

Bibliografía: Cengel

EXERGÍA: UNA MEDIDA DEL POTENCIAL DE TRABAJO

EXERGÍA _ 2021 TERMODINÁMICA FAC INGENIERÍA - UNCuyo 1 / 44

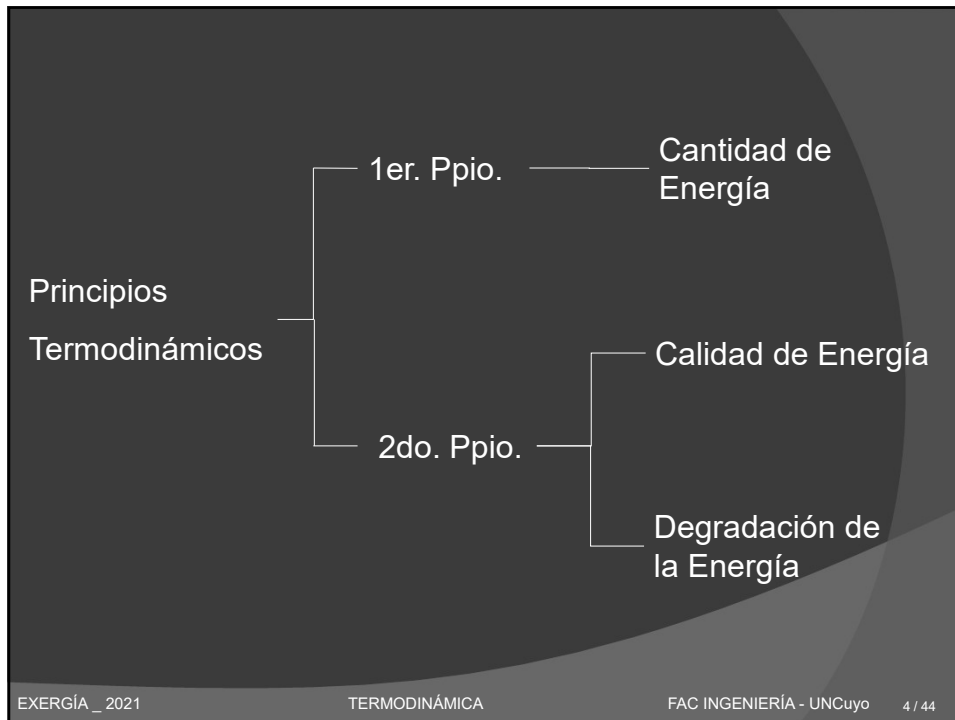
UNIDAD 8: EXERGÍA O DISPONIBILIDAD

- ◉ **8.A. Concepto**

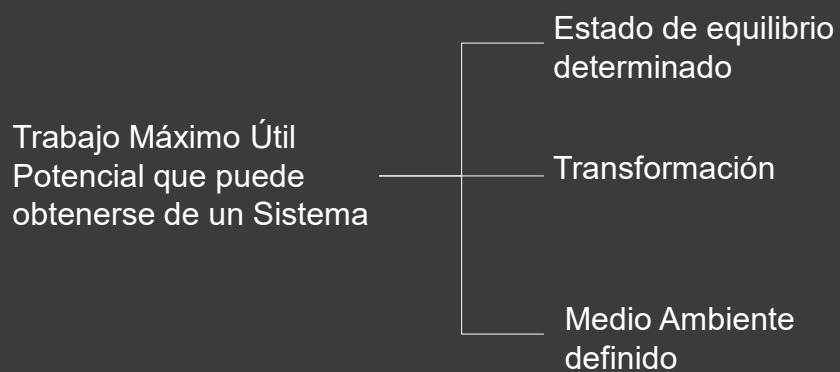
Concepto de exergía: energía útil y no útil. Estado muerto. Exergía Mecánica: cinética y potencial. Sistemas cerrados. Exergía por Presión: expansión y compresión. Diagramas P-v. Trabajo reversible e irreversible. Irreversibilidad. Exergía Térmica. Exergía Termomecánica. Cálculo de la exergía para sistemas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

