



fcfm

Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ME 7140 -Análisis Exergético

1ª y 2ª Ley



José Miguel Cardemil
Departamento de Ingeniería Mecánica

jcardemil@ing.uchile.cl

Beauchef 851, 5° piso (Poniente)
Of. 507

Contenidos

- Propiedades
 - Regla de Gibbs
- Primera Ley de la Termodinámica
 - Sistemas Cerrados
 - Sistemas Abiertos
- Segunda Ley de la Termodinámica
 - Desigualdad de Clausius
- Entropía
 - Principio de aumento de entropía
 - Eficiencia isentrópica
 - Balance de entropía
- Ciclos termodinámicos
- Exergía
 - Variación de Exergía
 - Transferencia de Exergía



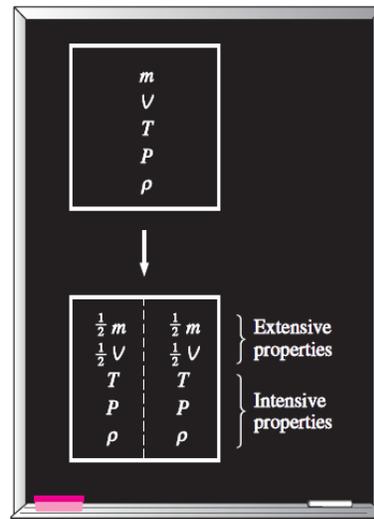
Propiedades de un sistema

El comportamiento de un sistema es descrito a través de las propiedades:

- *Característica macroscópica de un sistema como masa, volumen, energía presión y temperatura, a las cuales se les puede asignar un valor numérico en un determinado tiempo, sin necesidad de conocer el comportamiento previo del sistema (instantáneo)*

Las propiedades se pueden clasificar en:

- **Intensivas:** Cuando no dependen de la masa del sistema.
 - Temperatura, Presión, Densidad, etc.
- **Extensivas:** Cuando dependen del tamaño del sistema
 - Masa, Volumen, Momentum



Regla de fases de Gibbs

$$F = C - P + 2$$

donde F es el número de grados de libertad, C es el número de componentes y P es el número de fases en equilibrio termodinámico

El número de grados de libertad representa el número de variables independientes (intensivas) que definen el estado termodinámico

Eficiencia en la conversión de energía

Eficiencia: indica el desempeño del proceso de conversión o transferencia de energía

Eficiencia de Combustión

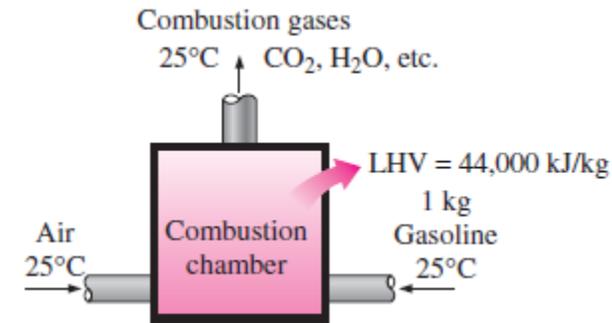
$$\eta = \frac{\text{Producto Deseado}}{\text{Insumo Requerido}}$$

$$\eta = \frac{Q}{PC} = \frac{\text{Calor Liberado en la Combustión}}{\text{Poder calorífico del combustible}}$$

Máquina Térmica

$$\eta = \eta_{\text{combustión}} \eta_{\text{térmica}} \eta_{\text{generador}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrico, neto}}}{PCS \cdot \dot{m}}$$

- Motor a bencina → 26-30%
- Motor Diesel → 34-40%
- Central de gran escala → ~50%



Agua Caliente

Type	Efficiency
Gas, conventional	55%
Gas, high-efficiency	62%
Electric, conventional	90%
Electric, high-efficiency	94%

Primera Ley de la Termodinámica

1ª Ley \leftrightarrow Principio de conservación de la energía

- Base para estudiar la interacción de diferentes formas de energía

“La energía no puede ser creada ni destruida en un proceso, sólo cambia de forma”

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía total que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la energía} \\ \text{total del sistema} \end{array} \right)$$

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Primera Ley de la Termodinámica

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Cambio en la energía total de un sistema

$$\Delta E_{system} = E_{final} - E_{inicial} = E_2 - E_1$$

Usando la definición de E

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

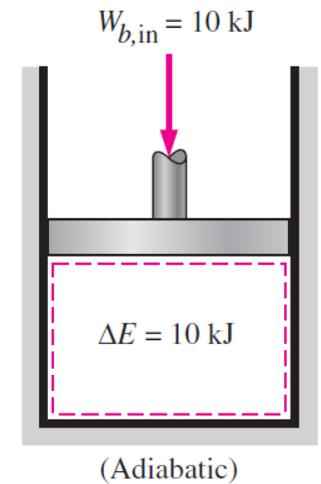
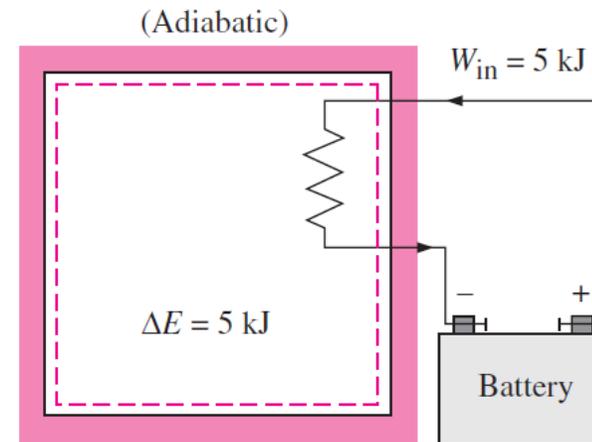
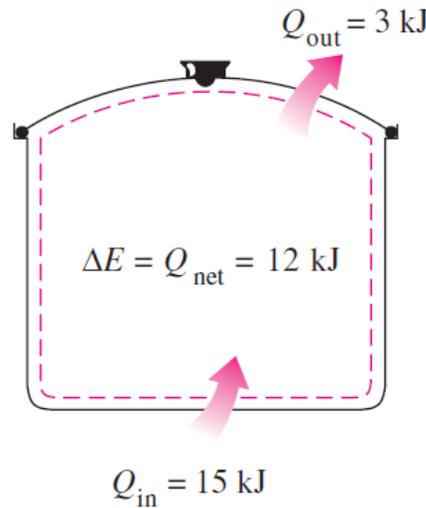
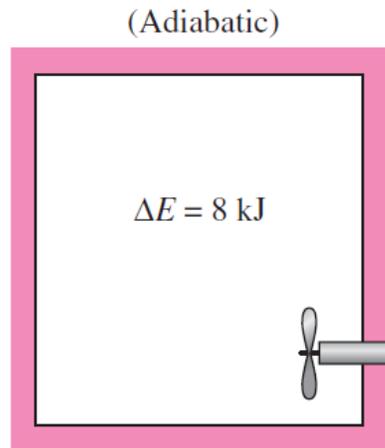
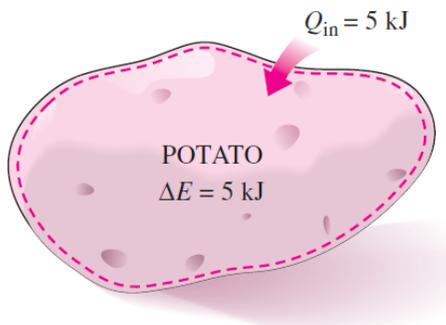
Mecanismos de transferencia de energía

