

7 ANÁLISIS DE LA 2ª LEY: EXERGÍA

7.1 NOCIÓN DE EXERGÍA

7.2 EXERGÍA: SISTEMAS CERRADOS

Trabajo útil e Irreversibilidad

Transferencia de exergía

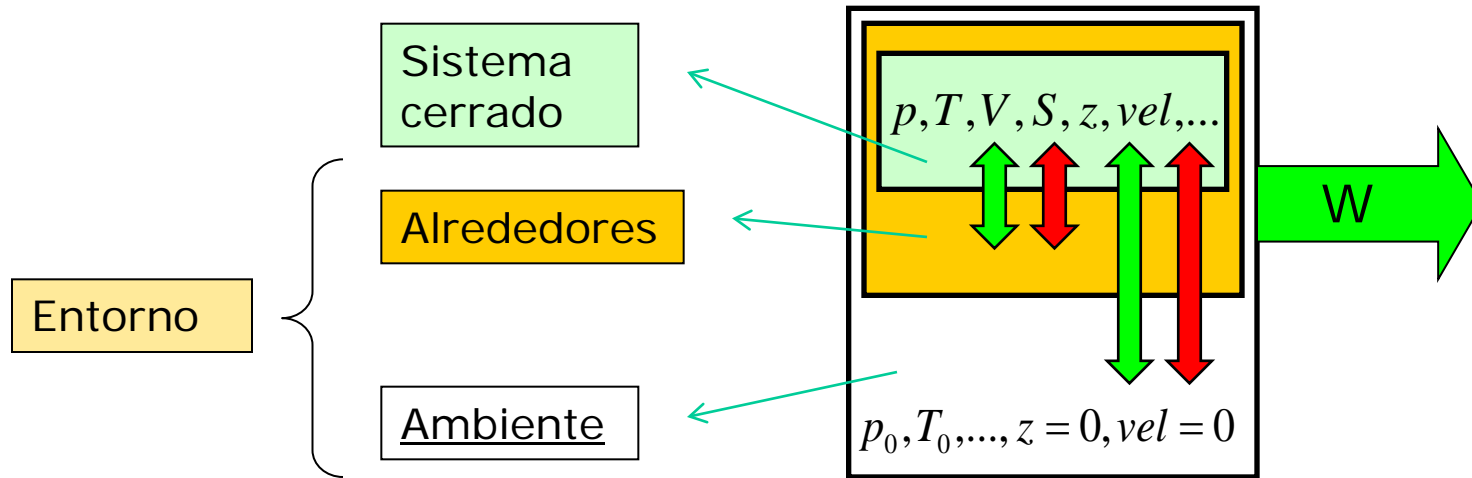
7.3 EXERGÍA: SISTEMAS ABIERTOS

Exergía de flujo

7.4 EFICIENCIA EXERGÉTICA

7.1 NOCIÓN DE EXERGÍA

Definiciones de alrededores y ambiente.

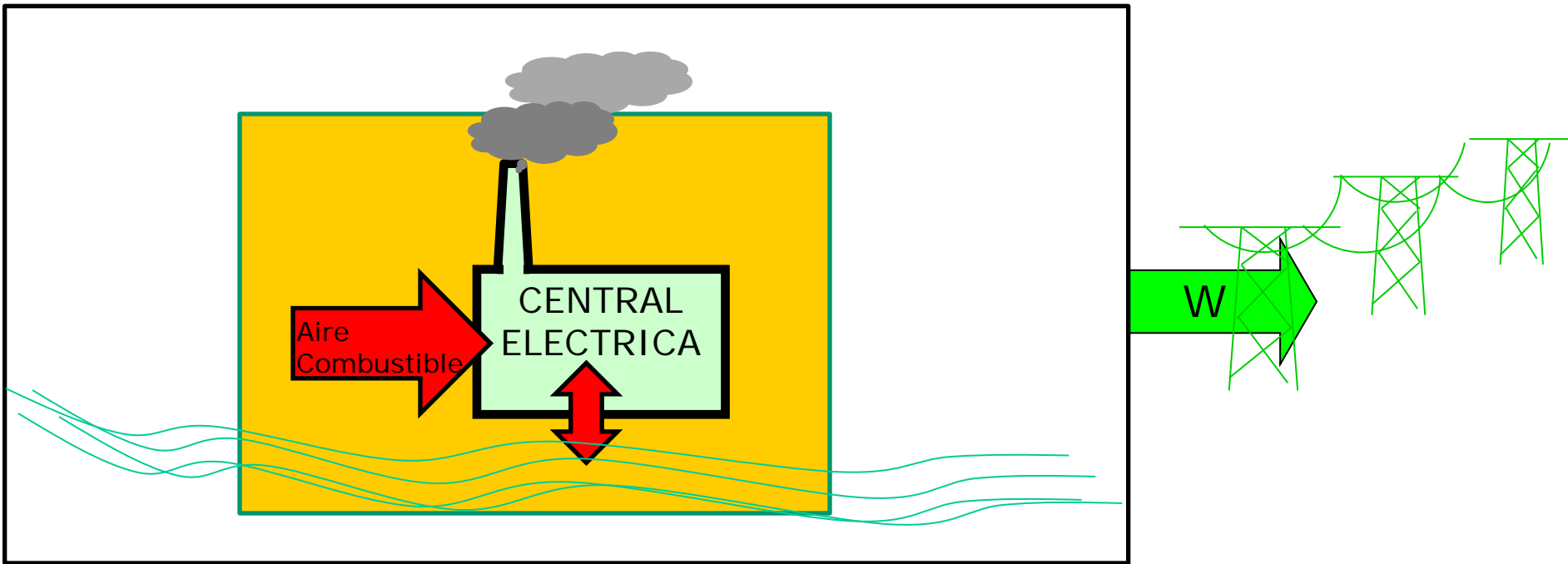
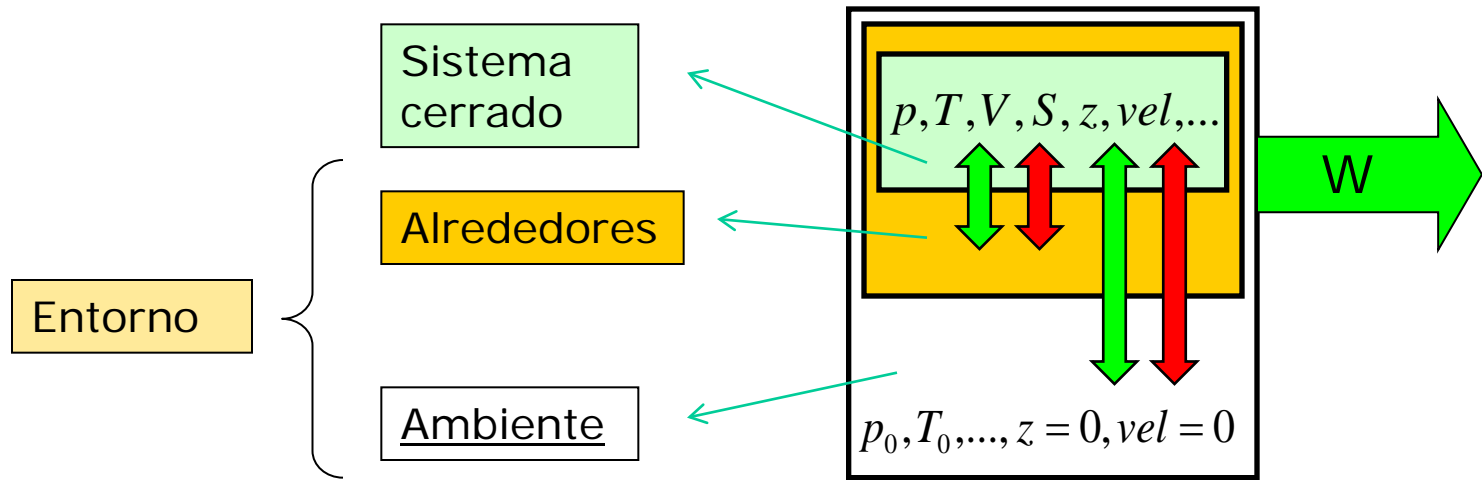


El **sistema** interactúa con el **entorno** (**alrededores** + ambiente). La interacción del **sistema-alrededores** cambia las propiedades de ambos. La interacción con el ambiente, normalmente un baño, no modifica las propiedades de este (naturalmente pueden cambiar las propiedades extensivas del ambiente).

Por lo tanto el ambiente se caracteriza por sus las propiedades intensivas $T_0, p_0, h_0, s_0, \dots$ invariables. Además se supone el ambiente sin cambios de energía cinética y con energía potencial cero.

Las irreversibilidades sólo se pueden producir en el **sistema** y **alrededores**.

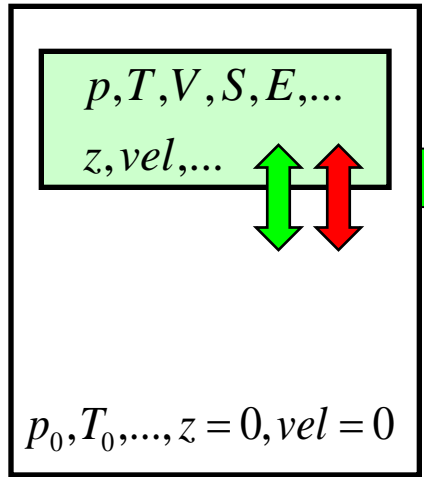
El objetivo del problema es diseñar el sistema para obtener el máximo trabajo real de esas interacciones. El máximo trabajo teórico está determinado por la segunda ley de la termodinámica que exige que las interacciones sigan un proceso REVERSIBLE.



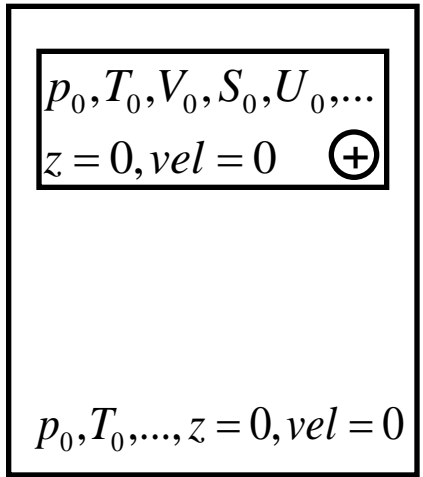
Definición de exergía (o disponibilidad).

