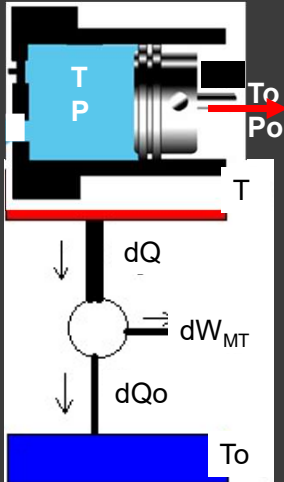
$$-dW_{total} + T_0 dS - P_0 dV = dU$$

$$dW_{total} = -dU - P_0 dV + T_0 dS$$



## Exergía del calor y Mecánica

$$dW_{total} = -dU - P_0 dV + T_0 dS$$



- Integrando entre  $u, v, s$  y  $u_0, v_0, s_0$ :

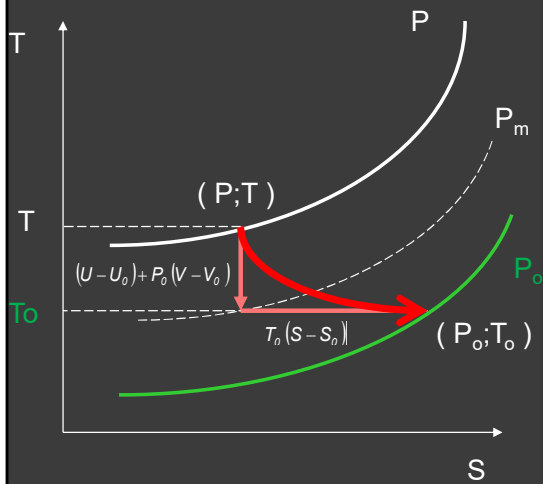
$$W_{total\ max} = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0)$$

$$Ex = (U - U_0) + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0)$$

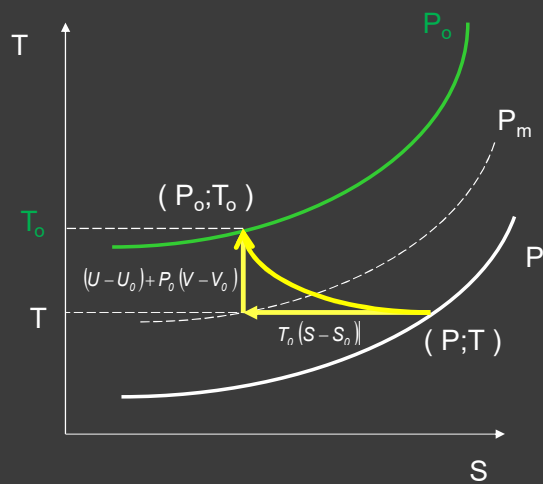
Exergía para Sistemas Cerrados

# Representación en T - s

$$Ex = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$



- Transformación para:  
 $P > P_0$      $T > T_0$



- Transformación para:  
 $P < P_0$      $T < T_0$

- ◉ *Exergía asociada a la Energía Mecánica*

- ◉ Energía Cinética: puede transformarse totalmente en Trabajo Útil

$$Ex_{ec} = \frac{1}{2} mc^2$$

$$ex_{ec} = \frac{1}{2} c^2$$

- ◉ Energía Potencial: puede transformarse totalmente en Trabajo Útil

$$Ex_{ep} = m g z$$

$$ex_{ep} = g z$$

- Exergía Termomecánica, Cinética y Potencial

$$Ex = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{c^2}{2} + mgZ \quad \text{kJ}$$

- Exergía total específica

$$ex = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{c^2}{2} + gZ \quad \text{kJ / kg}$$

- Cambios de Exergía total específica entre 2 estados :

$$ex_1 = (u_1 - u_0) + P_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0) + \frac{c_1^2}{2} + g(Z_1) \quad ex_2 = (u_2 - u_0) + P_0(v_2 - v_0) - T_0(s_2 - s_0) + \frac{c_2^2}{2} + g(Z_2)$$

$$\Delta ex = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1)$$

## ◉ Exergía de Flujo: Sistemas Abiertos

- Energía necesaria para mantener el flujo en una tubería:

$$W_{\text{flujo}} = PV$$

- Como el aire ejerce una contrapresión:  $ex_{\text{flujo}} = (P - P_o)V$

$$ex_{\text{sist abierto}} = ex_{\text{sist cerrado}} + ex_{\text{flujo}}$$

- Reemplazando:

$$ex_{\text{sist ab}} = (u - u_o) + P_o(v - v_o) - T_o(s - s_o) + (P - P_o)V$$

$$ex_{\text{sist ab}} = (u + Pv) - (u_o + P_o v_o) - T_o(s - s_o)$$

- Exergía específica para sistemas abiertos será:

$$ex_{\text{sist ab}} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad \text{kJ / kg}$$

33 / 44

## ● Exergía de Flujo: Sistemas Abiertos

- Cambios de Exergía para sistemas abiertos:

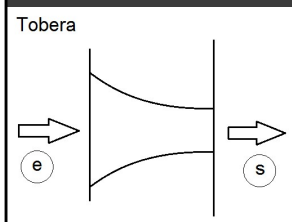
$$\Delta ex_{sist\ ab} = (h_2 - h_1) - T_0 (s_2 - s_1) + \frac{(c^2_2 - c^2_1)}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- Exergía Termomecánica, Cinética y Potencial

- Cambios de Exergía en Volumen de control:

La Exergía es una propiedad del sistema.