- Transferencia de calor, Q
- Transferencia de trabajo, W
- Flujo másico, m

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system}$$

Primera Ley de la Termodinámica

$$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} + W_{out} + \Delta KE + \Delta PE + \Delta U$$



Conservación de la masa

Para un Volumen de Control (Sistema Abierto):

La masa transferida hacia o desde el volumen de control en un intervalo de tiempo Δt , es igual a la variación de la masa contenida en el volumen de control en el mismo tiempo Δt .

$$\left(\begin{array}{c} \text{Masa total que entra} \\ \text{al VC durante } \Delta t \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Masa total que sale} \\ \text{del VC durante } \Delta t \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variación de la masa} \\ \text{en el VC durante } \Delta t \end{array} \right)$$

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{VC} \quad [kg]$$

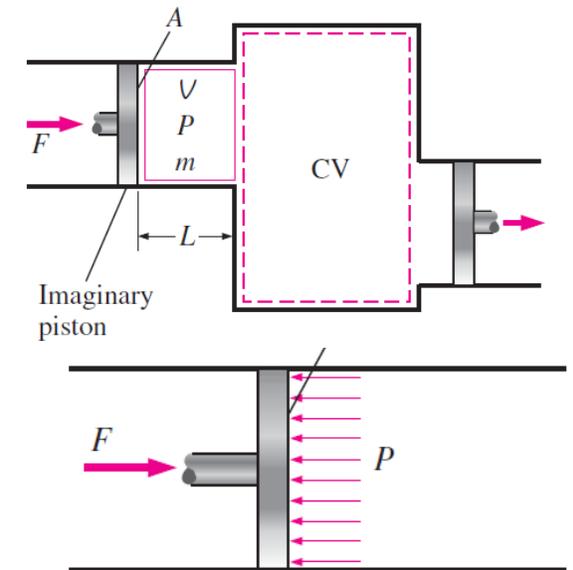
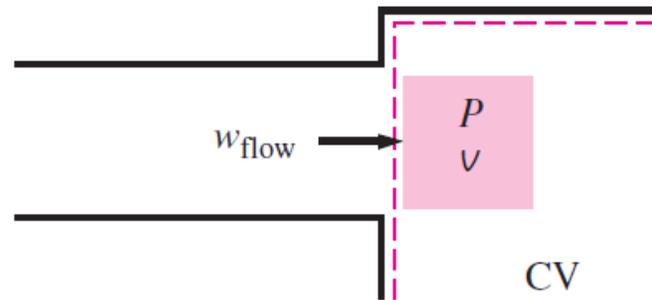
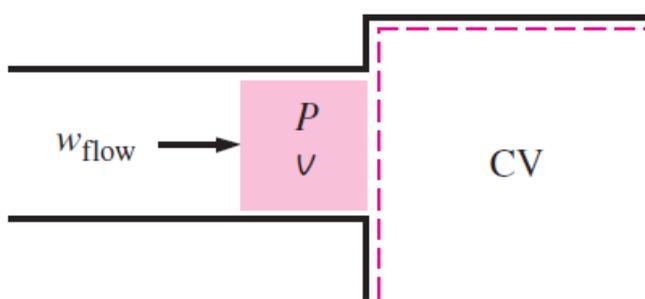
$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = \frac{dm_{VC}}{dt}$$

Flujo de trabajo y energía

Los sistemas abiertos consideran que un flujo de masa atraviesa la frontera del sistema. Luego es necesaria energía para el “empujar” esa cantidad de masa dentro o fuera del sistema

$$F = PA \quad \rightarrow \quad W_{flow} = FL = PAL$$



Energía Total

Como ya vimos la energía total para un sistema simple y compresible

$$e = u + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

El fluido entrando o saliendo del sistema posee una forma adicional de energía (Pv). Así la energía total por unidad de masa

$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe)$$

$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz$$

Energía Total

$$E_{masa} = m\theta = m \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad [kJ]$$

Por unidad de tiempo

$$\dot{E}_{masa} = \dot{m}\theta = \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad [kW]$$

Análisis de sistemas estacionarios

Del balance de masa

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

Considerando el balance de un sistema con una entrada y una salida...

En estado estacionario...

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \rightarrow \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \theta = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \theta$$

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \underbrace{\sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{para cada entrada}} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \underbrace{\sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{para cada salida}}$$

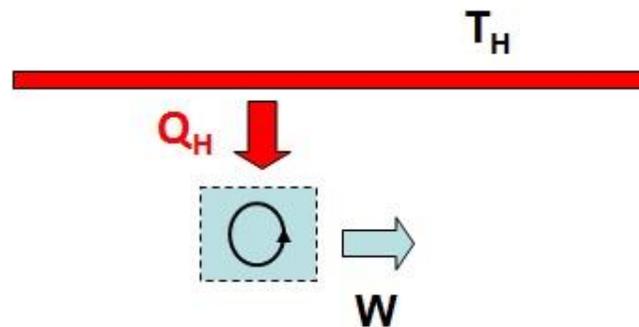
Considerando convención de signos

$$\rightarrow \dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right)$$

Segunda Ley de la termodinámica

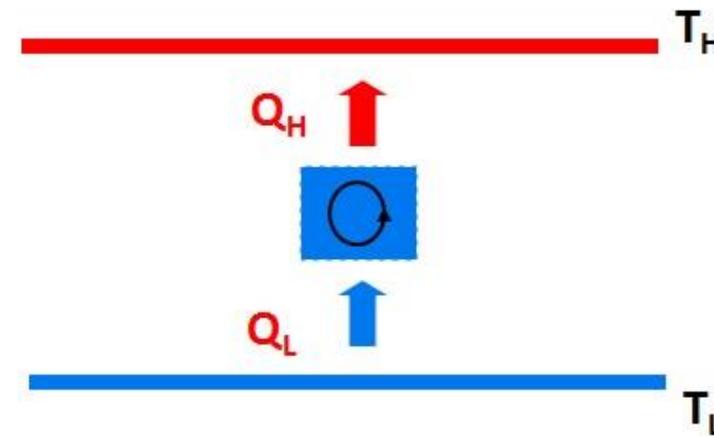
KELVIN-PLANCK (~1890):

Es imposible construir una máquina que opere en un ciclo (continuamente), cuyo efecto sea únicamente realizar trabajo a través del intercambio de calor con un único reservorio térmico.