Estado muerto del sistema

Sistema cerrado



$$Q_T = 0$$



$$\Delta U_{amb} = T_0 \Delta S_{amb} - p_0 \Delta V_{amb}$$

$$\Delta V_{amb} = -\Delta V = -(V_0 - V)$$

Ambiente

$$\Delta E_T = \Delta E_{amb} + \Delta E = \Delta E_{amb} + (E_0 - E)$$

$$\Delta E_T = Q_T - W_T = -W_T$$

$$\Delta S_T = \Delta S_{amb} + \Delta S = \Delta S_{amb} + (S_0 - S)$$

$$\Delta S_T = \int dQ_T / T + S_{g,T} = S_{g,T}$$

$$W_T = (E - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) - T_0 S_{g,T}$$

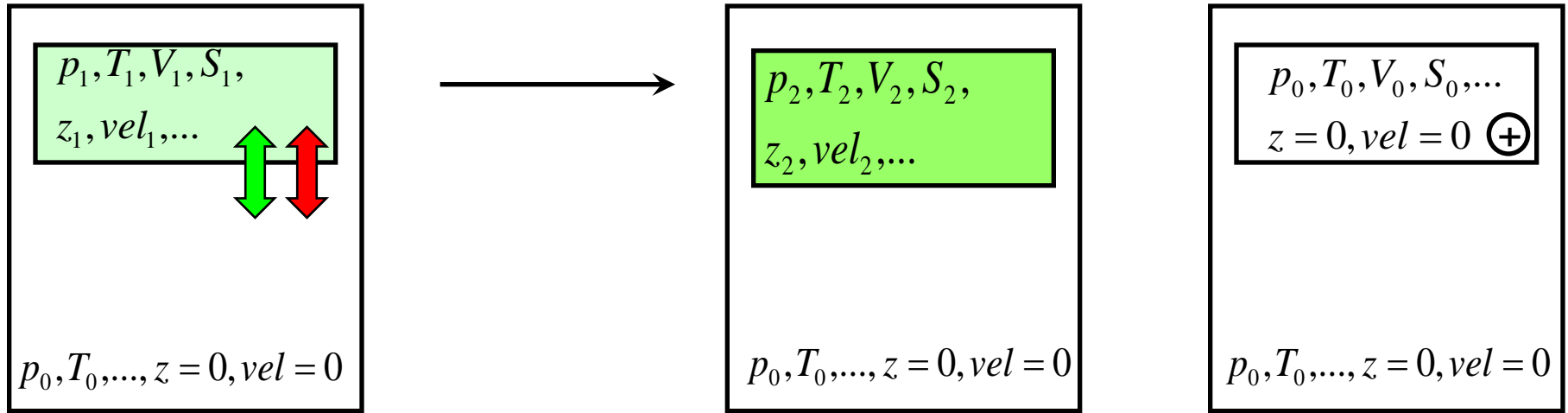
EXERGÍA = Φ

$\Phi = W_{T,máximo}$

≥ 0
Irre

EXERGÍA = Φ = TRABAJO_MÁXIMO

NO NEGATIVO	SISTEMA CERRADO
NO SE CONSERVA	AMBIENTE DADO



$$\Phi_1 - \Phi_2 = -\Delta\Phi = W_{\text{max_de_1_a_2}}$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= (E_1 - U_0) + p_0(V_1 - V_0) - T_0(S_1 - S_0) \\ \Phi_2 &= (E_2 - U_0) + p_0(V_2 - V_0) - T_0(S_2 - S_0) \end{aligned} \right\}$$

$$\Delta\Phi = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$\Delta\Phi = -W_{\text{REV_yendo_de_1_a_2}}$$

$$= -W_{\text{m\u00e1ximo_que_podr\u00eda_obtenerse_yendo_de_1_a_2}}$$

Ejemplo 31

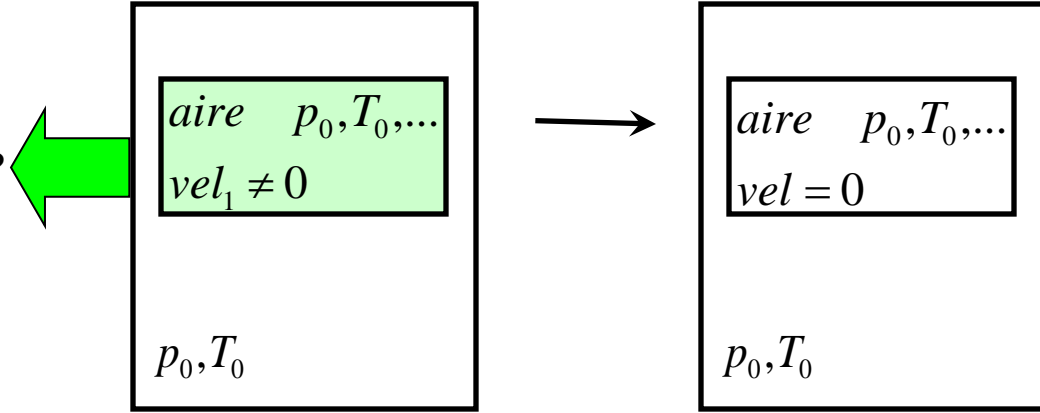
Molino: 12m envergadura (radio=6m)

Viento: 10m/s

Densidad aire: 1.18Kg/m³

Ambiente: T₀=298K, p₀=101kPa

¿Potencia máxima del molino?



máxima potencia ⇒ máxima trabajo ⇒ proceso reversible

Sistema: estado inicial viento vel=10m/s → estado muerto vel=0 m/s

$$Potencia_{max} = \dot{W}_{max} = \dot{m} w_{max} = \dot{m} \varphi_1$$

$$\dot{m} = \rho A v = 1.18 \text{kg} / \text{m}^3 \times \pi \times 6^2 \text{m}^2 \times 10 \text{m} / \text{s} = 1334 \text{Kg} / \text{s}$$

$$\varphi_1 = (e_1 - u_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0) = (u_1 + e_{c1} + e_{p1} - u_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0) = e_{c1}$$

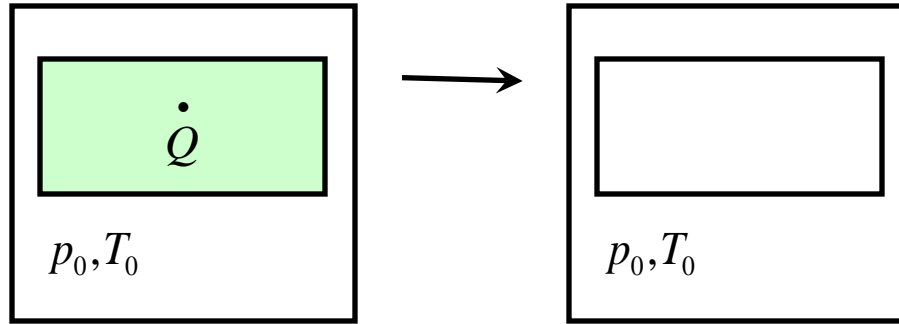
$$\varphi_1 = \frac{vel^2}{2} = \frac{100 \text{m}^2 / \text{s}^2}{2} = 0.05 \text{kJ} / \text{kg}$$

$$Potencia_{max} = \dot{m} \varphi = 66.7 \text{kW}$$

Ejemplo 32

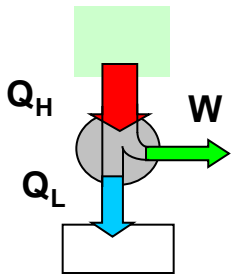
$HORNO_con_T_{horno} = 1111K$ que genera $\dot{Q} = 3165kJ/s$ $T_0 = 298K$

¿Exergía por unidad de tiempo del calor en el horno?



Exergía = máximo trabajo obtenible del calor

⇒ usando una máquina térmica reversible entre la T del horno y T ambiental



$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - Q_L / Q_H$$

$$\eta_{rev} = \dots = 1 - T_L / T_H$$

Aquí el horno no llega al equilibrio con el ambiente ya que la temperatura del horno se mantiene fija. Observe que no se pide la exergía del horno sino la del calor producido.

$$\dot{W}_{max} = \dot{W}_{REV} = (1 - T_L / T_H) \dot{Q}_H$$

$$1 - T_L / T_H = 1 - T_0 / T_{horno} = 0.732$$

$$\dot{W} = 2317kW \quad \Rightarrow \quad \dot{\Phi} = 2317kW$$

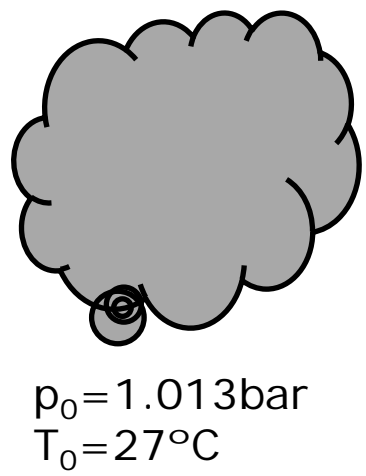
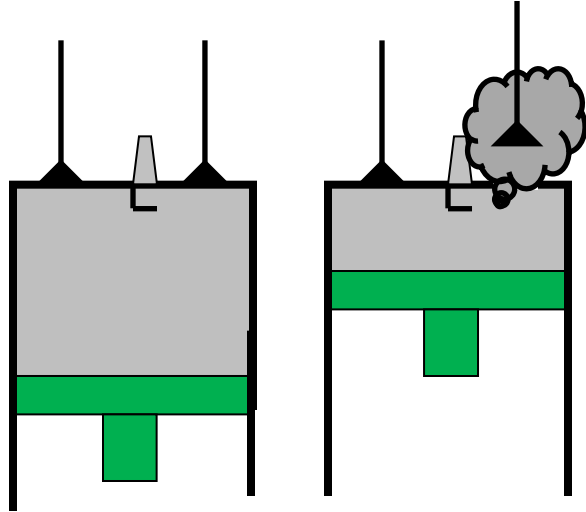
$$T_{polo} = 270K \quad \text{Estado muerto diferente} \quad \Rightarrow \quad \dot{\Phi} = 2396kW$$

Ejemplo 33

¿Exergía específica de los gases de combustión?