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

EXERGÍA _ 2021 TERMODINÁMICA FAC INGENIERÍA - UNCuyo 2 / 44

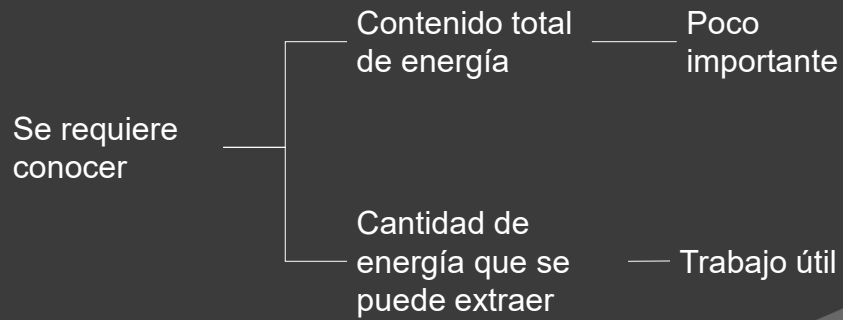


● Exergía – Disponibilidad – Energía disponible

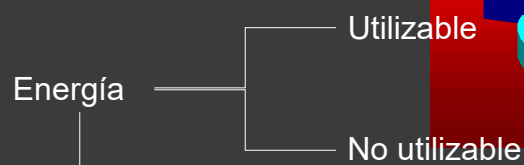


En busca de una nueva Fuente de Energía

- Ejemplo: energía geotérmica



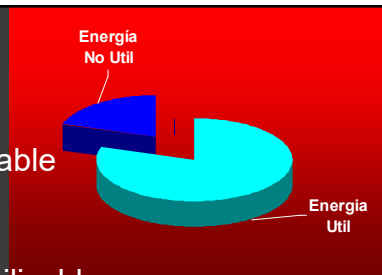
Energía



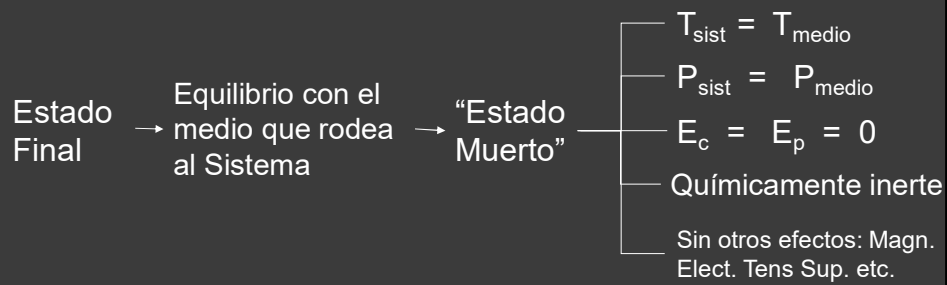
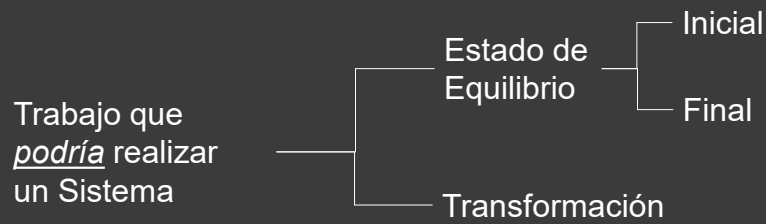
Se requiere definir una nueva Propiedad

EXERGIA:

energía disponible en un estado de equilibrio especificado

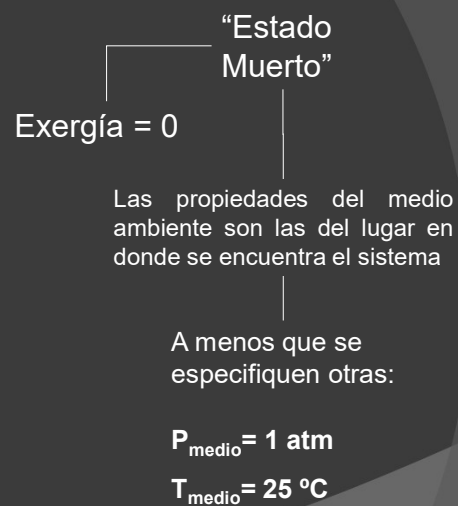
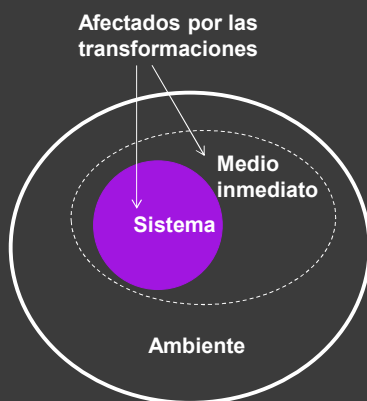


Exergía



8 / 44

Sistema y Medio



◉ ejemplos de Sistemas con Exergía



EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 10 / 44

◉ Exergía

Trabajo que
podría realizar
un Sistema

— desequilibrio — potencial

Exergía → desequilibrio
con el medio
ambiente

→ Potenciales
por:

Presión
Temperatura
Químico
Eléctrico
Magnético
Nuclear

EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 11 / 44

Exergía Termomecánica:

Presión y Temperatura

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

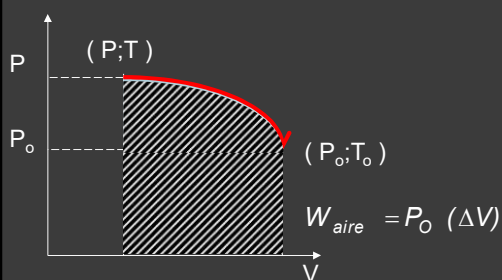
$$P_{\text{sistema}} \neq P_{\text{medio}}$$

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

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

Trabajo intercambiado por el sistema

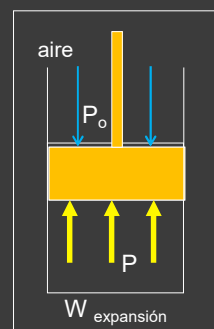
Desequilibrio $P > P_o$: Trabajo expansión



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

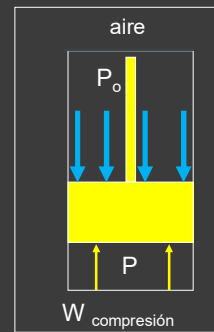
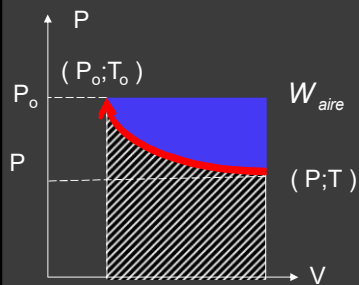
Trabajo reversible de expansión: **máximo trabajo útil** que puede realizar un sistema entre 2 estados especificados

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



Trabajo intercambiado por el sistema

- $P < P_o$: Trabajo compresión



$$dW_{\text{útil}} = P_o dV - dW$$

$$\begin{aligned} dV < 0 \\ dW < 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow dW_{\text{útil}} = dW - P_o dV$$

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

EXERGÍA_2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 15 / 44

Trabajo Reversible y Exergía

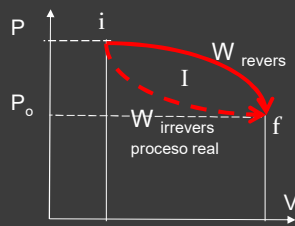
- **Trabajo Reversible**: máximo trabajo útil que se produce cuando un sistema se transforma entre 2 estados de equilibrio.
- **Exergía**: máximo trabajo útil que se produce cuando un sistema se transforma entre un estado de equilibrio y el estado muerto.

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.