CLAUSIUS (1850):

El calor no puede pasar, espontáneamente, desde un cuerpo de temperatura baja a un cuerpo de temperatura alta



Desigualdad de Clausius

Sabemos que para todas las máquinas térmicas, se debe cumplir la siguiente desigualdad

$$\eta_{th} \leq \eta_{th,rev}$$

Ahora, para todos los ciclos, reversibles o irreversibles, se establece que

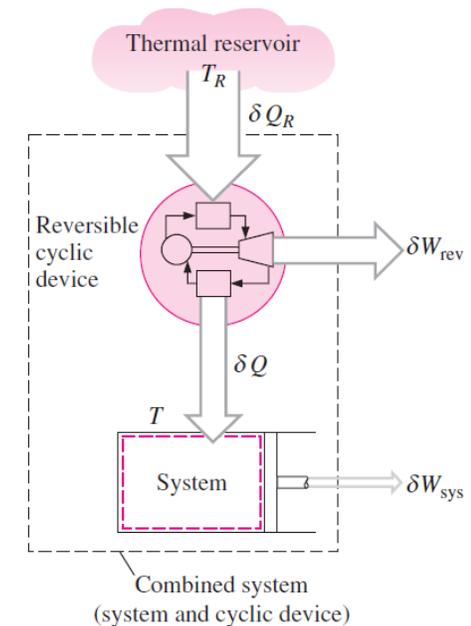
$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

Cualquier transferencia de calor desde o hacia el sistema debe ser considerada en forma de diferenciales, luego el término $\delta Q/T$ es evaluado como la suma de todas esas diferenciales

Si no ocurren irreversibilidades en el sistema, entonces es internamente reversible. Luego el ciclo reverso posee iguales magnitudes pero con signo contrario

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} = 0$$

La igualdad de Clausius aplica para ciclos totalmente reversibles e internamente reversibles



Entropía

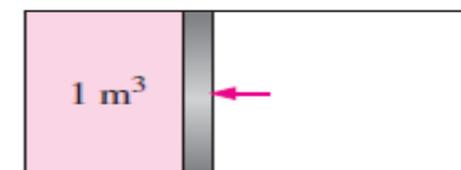
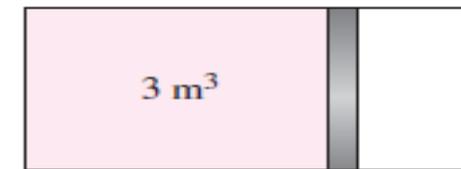
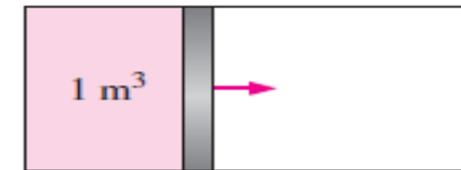
En un sistema-pistón que realiza un ciclo, la variación neta del volumen es 0, luego:

$$\oint dV = 0$$

Lo mismo ocurre con cualquier otra propiedad

Con base en esa afirmación, se define la entropía (S) como:

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int, rev} \quad \left[\frac{kJ}{K} \right]$$



$$\oint dV = \Delta V_{\text{cycle}} = 0$$

Entropía

Entropía (S) es una propiedad extensiva y es común llamarla entropía total. En las tablas se presenta en forma de entropía por unidad de masa (s [$\text{kJ}/\text{kg K}$])

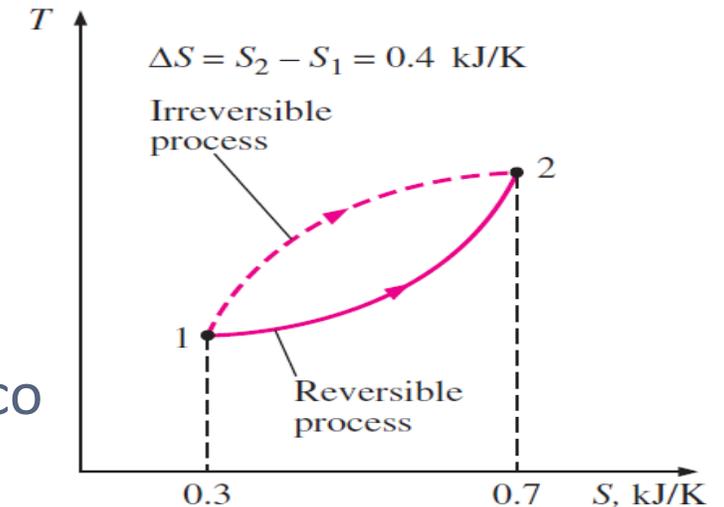
La variación de entropía durante un proceso puede ser determinada integrando

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right]$$

$$\Delta S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int,rev} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T_0} \right)_{int,rev} = \frac{1}{T_0} \int_1^2 (\delta Q)_{int,rev}$$

En el caso de un proceso internamente reversible e isotérmico

$$\Delta S = \frac{Q}{T_0} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right]$$



Principio de aumento de Entropía

Consideremos un ciclo que consiste en dos procesos, el proceso 1-2, que puede ser reversible o irreversible, y el proceso 2-1 que es internamente reversible.

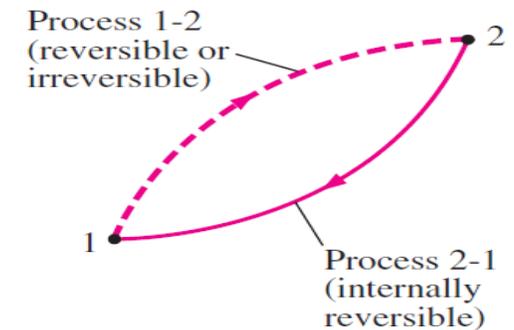
De la desigualdad de Clausius:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad \rightarrow \quad \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{int, rev} \leq 0$$

En la segunda integral la identificamos como la variación de entropía

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_1 - S_2 \leq 0 \quad \rightarrow \quad S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

La temperatura T es la temperatura en la frontera del sistema, donde el calor Q es transferido



$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

Esta relación se mantiene para procesos reversible e irreversible

Principio de aumento de Entropía

$\Delta S = S_2 - S_1$ representa la variación de entropía del sistema. Para procesos reversibles es equivalente a