Aire como gas ideal, se desprecian los cambios de las energías cinética y potencial

2450cm³
7 bar
867°C
"aire"



$$\varphi_1 = (e_1 - u_0) + p_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0) = 368.91 \text{ kJ / kg}$$

$e_1 = u_1$
↓
Tablas

$p_0 v_0 = RT_0$
 $v_1 = RT_1 / p_1$

$\Delta s = \Delta s^o - R \ln \frac{p_0}{p_1}$
↓

Tablas

Esta exergía no hace nada de trabajo: $W_T = 0$

$$w_T = (e - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) - T_0 s_{g,T} = \Phi - T_0 s_{g,T} = 0 \quad \Rightarrow T_0 S_{g,T} = 368.91 \text{ kJ / kg}$$

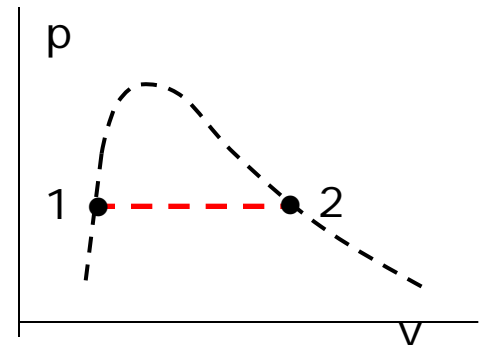
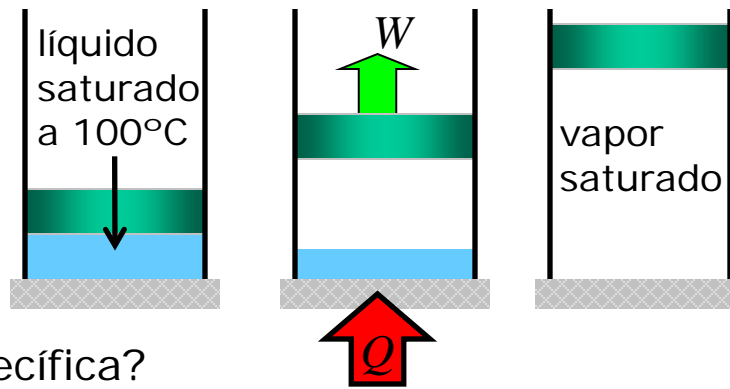
Motores turboalimentados

Ejemplo 34

Agua

$$p_0 = 1.014 \text{ bar}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$



¿Cambio de exergía específica?

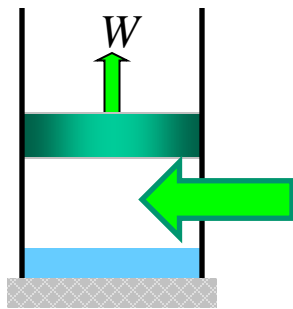
$$\Delta\varphi = (u_2 - u_1) + p_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) = 484 \text{ kJ / kg}$$

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

Tablas $u_2 = u_g$, $u_1 = u_f$, $v_2 = v_g$

Proceso lento: reversible internamente → entropía generada=0

Ahora:



Agitación

Mismos estados inicial y final

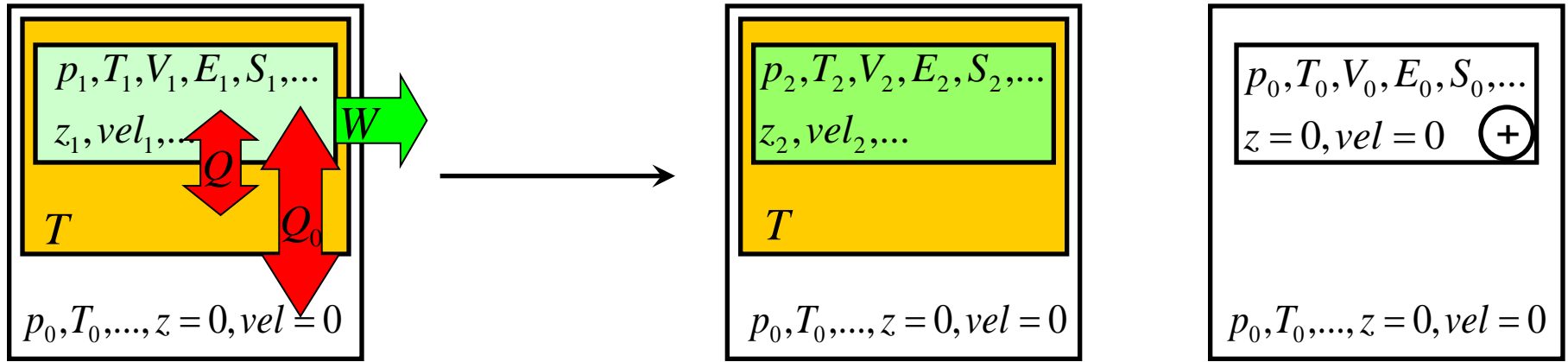
$$\Delta\varphi = \dots \text{igual_que_antes} \dots = 484 \text{ kJ / kg}$$

$$\Delta s = \dots \text{igual_que_antes} \dots = s_2 - s_1$$

Proceso no lento: irreversible → entropía generada ≠ 0

Se obtendrá menor trabajo que el caso anterior.

7.2 EXERGÍA: SISTEMAS CERRADOS



Definición de trabajo útil:

SISTEMA CERRADO CON UN BAÑO:

$$E_2 - E_1 = Q_0 + Q - W \quad S_2 - S_1 = Q_0/T_0 + Q/T + S_g$$

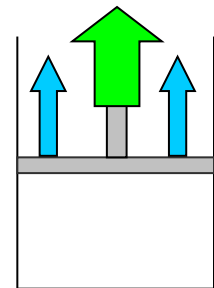
$$\Rightarrow Q_0 = T_0(S_2 - S_1) - QT_0/T - T_0S_g$$

$$\Rightarrow W = (E_1 - E_2) + Q + Q_0 = (E_1 - E_2) - T_0(S_2 - S_1) + (1 - \frac{T_0}{T})Q - T_0S_g$$

$$\Rightarrow W_{\text{útil}} = \underbrace{(E_1 - E_2) + p_0(V_1 - V_2) - T_0(S_2 - S_1)}_{-\Delta\Phi} + (1 - \frac{T_0}{T})Q - T_0S_g$$

Ambiente y alrededores son baños

$$W_{\text{útil}} = W - p_0(V_2 - V_1)$$

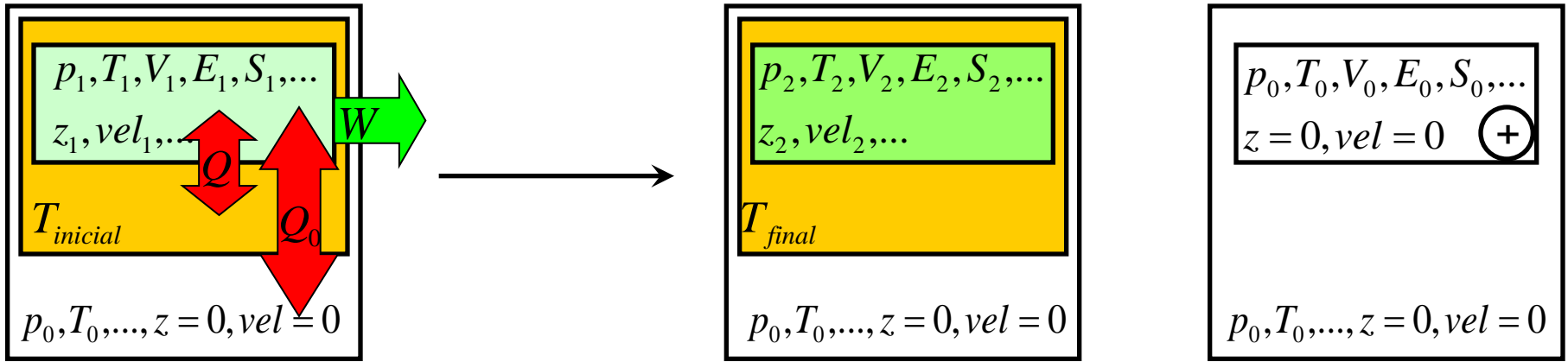


$$W_{\text{real,útil}} = -\Delta\Phi + (1 - \frac{T_0}{T})Q - T_0S_g$$

$$\text{Irrev} = I \equiv T_0S_g \geq 0$$

$$W_{\text{rev,útil}} = -\Delta\Phi + (1 - \frac{T_0}{T})Q$$

Aquí sólo están las irreversibilidades del sistema. Las únicas que existen en el presente caso.