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

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

$I = \text{irreversibilidad}$

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 $W_{\text{rev}} > W_{\text{util}}$

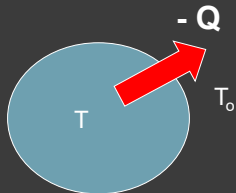
Dispositivos consumidores de W $W_{\text{rev}} < W_{\text{util}}$

Siempre: $I \geq 0$

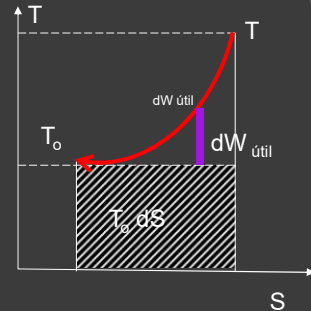
Irreversibilidad: potencial de trabajo desperdiciado

Exergía del Calor de un sistema con capacidad calorífica limitada

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



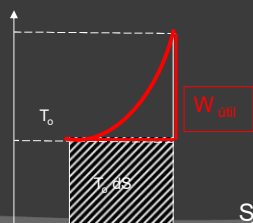
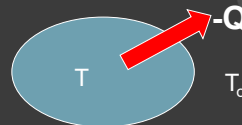
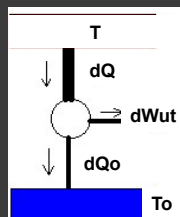
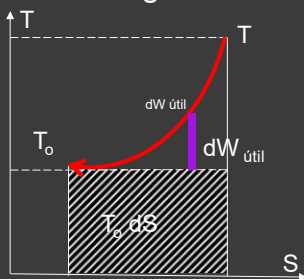
El sistema como consecuencia de la pérdida de calor, reduce su Temperatura hasta lograr el equilibrio con el medio (T_0).



$dW_{\text{útil}}$: 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: $T > T_0$



$$dW_{\text{útil}} = dQ - T_0 dS$$

$$dS < 0$$

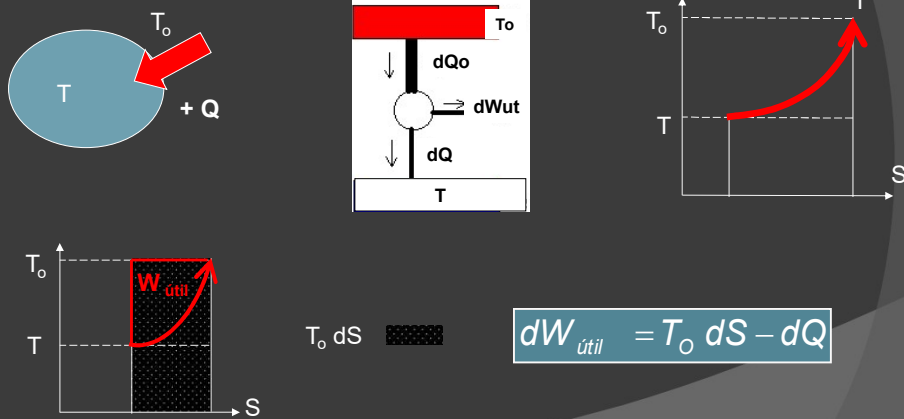
$$dQ < 0$$

$$dW_{\text{útil}} = T_0 dS - dQ$$

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

Exergía del Calor

- Recibe calor del medio: $T < T_o$



EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 21 / 44

Exergía del Trabajo

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

$$dW_{util} = dW - P_o dV$$

Exergía del Calor

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

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

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

EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 24 / 44

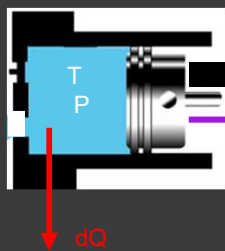
Exergía Mecánica y Térmica



Sistema en equilibrio

$T_o; P_o$

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



Balace de Energía Sistema Cerrado

T_o

P_o

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

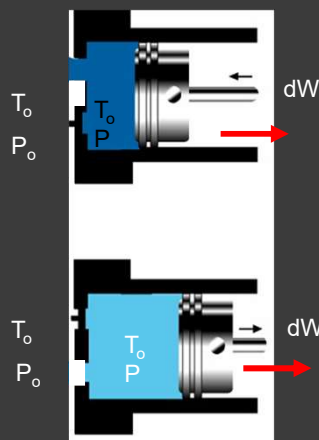
$$0 - (dQ + dW_{total}) = dU$$

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



$$dW = P dV$$

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

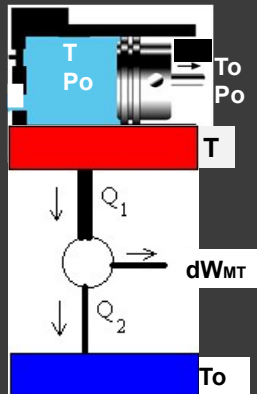
$$dW = (P - P_o) dV + P_o dV$$

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

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)