→ Entropía transferida a través de calor

$$\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

En procesos irreversibles la variación de la entropía es siempre superior a la entropía transferida. Esta diferencia es llamada generación de entropía, S_{gen} .

$$\Delta S_{sys} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

La generación de entropía es siempre positiva (o cero). Su valor depende del proceso y no es una propiedad del sistema

Principio de aumento de Entropía

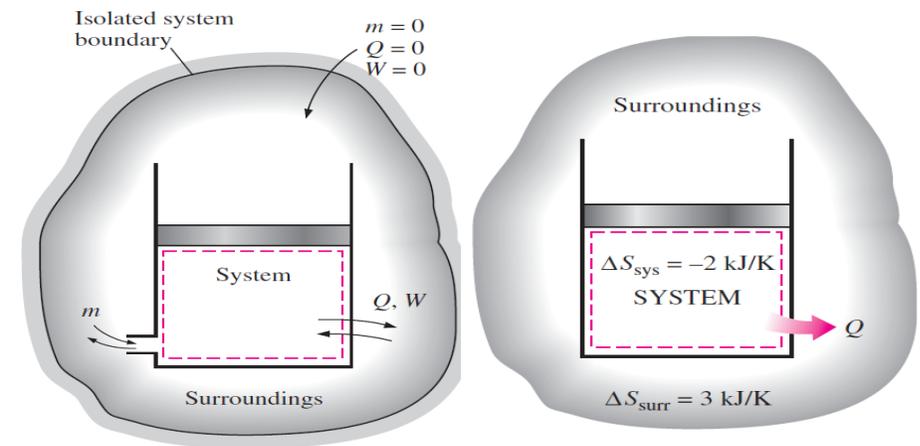
Para un sistema aislado (o un sistema cerrado y adiabático), la transferencia de calor es nula. Luego,

$$\Delta S_{\text{Aislado}} \geq 0$$

Durante un proceso cualquiera en un sistema aislado, la entropía siempre aumenta o, en el caso límite de un proceso internamente reversible, permanece constante.

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{alrededores}} \geq 0$$

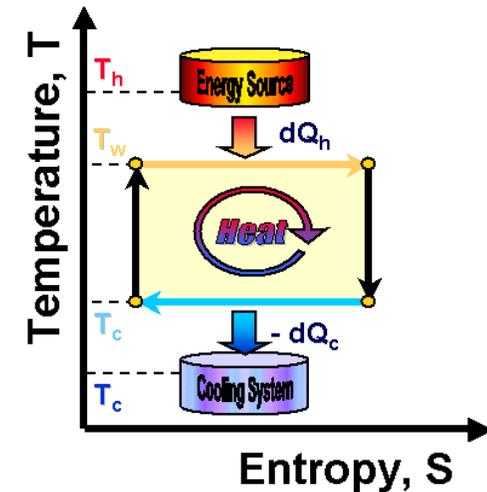
$$S_{\text{gen}} \begin{cases} > 0 & \text{Proceso irreversible} \\ = 0 & \text{Proceso reversible} \\ < 0 & \text{Proceso imposible} \end{cases}$$



$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{surr}} = 1 \text{ kJ/K}$$

Comentarios sobre la entropía

1. Los procesos pueden ocurrir en una sola dirección, dada por el principio de aumento de entropía ($\Delta S_{gen} \geq 0$). Cualquier proceso que viole este principio es imposible.
2. Entropía es una propiedad no conservativa. Ésta es conservada sólo en procesos ideales (reversibles).
3. El desempeño de sistemas de ingeniería es degradado por la presencia de irreversibilidades. La generación de entropía es una medida de las irreversibilidades presentes en un proceso



(c) C. Rose-Patruick, Brown University, 7-Jan-99, Chem 201 #1

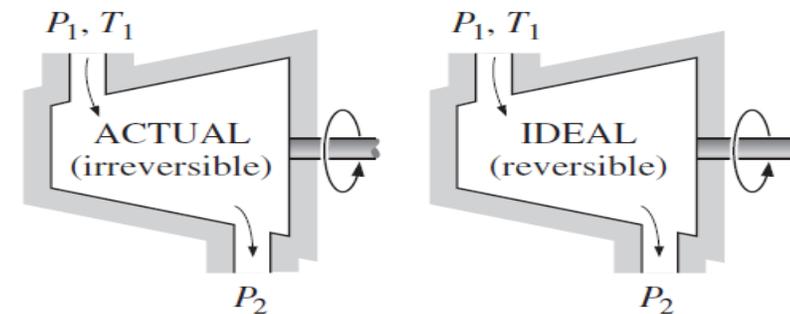
Eficiencia isentrópica

Hemos mencionado que las irreversibilidades son inherentes en los procesos reales y que su efecto es una reducción en el desempeño del dispositivo

Cuanto más próximo sea un proceso real a uno reversible (isentrópico) mejor será el desempeño del dispositivo involucrado

La eficiencia isentrópica mide la desviación entre un proceso real y uno ideal (isentrópico)

La eficiencia isentrópica es definida de forma diferente para cada dispositivo, dependiendo de su naturaleza



Eficiencia isentrópica

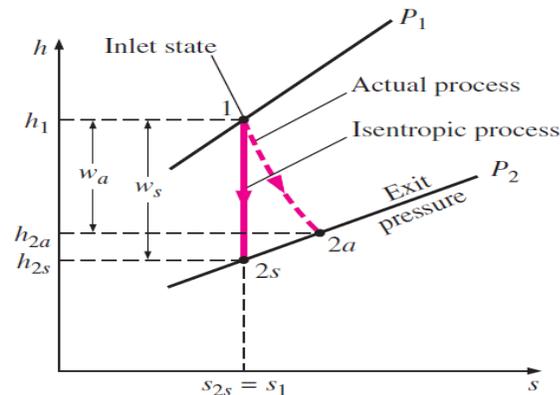
TURBINAS

Relación entre el trabajo realmente obtenido en la turbina y el trabajo que podría ser obtenido si el proceso al interior de la turbina fuese isentrópico

$$\eta_t = \frac{\text{Trabajo Real}}{\text{Trabajo turbina isentrópica}} = \frac{w_r}{w_s}$$

Comúnmente podemos despreciar los efectos de las energías cinética y potencial

$$\eta_t \cong \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2s}}$$



COMPRESORES Y BOMBAS

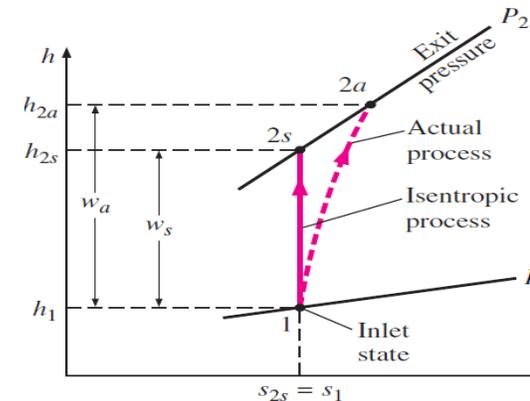
Relación entre el trabajo realmente demandado por el compresor (bomba) y el trabajo que sería demandado si el proceso al interior del compresor (bomba) fuese isentrópico

$$\eta_c = \frac{\text{Trabajo compresor isentrópico}}{\text{Trabajo Real}} = \frac{w_s}{w_r}$$