SISTEMA CERRADO INTERACTUANDO CON UN SISTEMA QUE NO ES UN BAÑO:

$$E_2 - E_1 = Q_0 + Q - W \quad S_2 - S_1 = Q_0/T_0 + \int dQ/T + S_g$$

Alrededores: no es un baño

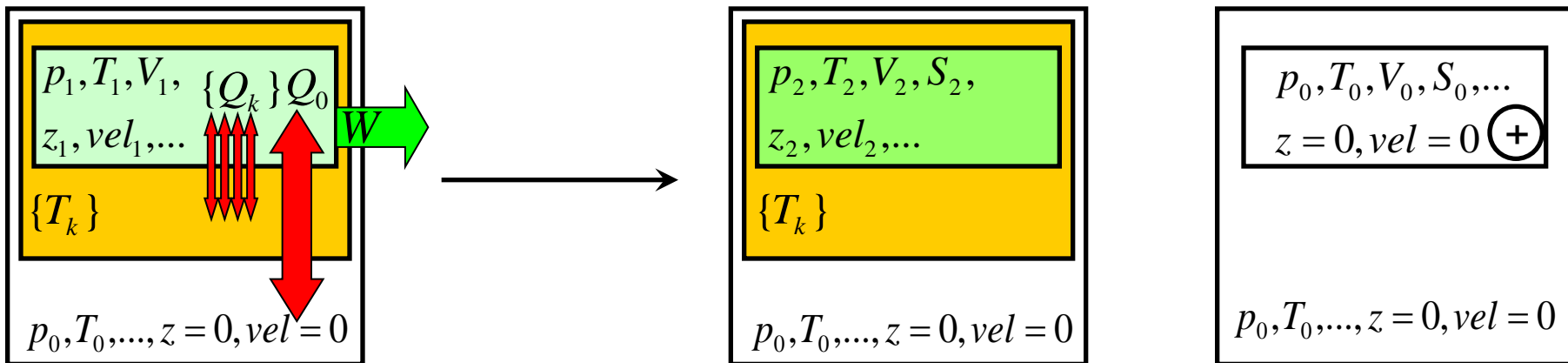
OJO: en este caso no son las únicas irreversibilidades. En los alrededores también puede haber irreversibilidades y por tanto se genera entropía.

$$W_{real, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \int (1 - \frac{T_0}{T}) dQ - T_0 S_g$$

$$W_{rev, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \int (1 - \frac{T_0}{T}) dQ$$

$$Irrev = I \equiv T_0 S_g \geq 0$$

Aquí sólo están las irreversibilidades del sistema



SISTEMA CERRADO CON VARIOS BAÑOS:

$$W_{real, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q - T_0 S_g$$

$$W_{rev, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q$$

→

Ahora

→

$$W_{real, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)Q_k - T_0 S_g$$

$$W_{rev, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)Q_k$$

SISTEMA CERRADO INTERACTUANDO CON VARIOS SISTEMAS QUE NO SON BAÑOS:

$$W_{real, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)dQ - T_0 S_g$$

$$W_{rev, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)dQ$$

→

Ahora

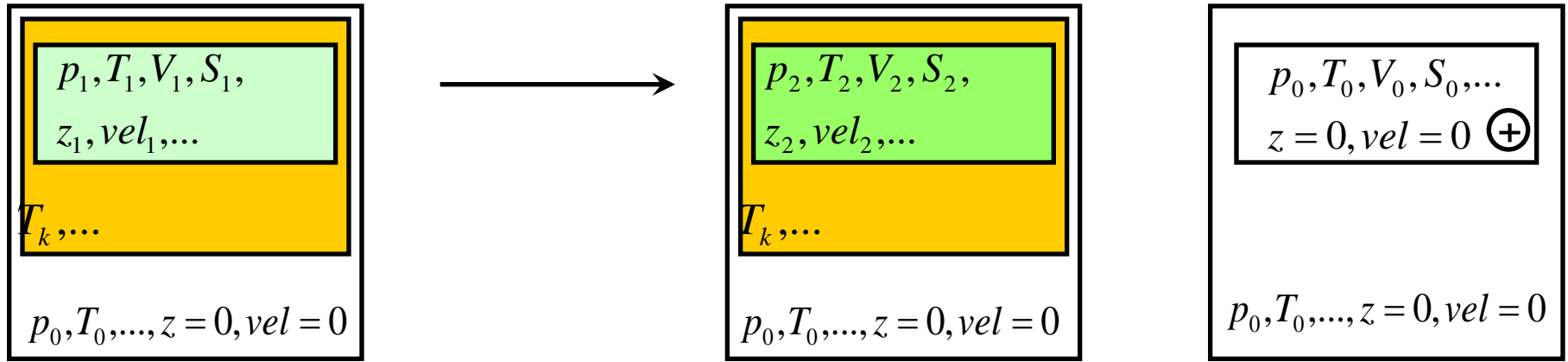
→

$$W_{real, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \sum_k \int \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)dQ_k - T_0 S_g$$

$$W_{rev, \acute{u}til} = -\Delta\Phi + \sum_k \int \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)dQ_k$$

EN TODOS LOS CASOS S_g ES LA IRREVERSIBILIDAD GENERADA SOLAMENTE EN EL SISTEMA

Transferencia de exergía.



$$\Delta\Phi = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$\Delta\Phi = \sum_k \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) dQ_k - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_g$$

$$\Delta\Phi = \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) Q_k - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 S_g$$

Transferencia de exergía debida al calor

$$1 - \frac{T_0}{T_k} = \eta_{REV,k}$$

Transferencia de exergía debida al trabajo

Pérdida de exergía en la transferencia debida a la irreversibilidad

Cuando sólo se intercambia energía térmica con el ambiente (sólo k=0) no hay transferencia de exergía calórica.

Observaciones:

$$W_{\text{útil}} = W - p_0(V_2 - V_1)$$

$$W_{\text{útil}} = -\Delta\Phi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q - T_0S_g$$



$$\Delta\Phi = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0S_g$$



En términos del proceso seguido

De la definición

$$\Phi = (E - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$



$$\Delta\Phi = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$



En términos de los estados inicial y final

Exergía específica $\varphi = \Phi / m \Rightarrow \varphi = (e - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$

$$\Delta\Phi = (E_2 - E_1) + p_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$W_{\text{real,útil}} = -\Delta\Phi + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q - T_0S_g$$

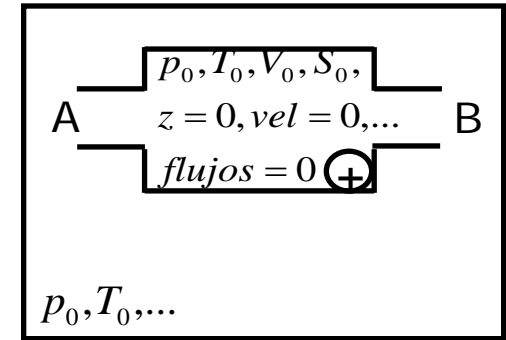
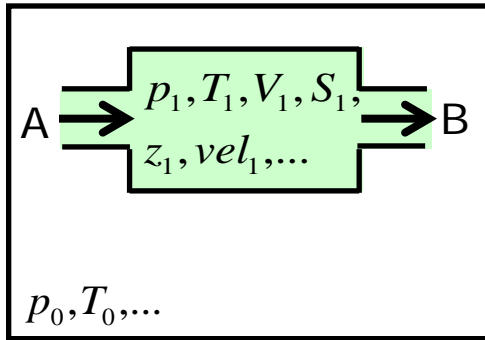
$$\Delta\Phi = \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)Q_k - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0S_g$$

$$\dot{\Phi} = \dot{E} + p_0\dot{V} - T_0\dot{S}$$

$$\dot{W}_{\text{real,útil}} = -\dot{\Phi} + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\dot{Q} - T_0\dot{S}_g$$

$$\dot{\Phi} = \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right)\dot{Q}_k - \left[\dot{W} - p_0\dot{V}\right] - T_0\dot{S}_g$$

7.3 EXERGÍA: SISTEMAS ABIERTOS



Definición de exergía de flujo:

$$\Psi_A = (E_A - U_0) + p_0(V_A - V_0) - T_0(S_A - S_0) + V_A(p_A - p_0) = (\Theta_A - \Theta_0) - T_0(S_A - S_0)$$

Exergía Φ_A que
lleva el flujo en A

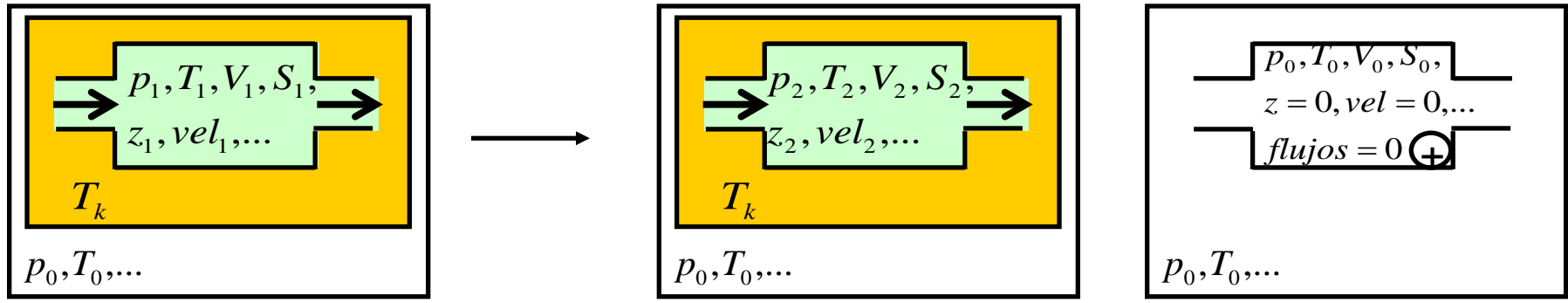
Exergía asociada al
trabajo de flujo en A

Exergía asociada al flujo: **EXERGÍA DE FLUJO**

$$\Psi_B = (\Theta_B - \Theta_0) - T_0(S_B - S_0)$$

EXERGÍA DE FLUJO específica: $\psi = \Psi / m = [(\theta - \theta_0) - T_0(s - s_0)]$

Trabajo útil en sistemas abiertos:



EXERGÍA
 $\Phi = m\phi = m[(e - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)]$

EXERGÍA DE FLUJO
 $\Psi = m\psi = m[(\theta - \theta_0) - T_0(s - s_0)]$

$$W_{\text{útil}} = [W - p_0\Delta V] = (\Phi_1 - \Phi_2) + \sum_k (1 - \frac{T_0}{T_k}) Q_k - T_0 S_g + \sum_{\text{entradas}} m_i \psi_i - \sum_{\text{salidas}} m_j \psi_j$$

$$\dot{\Phi} = \sum_k (1 - \frac{T_0}{T_k}) \dot{Q}_k - [\dot{W} - p_0 \dot{V}] - T_0 \dot{S}_g + \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_i \psi_i - \sum_{\text{salidas}} \dot{m}_j \psi_j$$

SISTEMAS CERRADOS

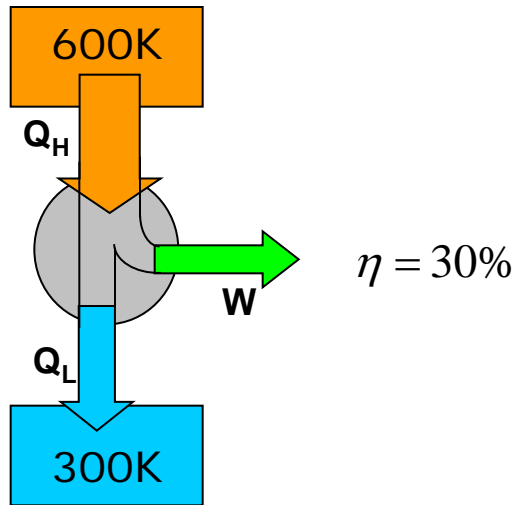
SISTEMAS ABIERTOS

SI EN LOS ALREDEDORES HAY EL SISTEMA CON SISTEMAS QUE NO SON BAÑOS LOS TÉRMINOS TÉRMICOS CORRESPONDIENTES SON INTEGRALES.