Si las propiedades no cambian, la exergía tampoco



Ejemplo: Tobera de Flujo Estable

$\dot{Q} \approx 0$	$P_s < P_e$
$\Delta ep \cong 0$	$T_s < T_e$
$W = 0$	

$$\Delta ex_{\text{punto sist}} = 0$$

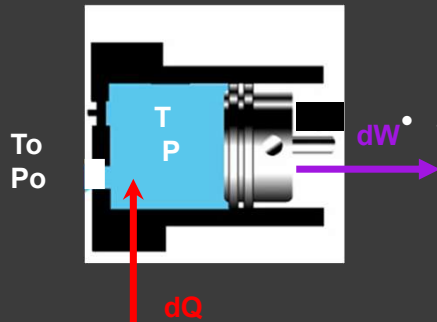
La Exergía de un sistema cerrado es siempre positiva o cero:

$$ex \geq 0 \quad \text{aún cuando } T < T_o$$

$$P < P_o$$

## ● Eficiencia de las Máquinas Térmicas

- Según el 1er. Principio para Sistemas Cerrados



$$(Q_{1-2} - W_{1-2}) = \Delta U$$

- Su eficiencia según el 1er. Ppio será:

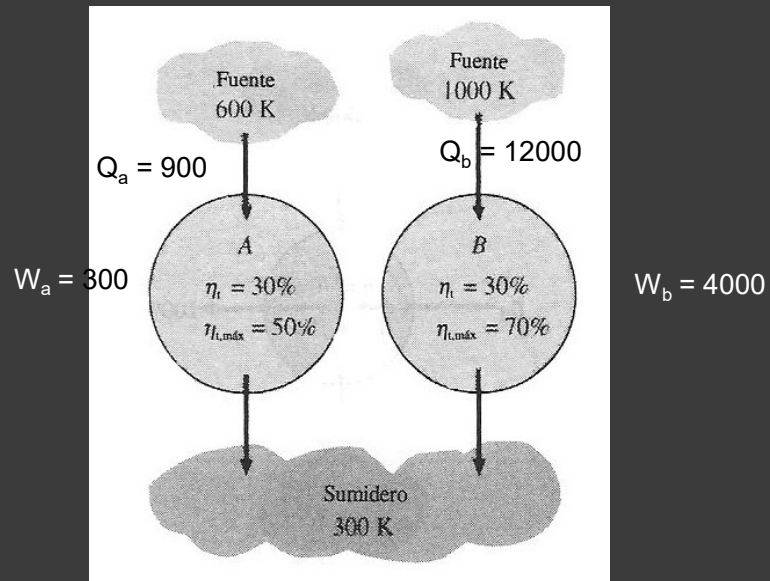
$$n_{1er\ ppio} = \frac{W_{1-2}}{Q_{1-2}}$$

- Su eficiencia según el 2do. Ppio será:

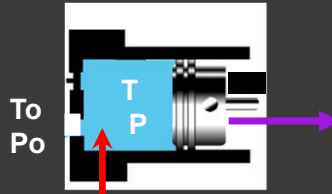
$$n_{Carnot} = 1 - \frac{T_o}{T} \quad n_{2do\ ppio} = \frac{n_{máquina\ termica}}{n_{Carnot}}$$



# Ejemplo: rendimientos



## ● Eficiencia de las Máquinas Térmicas



$$(Q_{1-2} - W_{1-2}) = \Delta U$$

- Según el 1er. Ppio será:

$$n_{1er\ ppio} = \frac{W_{1-2}}{Q_{1-2}}$$

Máq. A (KJ)	Máq. B (KJ)
$Q_a = 900$	$Q_b = 12000$
$W_a = 300$	$W_b = 4000$
Rendimiento = 30 %	

- Su eficiencia según Carnot será:

$$n_{Carnot} = 1 - \frac{T_o}{T}$$

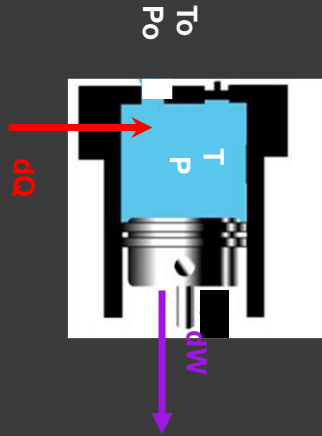
Máq. A (° K)	Máq. B (° K)
$T = 600$	$T = 1000$
$T_o = 300$	$T_o = 300$
$n_{Carnot} = 50 \%$	$n_{Carnot} = 70 \%$