- Despreciando los efectos de las energías cinética y potencial
- Una bomba que opera con fluido incompresible

$$\eta_c \cong \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1}$$

$$\eta_b \cong \frac{v(P_2 - P_1)}{h_{2r} - h_1}$$



Balance de Entropía

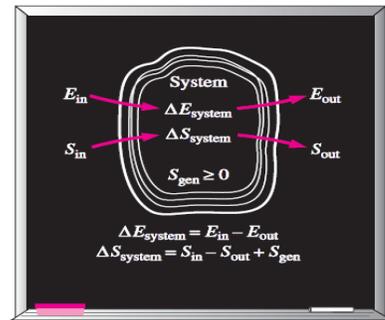
La variación de entropía de un sistema durante un proceso es mayor a la entropía transferida por una cantidad igual a la entropía generada durante el proceso

- Principio de aumento de la entropía

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{entrando} \\ \text{al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{saliendo} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{generada} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variación} \\ \text{de Entropía} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right)$$

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{system}$$

Entropía TOTAL



TRANSFERENCIA DE ENTROPÍA

Transferencia de calor

$$S_{calor} = \frac{Q}{T} \quad (T = cte)$$

- Si la temperatura no es constante $S_{calor} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \cong \sum \frac{Q_k}{T_k}$

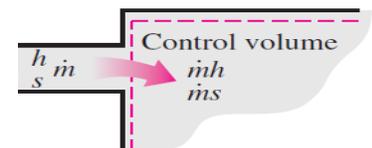
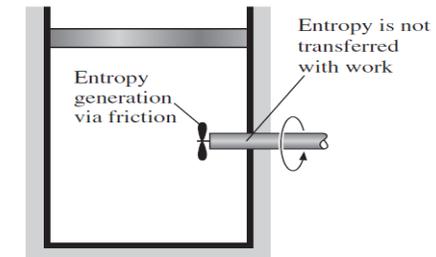
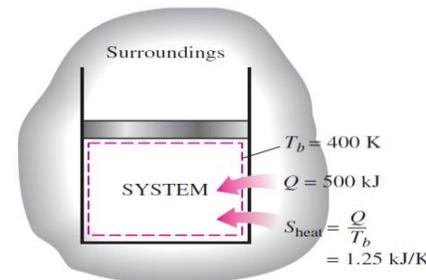
- Trabajo

$$S_{work} = 0$$

- Flujo de masa

$$S_{masa} = ms$$

$$S_{masa} = \int_{A_c} s \rho V_n dAc$$



Generación de Entropía

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = \Delta S_{system}$$

SISTEMAS CERRADOS

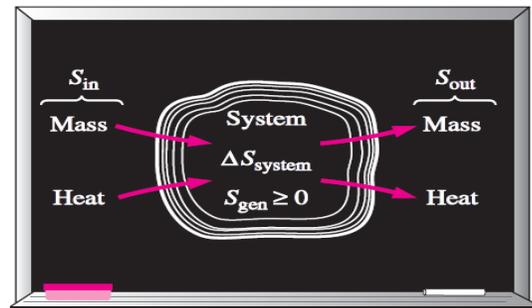
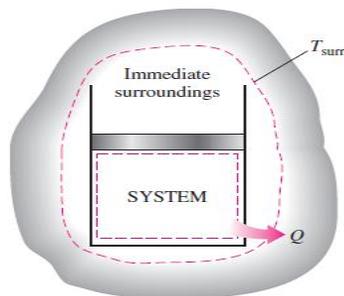
$$\sum_k \frac{Q_k}{T_k} + S_{gen} = \Delta S_{system} = S_2 - S_1$$

- Sistema adiabático

$$S_{gen} = \Delta S_{system}$$

- Sistema + alrededores

$$S_{gen} = \sum \Delta S = \Delta S_{system} + \Delta S_{alred}$$



SISTEMAS ABIERTOS

$$\sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_o s_o + \dot{S}_{gen} = dS_{VC}/dt$$

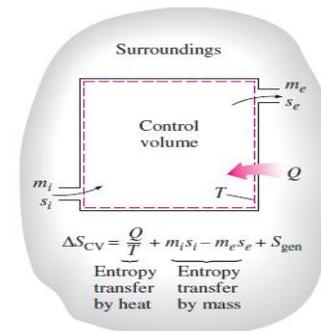
- Estado estacionario $\dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_o s_o - \sum \dot{m}_i s_i - \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$

- Estado estacionario un solo flujo

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_o - s_i) - \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k}$$

- Estado estacionario un solo flujo, adiabático

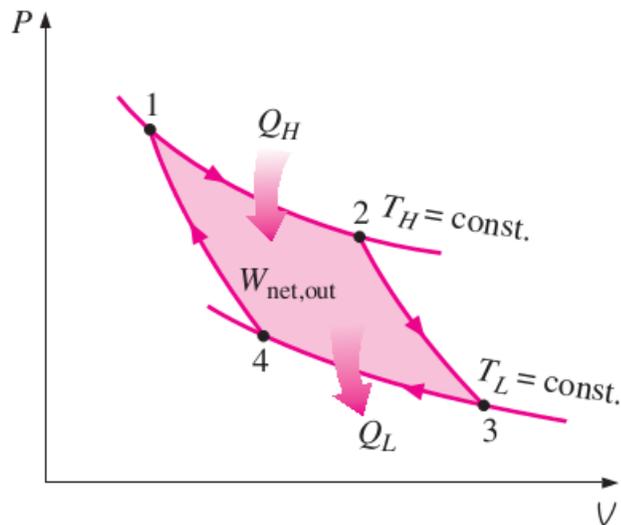
$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_o - s_i)$$



Ciclos Termodinámicos: Carnot

La eficiencia de ciclos puede ser maximizada, cuando éstos consideran sólo procesos reversibles

- Expansión isotérmica reversible
- Expansión adiabática reversible
- Compresión isotérmica reversible
- Compresión adiabática reversible



$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \xrightarrow{rev} \eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