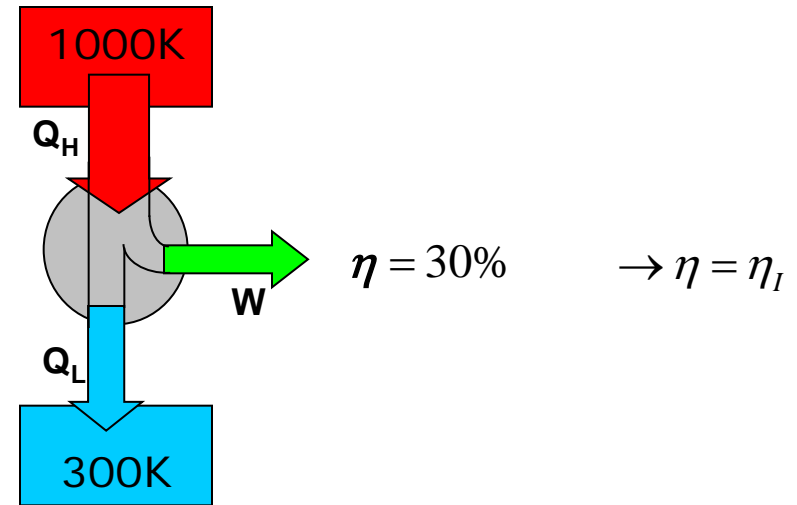
En TODOS LOS CASOS S_g ES LA IRREVERSIBILIDAD GENERADA SOLAMENTE EN EL SISTEMA

7.4 EFICIENCIA EXERGÉTICA

Necesidad de una definición de eficiencia asociada a la exergía: un ejemplo.



$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{600} = 50\%$$



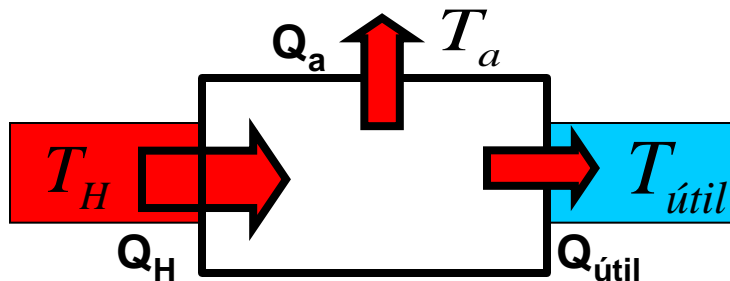
$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{1000} = 70\%$$

$$\text{eficiencia}_{exergética} \equiv \eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}}$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} = \frac{30}{50} = 0.60$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} = \frac{30}{70} = 0.43$$

Otro ejemplo,
($W=0$ & estado
estacionario).



Aquí las "Q" en
valor absoluto

Punto de vista
de la 1ª LEY:

$$\Delta U = Q_H - Q_u - Q_a - W = 0 \quad \Rightarrow Q_H = Q_u + Q_a \quad \rightarrow \eta_I = \frac{Q_u}{Q_H}$$

Punto de vista
de la 2ª LEY:

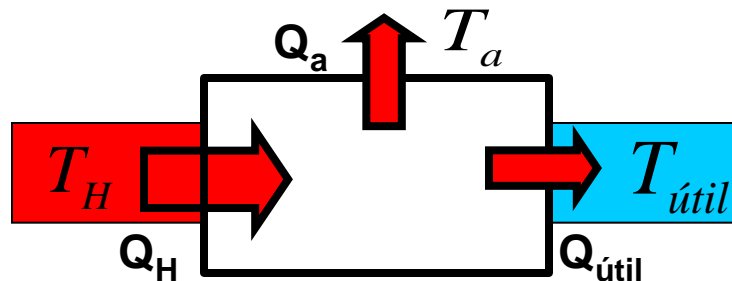
$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left[\dot{W} - p_0 \dot{V}\right] - T_0 \dot{S}_g = 0 \\ &= \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H - \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) \dot{Q}_u - \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) \dot{Q}_a - T_0 \dot{S}_g \\ &\Rightarrow \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) \dot{Q}_u + \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) \dot{Q}_a + T_0 \dot{S}_g \end{aligned}$$

↑
Exergía
entrante

↑
Exergía
perdida

↑
Exergía
utilizada
(hasta este
punto)

Otro ejemplo,
($W=0$ & estado estacionario).



Aquí las "Q" en valor absoluto

$$\rightarrow \eta_I = \frac{Q_u}{Q_H}$$

$$\Rightarrow \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H = \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) \dot{Q}_u + \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) \dot{Q}_a + T_0 \dot{S}_g$$



Exergía entrante



Exergía perdida

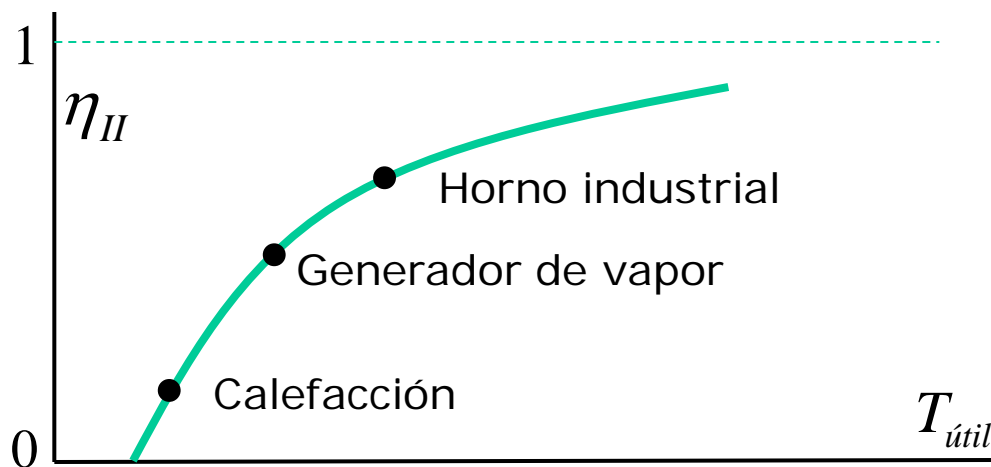


Exergía utilizada
(hasta este punto)

$$\Rightarrow \eta_{II} = \frac{(1 - T_0/T_u) \dot{Q}_u}{(1 - T_0/T_H) \dot{Q}_H}$$

$$\Rightarrow \eta_{II} = \eta_I \frac{(1 - T_0/T_u)}{(1 - T_0/T_H)}$$

Incluso si $\eta_I = 1 \rightarrow \eta_{II} < 1$



$$W_T = (E - U_0) + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) - T_0 S_{g,T} = \Phi - I$$

$$\text{eficiencia}_{\text{exergética}} \equiv \eta_{II} = \frac{\text{Exergía}_{\text{obtenida}}}{\text{Exergía}_{\text{disponible}}} = \frac{\Phi - I}{\Phi} = 1 - \frac{I}{\Phi}$$

Máquinas térmicas: $\text{eficiencia}_{\text{ex.}} \equiv \eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{\text{rev}}}$ (También se llama eficacia)

Dispositivos que producen trabajo: $\text{eficiencia}_{\text{ex}} \equiv \eta_{II} = \frac{W_{\text{real}}}{W_{\text{rev}}}$

Dispositivos que consumen trabajo: $\text{eficiencia}_{\text{ex}} \equiv \eta_{II} = \frac{W_{\text{rev}}}{W_{\text{real}}} = \frac{COP_{BC,real}}{COP_{BC,rev}}$

$$COP_{BC,rev} = \frac{Q_H}{W_{\text{rev}}}, \quad COP_{BC,real} = \frac{Q_H}{W_{\text{real}}}$$

Ejemplo 35

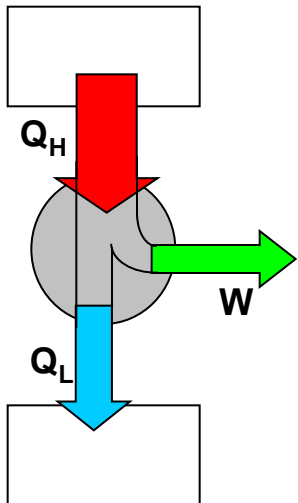
Análisis exergetico de una máquina térmica

$$T_H = 1200K \quad \dot{Q} = 500kJ / s$$

$$T_0 = 300K \quad \dot{W} = 180kJ / s$$

$$\dot{W}_{rev} ? \quad \dot{I} ? \quad \dot{W}_{\acute{u}til} ?$$

Visto desde Q_H



$$\eta_{rev} = 1 - T_0 / T_H = 0.75$$

$$\dot{W}(rev) = \eta_{rev} \dot{Q} = 375kW$$

$$\Rightarrow \dot{\Phi}_{de_Q_H} = -375kW$$

$$\Rightarrow \dot{I} = T_0 S_g = \dot{W}(rev) - \dot{W}(real) = 195kW$$

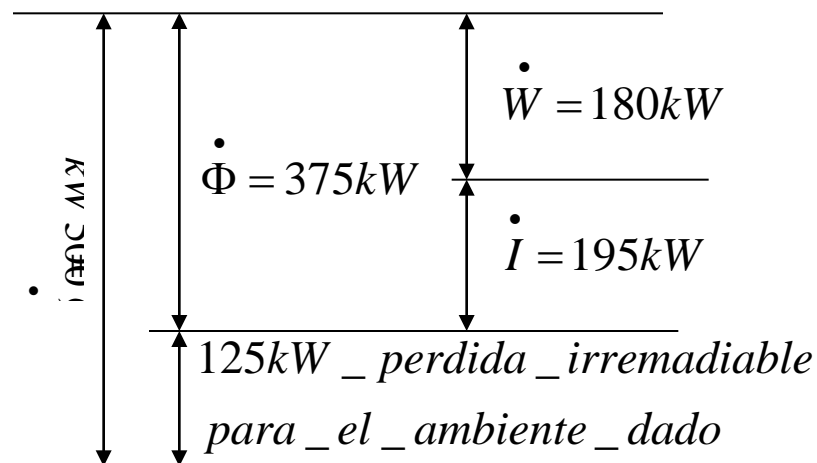
$$\Delta V = 0 \Rightarrow \dot{W}(\acute{u}til) = \dot{W}$$