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

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

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

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

EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 27 / 44

consideramos que existen diferencias en las Temperaturas y en las Presiones

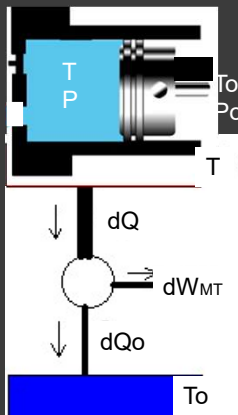
Exergía del Calor y Mecánica

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

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

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

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



Reemplazando:

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

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

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

$$-dW_{total} + T_o dS - P_o dV = dU$$

$$dW_{total} = -dU - P_o dV + T_o dS$$

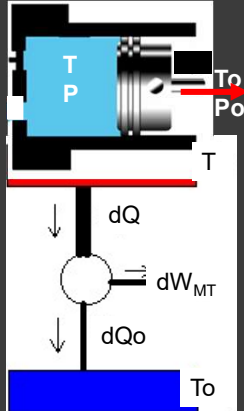
EXERGÍA _ 2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 28 / 44

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

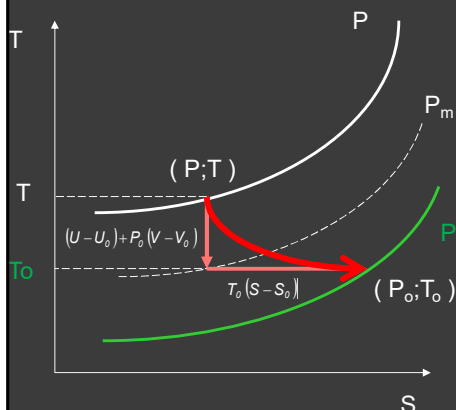
EXERGÍA_2021

TERMODINÁMICA

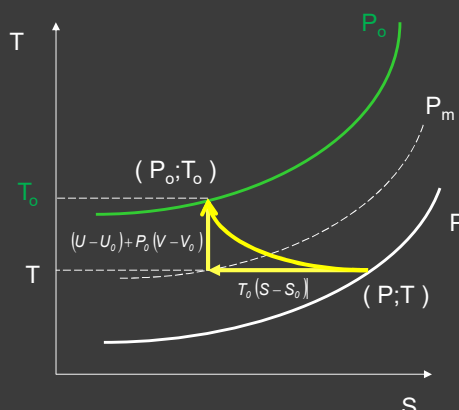
FAC INGENIERÍA - UNCuyo 29 / 44

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:
 $P < P_0$ $T < T_0$

30 / 44

- 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:

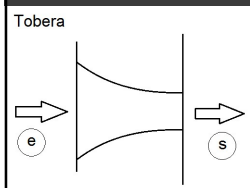
$$\Delta ex_{\text{sist ab}} = (h_2 - h_1) - T_o(s_2 - s_1) + \frac{(c_2^2 - c_1^2)}{2} + g(z_2 - z_1)$$

- 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

$$\begin{array}{l} \dot{Q} \approx 0 \\ \Delta ep \cong 0 \\ W = 0 \end{array} \quad \begin{array}{l} P_s < P_e \\ T_s < T_e \end{array}$$

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

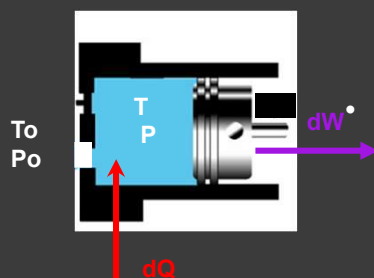
La Exergía de un sistema cerrado es siempre positiva o cero:

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

35 / 44

- Eficiencia de las Máquinas Térmicas**

- Según el 1er. Principio para Sistemas Cerrados



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

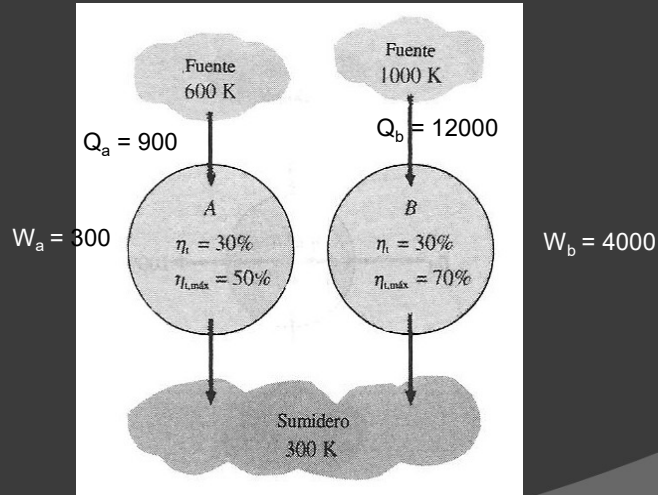
- Su eficiencia según el 1er. Ppio será:

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

- Su eficiencia según el 2do. Ppio será:

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

Ejemplo: rendimientos

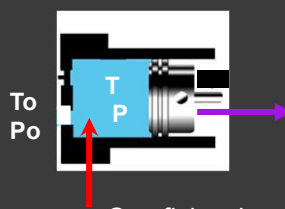


EXERGÍA_2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 37 / 44

○ Eficiencia de las Máquinas Térmicas



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

- Según el 1er. Ppio será:

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

- Su eficiencia según Carnot será:

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

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

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

$$n_{2do\ ppio} = \frac{30\%}{50\%} = 60\% \quad n_{2do\ ppio} = \frac{30\%}{70\%} = 42\%$$

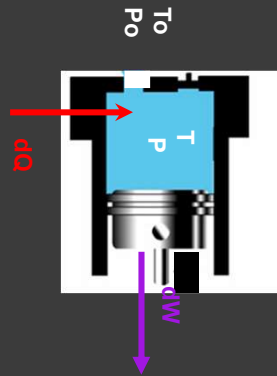
EXERGÍA_2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo 38 / 44

○ 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

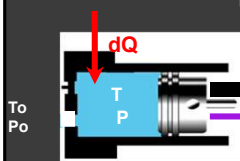
- Otra forma: **Rendimiento Exergético**

Permite calcular rendimientos para todos los sistemas aunque no produzcan W

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

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

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:

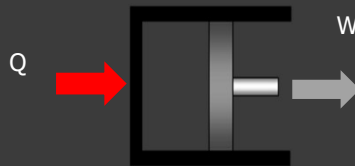
$$X_{ent} - X_{sal} - X_{dest} = \Delta X_{sistema} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

- Transformaciones Irreversibles como flujo de exergía:

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

Balance de Exergía.

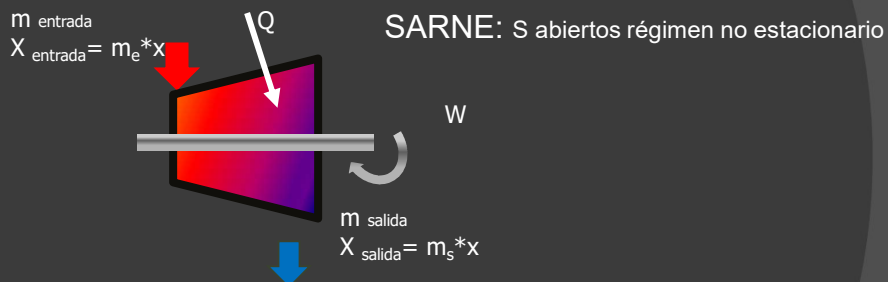
- Sistemas cerrados y procesos irreversibles



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

Balance de Exergía.

Sistemas abiertos o volumen de control



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

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

GRACIAS
POR SU
ATENCIÓN

EXERGÍA_2021

TERMODINÁMICA

FAC INGENIERÍA - UNCuyo