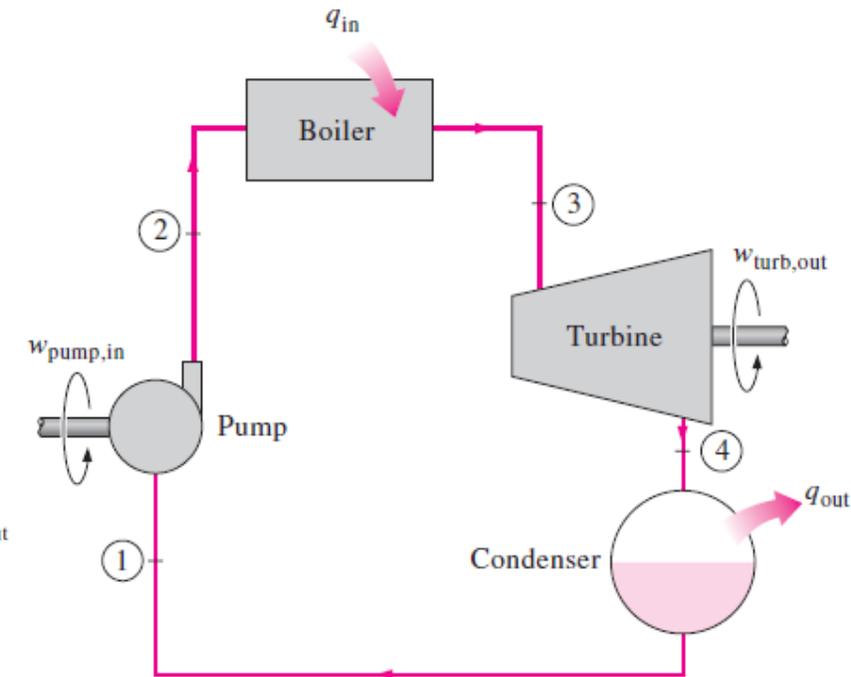
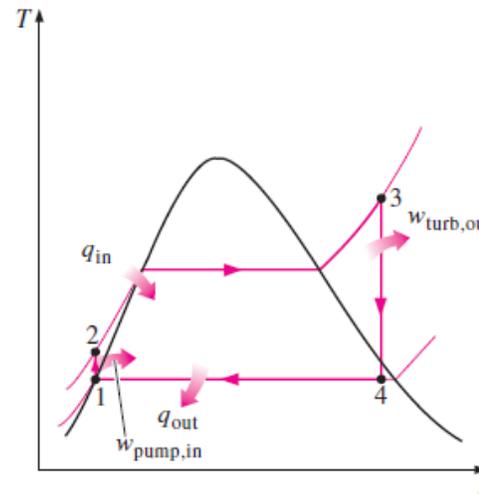
$$\eta_{th} = \begin{cases} < \eta_{th,rev} & \text{Máquina irreversible} \\ = \eta_{th,rev} & \text{Máquina reversible} \\ > \eta_{th,rev} & \text{Máquina imposible} \end{cases}$$

Ciclos Termodinámicos: Rankine

El ciclo Rankine permite eliminar muchos de los aspectos imprácticos del ciclo de Carnot de agua pura

Está compuesto por 4 procesos:

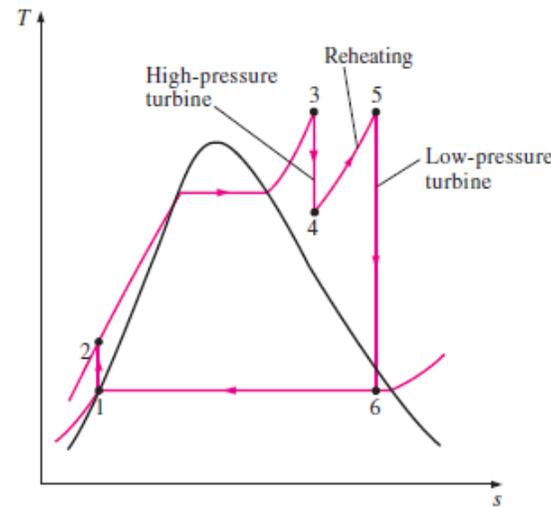
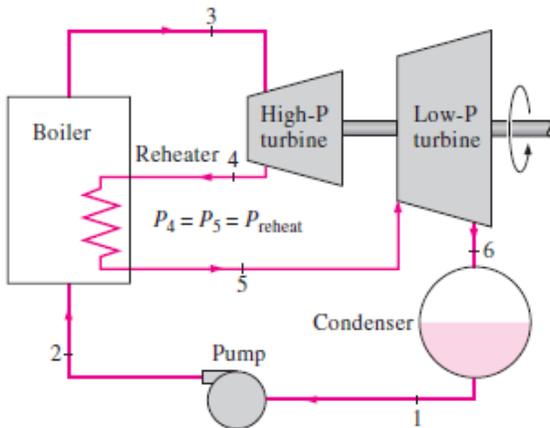
- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante (caldera)
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante (condensador)



Rankine c/ recalentamiento

Aprovechar la mayor eficiencia de una presión mayor en la caldera, sin tener el un aumento excesivo en contenido de líquido de la descarga

- *Sobrecalentar el vapor a temperaturas más altas*
- *Expandir el vapor en la turbina, a través de dos etapas, con recalentamiento intermedio*