Visto desde el fluido de la máquina

$$\dot{W}_{\acute{u}til} = \dot{W} - p_0 \Delta V = -\Delta \dot{\Phi}_f + \left(1 - \frac{T_0}{T_L}\right) \dot{Q}_L + \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q}_H - T_0 S_g$$

$$\dot{W}_{rev} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \dot{Q} = 375kW$$

$$\dot{I} = \dot{W}(rev) - \dot{W}(real) = 195kW$$



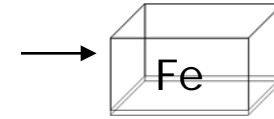
Ejemplo 36

Análisis exergetico de una masa de hierro que se deja enfriar

$$m = 500kg$$

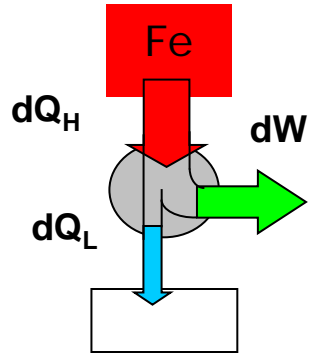
$$c = 0.45kJ / kgK$$

$$T_{Fe, inicial} = 473K$$



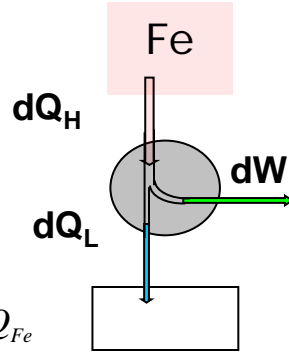
$$T_0 = 300K$$

Exergía inicial del hierro: máximo trabajo obtenible con una máquina térmica



$$\eta_{rev} = \frac{dW(rev)}{dQ_{Fe}}$$

$$= 1 - \frac{T_0}{T_{Fe}}$$



$$dW(rev) = (1 - \frac{T_0}{T_{Fe}})dQ_{Fe}$$

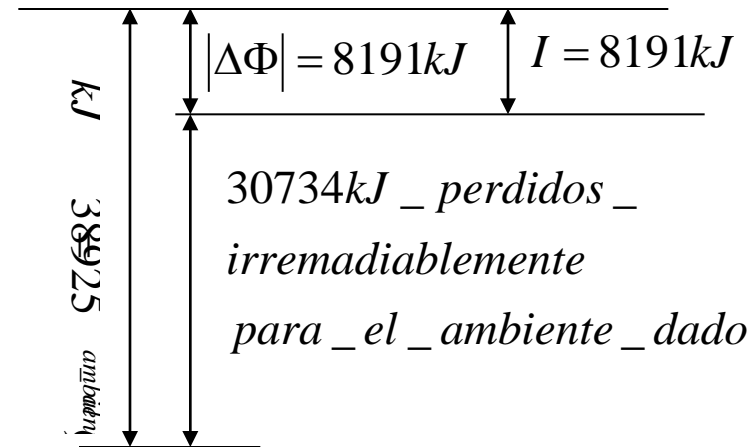
$$W(rev) = \int_{T_{Fe, inicial}}^{T_{Fe, final}=T_0} (1 - \frac{T_0}{T_{Fe}})dQ_{Fe}$$

$$W(rev) = - \int_{T_{Fe, inicial}}^{T_{Fe, final}=T_0} (1 - \frac{T_0}{T_{Fe}})mcdT_{Fe}$$

$$W(rev) = mc(T_{Fe, ini} - T_0) - mcT_0 \ln \frac{T_{Fe, ini}}{T_0} = 8191kJ$$

$$\Delta\Phi_{Fe} = -W_{REV} = -8191kJ$$

$$Q_{al_ambiente} = mc(T_{Fe, ini} - T_0) = 38925kJ$$



$$W_{real} = 0$$

$$W_{rev} - W_{real} = I = 8191kJ$$

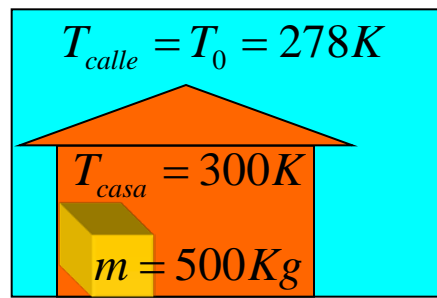
Visto desde el fluido de la máquina

$$W_{rev} = -\cancel{\Delta\Phi_f} + (1 - \frac{T_0}{T_L})Q_L + \int (1 - \frac{T_0}{T_H})dQ_H - T_0 S_g = 8191kJ$$

Ejemplo 37

$$T_{Fe, inicial} = 473K$$

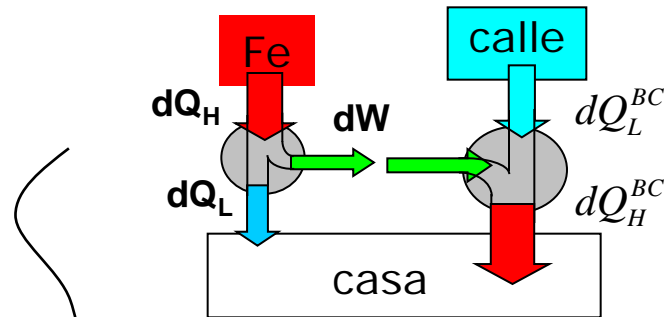
$$c = 0.45kJ / kgK$$



¿ $Q_{máximo_a_la_casa}$?

$$Q_{a_la_casa_directamente} = mc(T_{Fe, ini} - T_{casa}) = 38.925kJ$$

$I \neq 0 \Rightarrow Q_{a_la_casa_directamente} < Q_{máximo_a_la_casa}$ (Ojo, ahora T_0 es diferente al ej. Anterior)



$$W(rev) = 8.191kJ$$

$$Q_{a_la_casa}^{Fe} = 38.925kJ - 8.191kJ = 30.734kJ$$

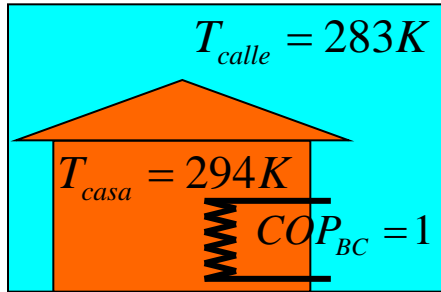
$$COP_{BC} = \frac{dQ_H^{BC}}{dW}$$

$$COP_{BC}(rev) = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = \frac{1}{1 - 278/300} = 13'6$$

$$Q_H^{BC} = Q_{a_la_casa}^{BC} = 13.6 \times W(rev) = 111.398kJ$$

$$Q_{a_la_casa}^{Total} = \dots = 142.132kJ$$

Ejemplo 38



Eficiencia exergetica de una bomba de calor

$$COP_{BC} = \frac{\text{Energía _ Deseada}}{\text{Coste _ Energético}} = \frac{Q_H}{W} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H}$$

$$COP_{BC,rev} = \frac{1}{1 - T_L / T_H} = \frac{1}{1 - 283 / 294} = 26.7$$

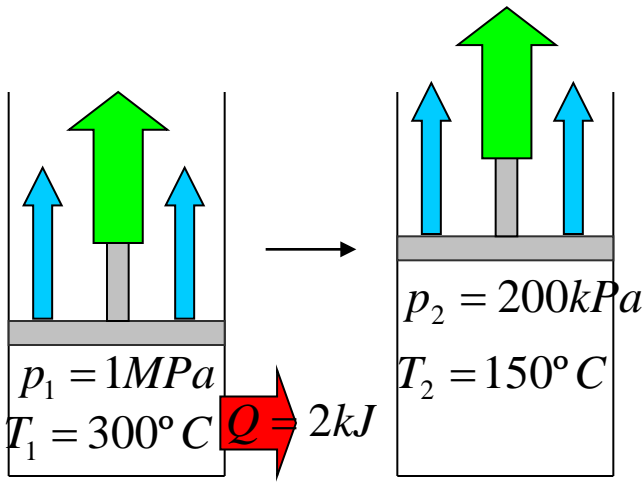
$$\text{eficiencia} \equiv \eta_{II} = \frac{W_{rev}}{W} = \frac{Q_H / COP_{BC,rev}}{Q_H / COP_{BC,real}} = \frac{COP_{BC,real}}{COP_{BC,rev}} = \frac{1}{26.7} = 0.037 = 3.7\%$$

Ejemplo 39

$I?$

$T_0 = 25^\circ C \quad p_0 = 100kPa$

$\eta_{II}?$



$m = 0.05Kg$ vapor_de_agua

u, v, s de los estados inicial y final: tablas de vapor sobrecalentado

u_0, v_0, s_0 del estado muerto: tabla de agua líquida o valores de saturación a la misma temperatura.