$$n_{2do\ ppio} = \frac{30\%}{50\%} = 60\%$$

$$n_{2do\ ppio} = \frac{30\%}{70\%} = 42\%$$

## ○ Eficiencia de las Máquinas Térmicas

- Otra forma de definir el rendimiento



- Dispositivos que producen Trabajo:

$$\eta = \frac{W_{\text{útil}}}{W_{\text{rev}}}$$

- Dispositivos que consumen Trabajo:

$$\eta = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{útil}}}$$

## ○ Eficiencia de las Máquinas Térmicas

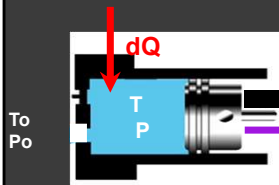
- Otra forma: **Rendimiento Exergético**

Permite calcular rendimientos para todos los sistemas aunque no produzcan  $W$

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{recuperada}}{Ex_{suministrada}} = 1 - \frac{Ex_{destruida}}{Ex_{suministrada}}$$

$$Ex_{suministrada} = Ex_{recuperada} + Ex_{destruida}$$

Para Máquinas Térmicas:



Exergía Suministrada: calor neto recibido por la MT ( $Q - Q_o$ )

Exergía recuperada:  $W$  entregado por la MT

## ⦿ Eficiencia de las Máquinas Térmicas

- Rendimiento Exergético

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{recuperada}}{Ex_{suministrada}} = 1 - \frac{Ex_{destruida}}{Ex_{suministrada}}$$

Para Bombas de calor / Máquinas Frigoríficas:

Exergía Suministrada: W recibido por la BC / MF

Exergía recuperada:

Bomba Calor: cantidad de calor total recibido por la Fuente Caliente

M Frigorífica: cantidad de calor extraída de la Fuente Fria

## *Balance de Exergía.*

- Entropía:

Surge por intercambios de: calor (Q), masa (m) o por irreversibilidades (I).

- Exergía:

Surge por intercambios de: calor (Q), trabajo (W), masa (m) o por irreversibilidades (I).

# Balance de Exergía.

- Transformaciones Reversibles:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Exergía Total} \\ \text{entrada} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Exergía Total} \\ \text{salida} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Variación} \\ \text{Exergía Total} \\ \text{sistema} \end{array} \right]$$

- Transformaciones Irreversibles:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Exergía Total} \\ \text{entrada} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Exergía Total} \\ \text{salida} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Exergía Total} \\ \text{destruida} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Variación} \\ \text{Exergía Total} \\ \text{sistema} \end{array} \right]$$

# Balance de Exergía.

- Transformaciones irreversibles como exergía:

$$X_{ent} - X_{sal} - X_{dest} = \Delta X_{sistema} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

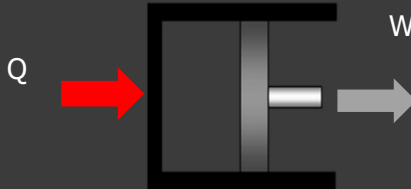
- Transformaciones Irreversibles como flujo de exergía:

$$\dot{X}_{ent} - \dot{X}_{sal} - \dot{X}_{dest} = \Delta \dot{X}_{sistema} \quad [kW]$$



# Balance de Exergía.

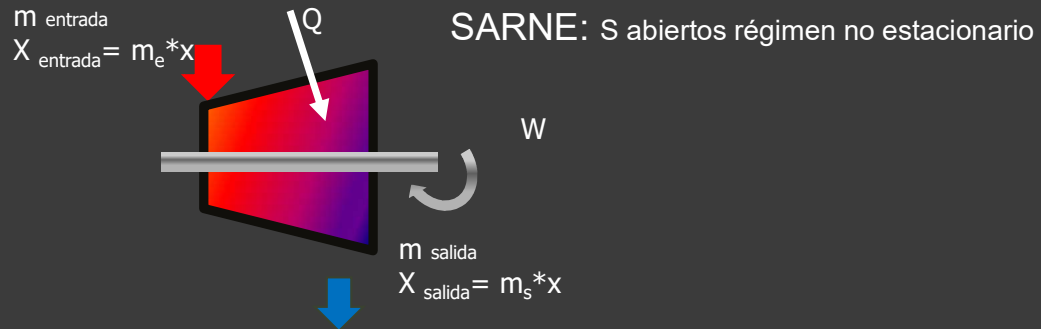
- Sistemas cerrados y procesos irreversibles



$$X_{calor} - X_{trabajo} - X_{dest} = \Delta X_{sistema} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

# Balance de Exergía.

## Sistemas abiertos o volumen de control



$$X_{\text{calor}} - X_{\text{trabajo}} + m_{\text{ent}} x_{\text{ent}} - m_{\text{sal}} x_{\text{sal}} - X_{\text{dest}} = \Delta X_{\text{vc}} \quad [\text{kJ}]$$

SARE:  $\Delta X_{\text{vc}} = 0$

GRACIAS  
POR SU  
ATENCIÓN