$$W_{tur,out} = W_{tur,I} + W_{tur,II}$$

$$= (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

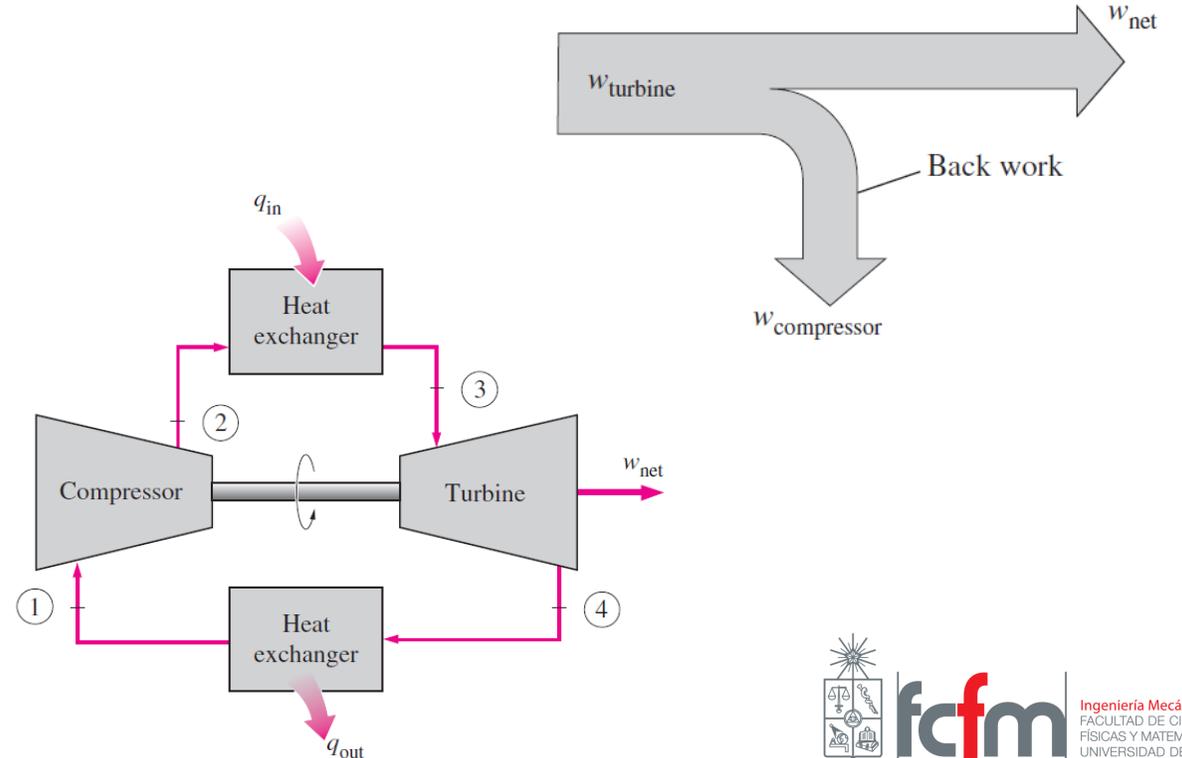
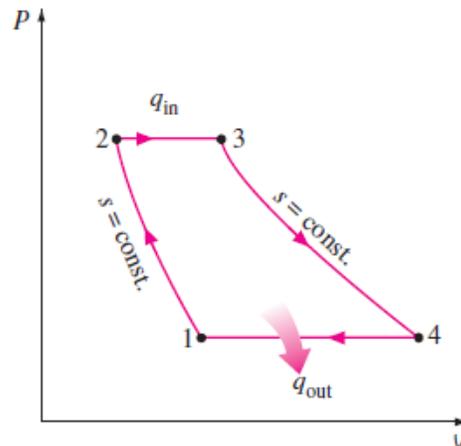
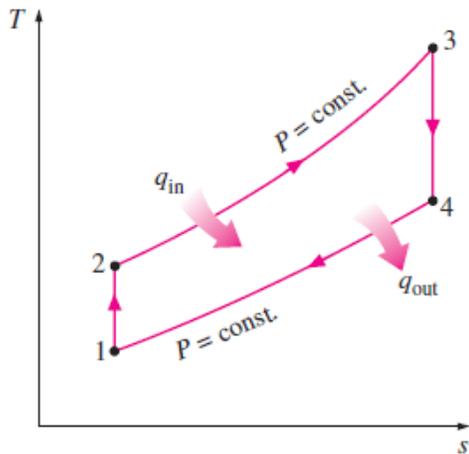
$$q_{in} = q_{primario} + q_{reheat}$$

$$= (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$

Ciclos Termodinámicos: Brayton

El ciclo ideal está formado por 4 procesos internamente reversibles

- 1-2 Compresión isentrópica (compresor)
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica (turbina)
- 4-1 Liberación de calor a presión constante



Exergía

De la segunda ley de la termodinámica sabemos

- Energía \neq Potencial de trabajo

Se define la **exergía** como trabajo disponible

$$\text{Trabajo} = f(\text{Estado inicial; proceso; Estado final})$$

Para comparar el trabajo disponible en diferentes sistemas se considera un estado de referencia (dead state) donde existe equilibrio termodinámico con el ambiente

- $\rightarrow P_o=1\text{atm}$ y $T_o=25^\circ\text{C}$

Trabajo potencial máximo que un sistema puede entregar si sufre un proceso desde su estado inicial hasta el estado de referencia, a través de un proceso reversible

- Limite superior

Trabajo reversible e irreversibilidades

En un sistema que expande contra el ambiente, el trabajo producido no es útil.

- Trabajo contra el ambiente W_{amb}

$$W_{amb} = P_o (V_2 - V_1)$$

La diferencia entre el trabajo real y el trabajo contra el ambiente se define como trabajo útil

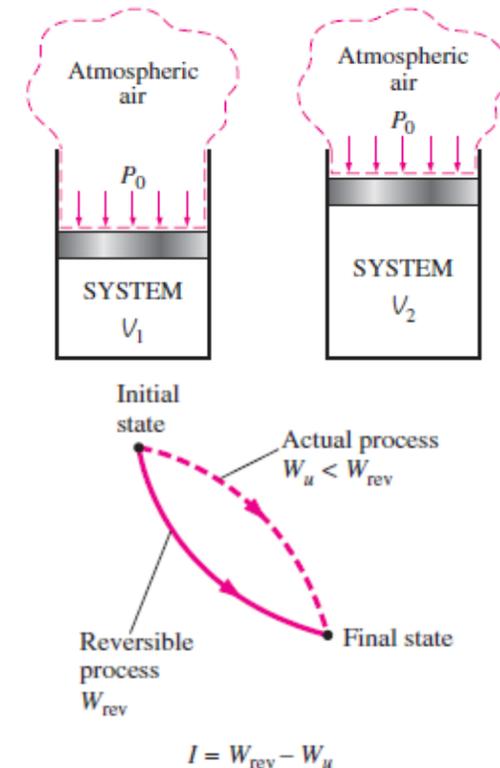
$$W_u = W - W_{amb} = W - P_o (V_2 - V_1)$$

Trabajo reversible es la máxima cantidad de trabajo útil que puede ser producida

Irreversibilidades

$$I = W_{rev,out} - W_{u,out}$$

$$I = W_{u,in} - W_{rev,in}$$



Irreversibilidad = Destrucción de Exergía

Algunos aspectos sobre la exergía

La exergía es una medida del proceso entre estado inicial del sistema y un estado en equilibrio con el ambiente. Por lo tanto es un atributo del sistema y del ambiente juntos.

La exergía es siempre positiva.