$$\Phi_1 = (U_1 - U_0) + p_0(V_1 - V_0) - T_0(S_1 - S_0) = 35.0kJ$$

$$\Phi_2 = \dots = 25.4kJ$$

$$\Rightarrow W_{rev.\acute{u}til} = -\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = (35.0 - 25.4)kJ = 9.6kJ$$

$$W_{real} = Q - \Delta U = 8.8kJ$$

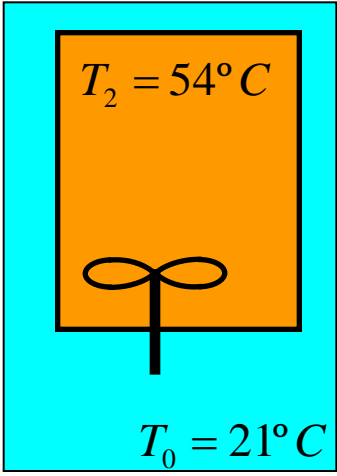
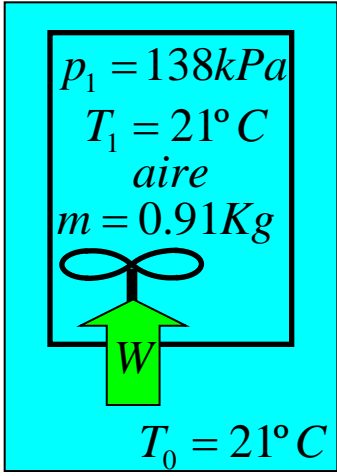
$$W_{\acute{u}til,real} = W_{real} - p_0\Delta V = 5.3kJ$$

$$\Rightarrow I = W_{rev.\acute{u}til} - W_{\acute{u}til,real} = (9.6 - 5.3)kJ = 4.3kJ$$

También: $I = T_0 S_{gen} = T_0(\Delta S - \frac{Q}{T_0}) = 4.3kJ$

$$eficiencia \equiv \eta_{II} = \frac{W_{\acute{u}til,real}}{W_{rev}} = \frac{5.3kJ}{9.6kJ} = 0.552 = 55.2\%$$

Ejemplo 40



$I ? -W_{\text{útil,rev}} ? -W_{\text{útil,real}} ?$

Aire = gas ideal $c_v \approx c_v(\bar{T}) = c_v(33^\circ\text{C})$ (Tablas)

$$I = T_0 S_{\text{gen}} = T_0 \left(\Delta S - \frac{Q}{T_0} \right) = T_0 \Delta S$$

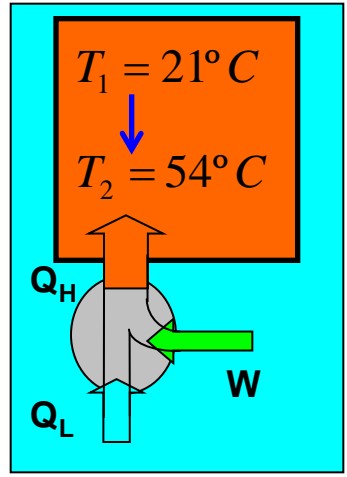
$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{mc_v dT}{T} = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \left. \vphantom{\Delta S} \right\} I = 20.679 \text{kJ}$$

Proceso reversible entre los mismos estados inicial y final

$\Delta V = 0 \Rightarrow W(\text{útil}) = W$

$W_{\text{rev}} = -\Delta\Phi = T_0 \Delta S - \Delta U - p_0 \Delta V = T_0 \Delta S - mc_v \Delta T = -1.055 \text{kJ}$

$W_{\text{real}} = Q - \Delta U = -\Delta U = -mc_v \Delta T = -21.734 \text{kJ}$ También usando: $W_{\text{rev}} - W_{\text{real}} = I$



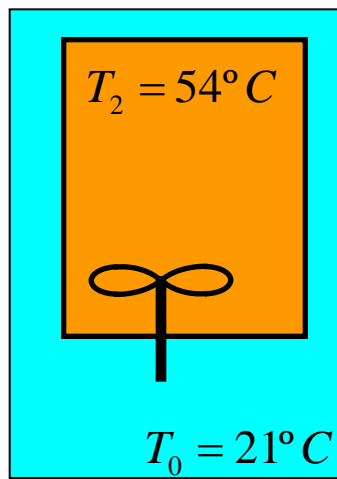
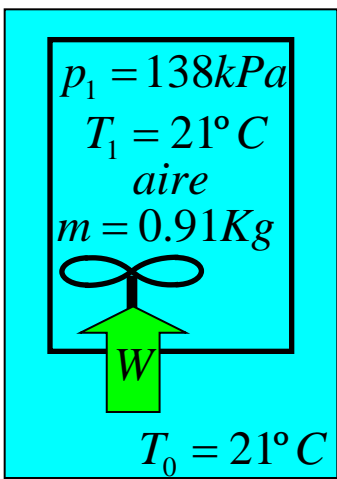
Calor necesario para subir a $T = 54^\circ\text{C}$: $Q_H = \Delta U = mc_v \Delta T = 21.7 \text{kJ}$

$COP_{\text{BC}} = \frac{dQ_H}{dW} = \frac{1}{1 - dQ_L / dQ_H} = \frac{1}{1 - T_0 / T_H}$ $dW_{\text{rev}} = (1 - T_0 / T_H) dQ_H$

$W_{\text{rev}} = \int_{T_H=T_1}^{T_H=T_2} (1 - T_0 / T_H) dQ_H = \int_{T_H=T_1}^{T_H=T_2} (1 - T_0 / T_H) mc_v dT_H$

$W_{\text{rev}} = mc_v (T_2 - T_1) - mc_v T_0 \ln \frac{T_2}{T_1} = 21.70 \text{kJ} - 20.68 \text{kJ} = 1.05 \text{kJ}$

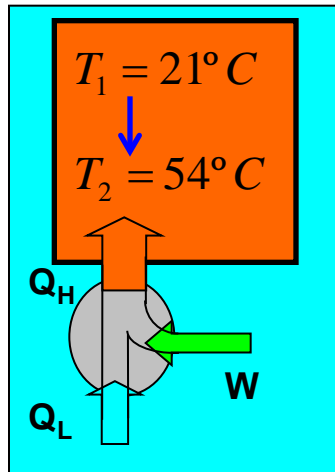
Ejemplo 40



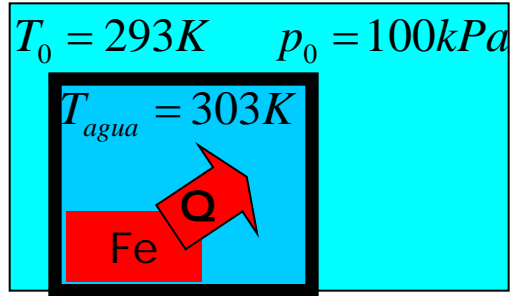
$$I = 20.679\text{kJ}$$

$$W_{rev} = -1.05\text{kJ}$$

$$W_{real} = -21.734\text{kJ}$$



$$W_{rev} = 1.05\text{kJ}$$



Ejemplo 41

$T_{Fe, inicial} = 623K$
 $m_{Fe} = 5Kg$
 $m_{agua} = 100Kg$

I?

Agua: líquido incompresible

Capacidades del agua y hierro obtenidas de las tablas

$\cancel{Q} - \cancel{W} = \Delta U = c_{agua} m_{agua} \Delta T_{agua} + c_{Fe} m_{Fe} \Delta T_{Fe} = 0$

$\Delta T_{agua} = T_{final} - 303K$

$\Delta T_{Fe} = T_{final} - 623K$

$T_{final} = 304.7K$

$\Delta V = 0 \Rightarrow W(útil) = W$

$\Phi_{agua1} = T_0 \Delta S_{1agua} - \Delta U_{1agua} - \cancel{p_0 \Delta V_{1agua}} = 69.8kJ$
 $\Phi_{Fe1} = T_0 \Delta S_{1Fe} - \Delta U_{1Fe} - \cancel{p_0 \Delta V_{1Fe}} = 245.2kJ$
 $\Phi_{inicial} = \Phi_{agua1} + \Phi_{Fe1} = 315kJ$

$m_a c_a (T_0 - 303K)$
 $m_{Fe} c_{Fe} (T_0 - 623K)$

$m_a c_a T_0 \text{Ln} \frac{T_0}{303K}$
 $m_{Fe} c_{Fe} T_0 \text{Ln} \frac{T_0}{623K}$

Proceso reversible entre los mismos estados inicial y final

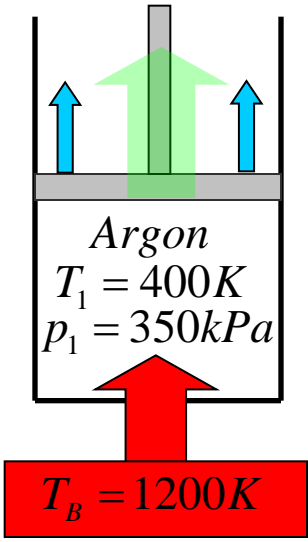
$\Phi_{agua2} = \dots = 95.2kJ$
 $\Phi_{Fe2} = \dots = 0.5kJ$
 $\Phi_{final} = \Phi_{agua2} + \Phi_{Fe2} = 95.7kJ$

$I = W_{útil, rev} - \cancel{W_{útil, real}} = \Phi_{inicial} - \Phi_{final} = 219.3kJ$

OJO: El sistema (Fe+agua) no intercambia Q con nadie, es cerrado, así que $W_{rev} = \Phi_1 - \Phi_2 + nada$

$V_2 = 0.02m^3$ $T_0 = 300K$ $W_{real,útil} ?$ $I ?$ $¿S_1 - S_2 ?$
 $V_1 = 0.01m^3$ $p_0 = 100kPa$

Proceso cuasiestático isotermo



iii no reversible!!!

$W_{real} = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \frac{p_1 V_1}{V} dV = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 2.43kJ$

$W_0 = \int_1^2 p_0 dV = p_0 \Delta V = 1kJ \Rightarrow W_{real,útil} = W - W_0 = 1.43kJ$

Argon = gas ideal
 $pV = RT = const$

$W_{rev,útil}(1,2) = -\Delta\Phi(1,2) + Q(1 - T_0/T_B)$

$= \cancel{U_1} - U_2 + \underbrace{p_0(V_1 - V_2)}_{-W_0} - T_0(S_1 - S_2) + Q(1 - T_0/T_B)$

$= T_0 \frac{W}{T} \quad \Delta U = Q + \cancel{Q_0} - W$
 $Q = W = 2.43kJ$

$real \rightarrow \int_1^2 \frac{dQ}{T_B} < \Delta S!!!$

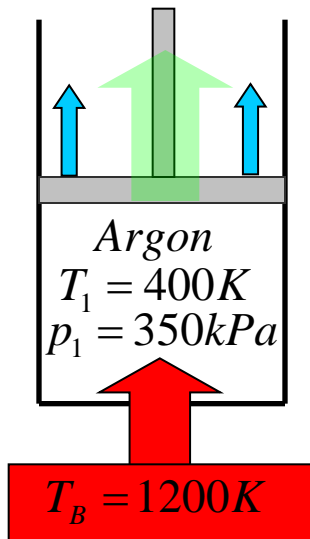
Camino reversible entre 1 y 2: la misma isoterma pero con infinitos baños

$\int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU}{T} + \frac{dW}{T} = \int_1^2 \frac{pdV}{T} = \int_1^2 \frac{RdV}{V} = R \ln \frac{V_2}{V_1}$

$más_rápido = \frac{W}{T} = 0.00608kJ / K$

$\Rightarrow W_{rev,útil}(1,2) = \dots = 2.64kJ$

$\Rightarrow I = W_{rev,útil}(1,2) - W_{real,útil}(1,2) = 1.21kJ$



$$V_2 = 0.02m^3 \quad T_0 = 300K \quad W_{real, \acute{u}til} ? \quad I ? \quad \dot{S}_1 - S_2 ?$$

$$V_1 = 0.01m^3 \quad p_0 = 100kPa$$

Ejemplo 42
continuación

Proceso cuasiestático isoterma

$$W_{real, \acute{u}til} = W - W_0$$

$$W_{rev, \acute{u}til}(1,2) = \cancel{U_1} - \cancel{U_2} + \underbrace{p_0(V_1 - V_2) - T_0(S_1 - S_2)}_{-W_0} + Q(1 - T_0/T_B)$$

$$= T_0 \frac{W}{T} \quad \Delta \cancel{U} = Q + \cancel{Q_0} - W$$

$$Q = W$$

$$I = W_{rev, \acute{u}til}(1,2) - W_{real, \acute{u}til}(1,2)$$

$$I = -\cancel{W_0} + T_0 \frac{W}{T} + W(\cancel{1} - T_0/T_B) - (\cancel{W} - \cancel{W_0}) = T_0 \left(\frac{W}{T} - \frac{W}{T_B} \right)$$

$$\Rightarrow S_g = \left(\frac{W}{T} - \frac{W}{T_B} \right)$$

Evaluación alternativa de $I = T_0 S_g$ $\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T_B} + S_g$

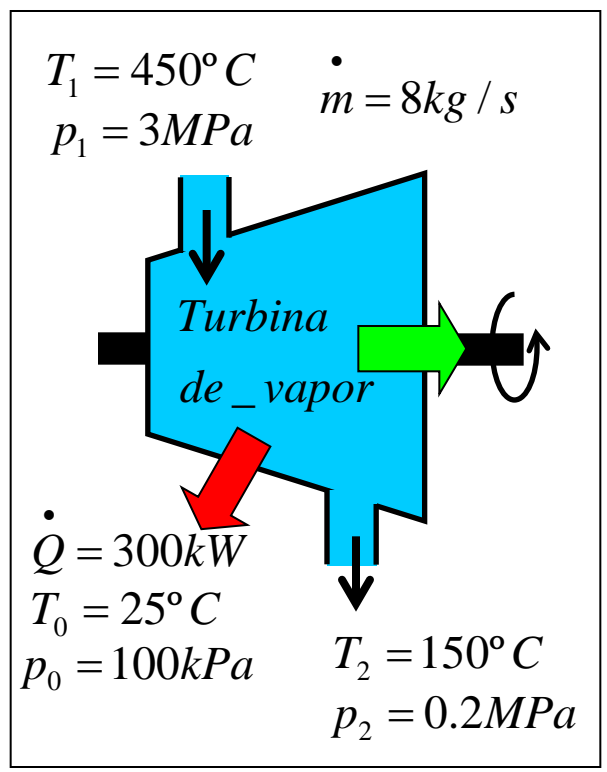
$$S_g = \Delta S - \int_1^2 \frac{dQ}{T_B} = \frac{W}{T} - \frac{1}{T_B} \int_1^2 dQ = \frac{W}{T} - \frac{Q}{T_B} = \frac{W}{T} - \frac{W}{T_B} \dots\dots\dots$$

Argon=gas ideal

$$pV = RT = const$$

$$real \rightarrow \int_1^2 \frac{dQ}{T_B} < \Delta S!!!$$

Ejemplo 43



De las tablas se obtiene h y s para el estado de entrada (vapor sobrec., h_1 y s_1) de salida (vapor sobrec. h_2 y s_2) y el estado muerto (agua líquida, h_0 y s_0).

$$1^a \text{ Ley: } 0 = \dot{Q} - \dot{W}_{real} - \dot{m}(\Delta h + \cancel{\Delta e_c} + \cancel{\Delta e_p}) \quad \Delta h = h_2 - h_1$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{real} = \dots = 4302 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{rev} = -\cancel{\Phi} + \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \sum_{entradas} \dot{m}_i \psi_i - \sum_{salidas} \dot{m}_j \psi_j$$

$$= \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) = \dot{m}([\theta_1 - \cancel{\theta_0} - T_0(s_1 - \cancel{s_0})] - [\theta_2 - \cancel{\theta_0} - T_0(s_2 - \cancel{s_0})]) =$$

$$\dot{W}_{max} = \dot{W}_{rev} = \dot{m}(\theta_1 - T_0 s_1) - \dot{m}(\theta_2 - T_0 s_2) =$$

$$= \dot{m}(h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2)) = \dots = 5069 \text{ kW}$$

\dot{W} ? \dot{W}_{max} ? η_{II} ? I ? Ψ_{vapor_1} ?

$$\eta_{II} = \frac{W_{real}}{W_{rev}} = \dots = 0.849$$

$$I = W_{rev} - W_{real} = \dots = 767 \text{ kW}$$

$$\psi_1 = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0) + \cancel{vel_1^2/2} + \cancel{gz_1} = \dots = 1238 \text{ kJ/kg}$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{m}\psi_1} = 0.434$$

Se obtiene el 43.4% del flujo de exergía del vapor de entrada

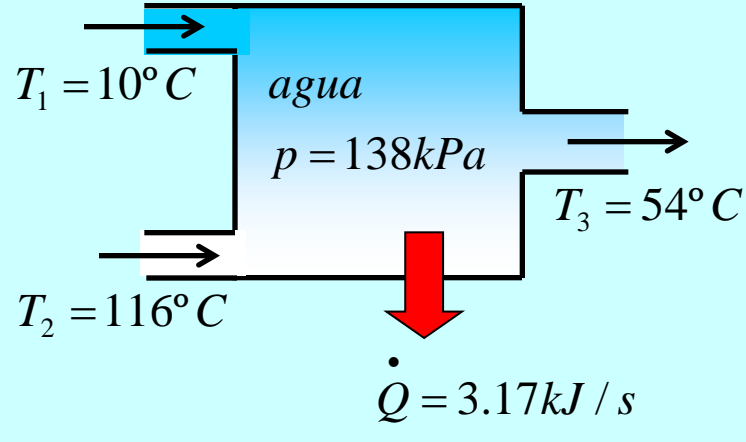
$$\Rightarrow \frac{\dot{W}_{rev}}{\dot{m}\psi_1} = 0.512$$

El máximo que podría obtenerse del flujo de exergía del vapor de entrada es el 51.2%

Ejemplo 44

$$T_0 = 21^\circ C \quad p_0 = 101kPa$$

$$\dot{m}_1 = 2.27kg/s$$



$\dot{I}?$

Conservación de masa y energía:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

$$0 = \dot{Q} - \dot{W}_{real} + \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 - \underbrace{\Delta e_c - \Delta e_p}_{\text{Despreciables}}$$

h de las tablas

$$\Rightarrow \dot{m}_2 = 0.17kg/s \quad \Rightarrow \dot{m}_3 = 2.44kg/s$$

$$\dot{W}_{rev} = -\dot{\Phi} + \sum_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k + \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_i \psi_i - \sum_{\text{salidas}} \dot{m}_j \psi_j$$

$$\begin{aligned} &= \dot{m}_1 \psi_1 + \dot{m}_2 \psi_2 - \dot{m}_3 \psi_3 = \dot{m}_1 [\theta_1 - \theta_0 - T_0(s_1 - s_0)] + \dot{m}_2 [\theta_2 - \theta_0 - T_0(s_2 - s_0)] - \dot{m}_3 [\theta_3 - \theta_0 - T_0(s_3 - s_0)] = \\ &= (\dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3)(-\theta_0 - T_0 s_0) + \dot{m}_1(\theta_1 - T_0 s_1) + \dot{m}_2(\theta_2 - T_0 s_2) - \dot{m}_3(\theta_3 - T_0 s_3) = \\ &= \dot{m}_1(h_1 - T_0 s_1) + \dot{m}_2(h_2 - T_0 s_2) - \dot{m}_3(h_3 - T_0 s_3) = 80.69kJ/s \end{aligned}$$

$$\dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W}_{real} = 80.69kJ/s$$

$$\dot{I} = T_0 \dot{S}_g \Rightarrow \dot{S}_g = 0.274kJ/sK$$

También:

$$\Delta S_{VC} = 0 = \sum_k \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \dot{S}_{g,s} + \sum_{\text{Entradas}} \dot{m}_i s_i - \sum_{\text{Salidas}} \dot{m}_j s_j$$

$$\dot{S}_g = \sum_{\text{Salidas}} \dot{m}_j s_j - \sum_{\text{Entradas}} \dot{m}_i s_i - \frac{\dot{Q}}{T_0} = 0.274kJ/sK$$

s de las tablas