La exergía no es conservada, sino que es destruida a través de las irreversibilidades

La exergía es vista como el trabajo teórico máximo que puede ser obtenido del conjunto sistema-ambiente. Otra alternativa es considerar la exergía como el mínimo trabajo requerido para llevar el sistema desde el estado de referencia hasta el estado inicial

Variación de exergía

SISTEMAS CERRADOS:

$$X = (U - U_o) + P_o (V - V_o) - T_o (S - S_o) + m \frac{V^2}{2} + mgz$$

En base másica:

$$\phi = (u - u_o) + P_o (v - v_o) - T_o (s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz$$

La variación de exergía

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_o (v_2 - v_1) - T_o (s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

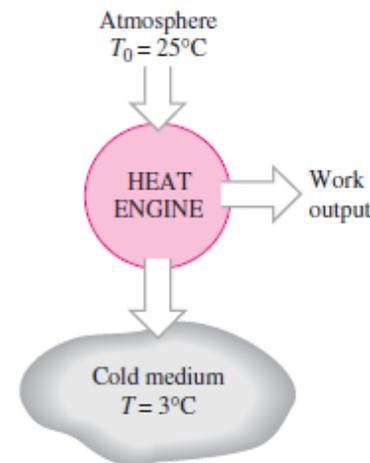
SISTEMAS ABIERTOS

Adicionar exergía de flujo

$$\psi = (h - h_o) - T_o (s - s_o) + \frac{V^2}{2} + gz$$

La variación de exergía:

$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_o (s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$



Transferencia de exergía

Por calor:

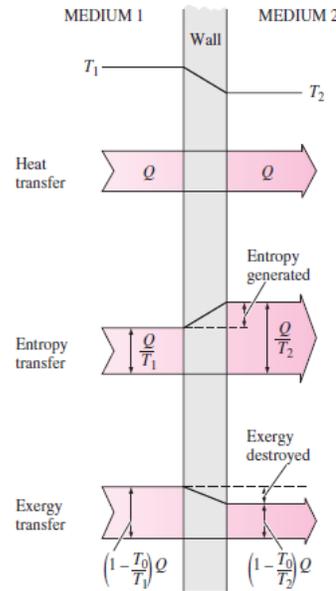
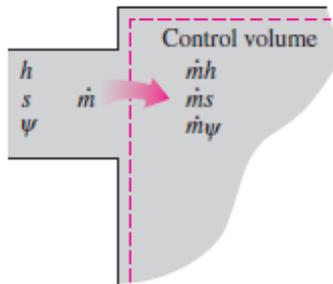
$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) Q$$

Por Trabajo

$$X_{work} = \begin{cases} W - W_{amb} & \text{Para trabajo de frontera (pistón)} \\ W & \text{Para otras formas de trabajo} \end{cases}$$

Por flujo másico

$$X_{masa} = m \psi$$



Trabajo Reversible

◦ General

$$\dot{W} = \dot{W}_{rev}$$

◦ Corriente única

$$\dot{W}_{rev} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) + \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) \dot{Q}_k$$

◦ Adiabático, corriente única

$$\dot{W}_{rev} = \dot{m}(\psi_1 - \psi_2)$$

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) - \dot{X}_{dest} = 0$$

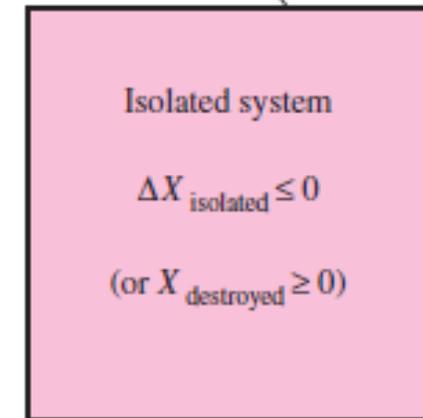
Destrucción de exergía

Irreversibilidades como la fricción, mezcla de flujos, reacciones químicas y transferencia de calor a través de temperaturas finitas y expansiones o compresiones abruptas, siempre generan entropía y cualquier proceso que genera entropía destruye exergía

$$X_{destruc} = T_o S_{gen} \geq 0$$

$$X_{destruc} = \begin{cases} > 0 & \text{Procesos irreversibles} \\ = 0 & \text{Procesos reversibles} \\ < 0 & \text{Procesos imposibles} \end{cases}$$

No heat, work
or mass transfer



Balance de Exergía

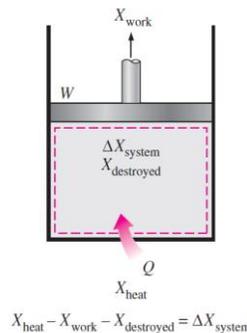
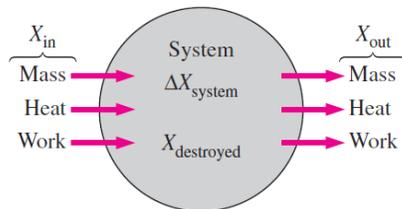
SISTEMAS CERRADOS

La variación de la exergía en el sistema es menor que la exergía que entra al mismo, producto de la destrucción de exergía

$$\left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{entrando} \\ \text{al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{saliendo} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Exergía} \\ \text{destruida} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variación} \\ \text{de Exergía} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right)$$

$$X_2 - X_1 = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) Q_k - [W - P_o (V_2 - V_1)] - T_o S_{gen}$$

$$\frac{dX_{sys}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_o \frac{dV_{sys}}{dt} \right] - T_o \dot{S}_{gen}$$



SISTEMAS ABIERTOS

Semejantes al balance de SC, pero considerando un mecanismo adicional de transferencia de exergía: flujo másico a través de las fronteras del VC

$$(X_2 - X_1)_{VC} = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) Q_k - [W - P_o (V_2 - V_1)] + \sum_{in} m \psi - \sum_{out} m \psi - X_{dest}$$

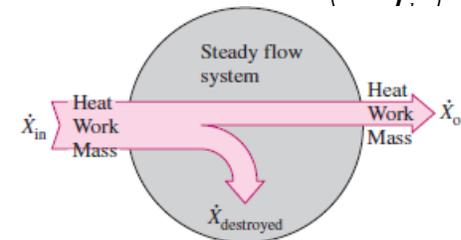
$$\frac{dX_{VC}}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - P_o \frac{dV_{VC}}{dt} \right] + \sum_{in} \dot{m} \psi - \sum_{out} \dot{m} \psi - \dot{X}_{dest}$$

Estado Estacionario

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} \psi - \sum_{out} \dot{m} \psi - \dot{X}_{dest} = 0$$

Corriente única

$$\sum \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) - \dot{X}_{dest} = 0$$



Contenidos

- Propiedades
 - Regla de Gibbs
- Primera Ley de la Termodinámica
 - Sistemas Cerrados
 - Sistemas Abiertos
- Segunda Ley de la Termodinámica
 - Desigualdad de Clausius
- Entropía
 - Principio de aumento de entropía
 - Eficiencia isentrópica
 - Balance de entropía
- Ciclos termodinámicos
- Exergía
 - Variación de Exergía
 - Transferencia de Exergía





fcfm

Ingeniería Mecánica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

ME 7140 -Análisis Exergético

1ª y 2ª Ley



José Miguel Cardemil
Departamento de Ingeniería Mecánica

jcardemil@ing.uchile.cl

Beauchef 851, 5° piso (Poniente)
Of. 507