

Balances de entropía

Profesor:

Joaquín Zueco Jordán

Área de Máquinas y Motores Térmicos

Aplicación del segundo principio a sistemas cerrados

$$\underline{S_2 - S_1} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \underline{S_G}$$

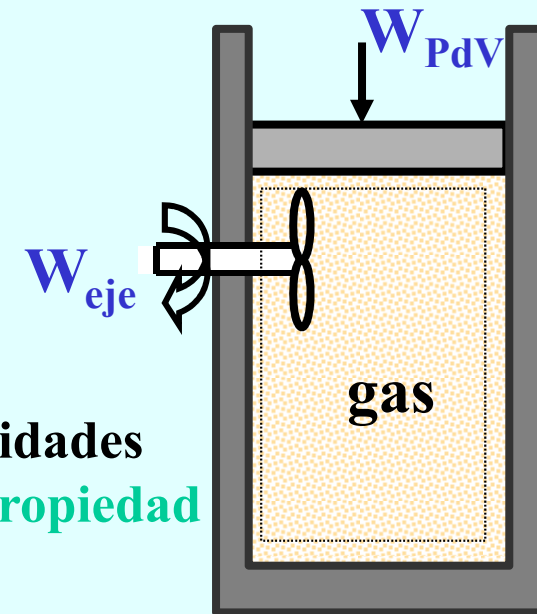
Variación
de entropía

Transferencia
de entropía

Generación
de entropía

Debido a irreversibilidades
internas, **no es una propiedad**

Transferencia de entropía que
acompaña a la transferencia de calor



$S_G > 0$ proceso real

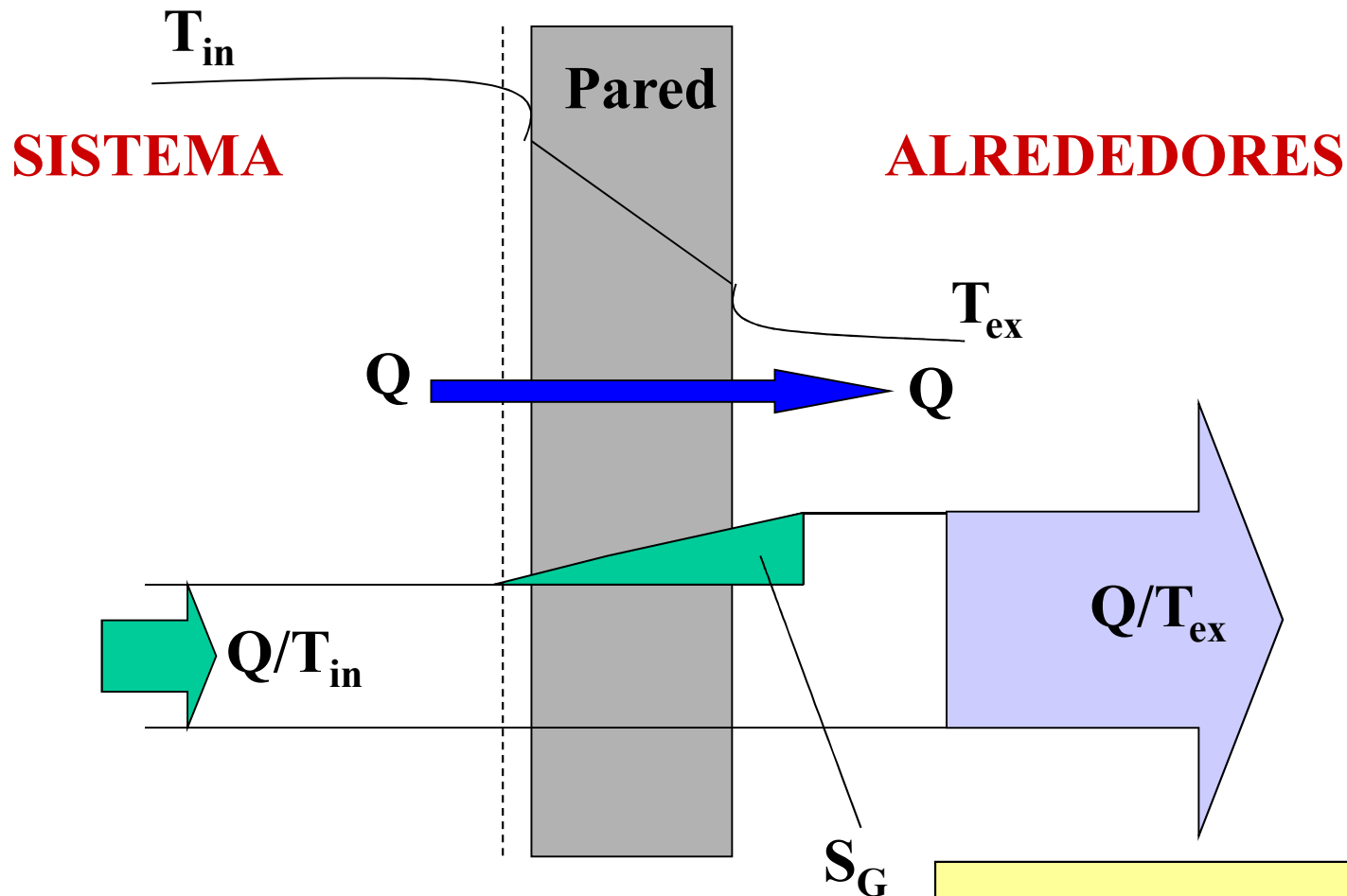
$S_G = 0$ proceso reversible

$$S_2 - S_1 > 0$$

$$S_2 - S_1 = 0$$

$$S_2 - S_1 < 0$$

Generación de entropía asociado a una transferencia de calor

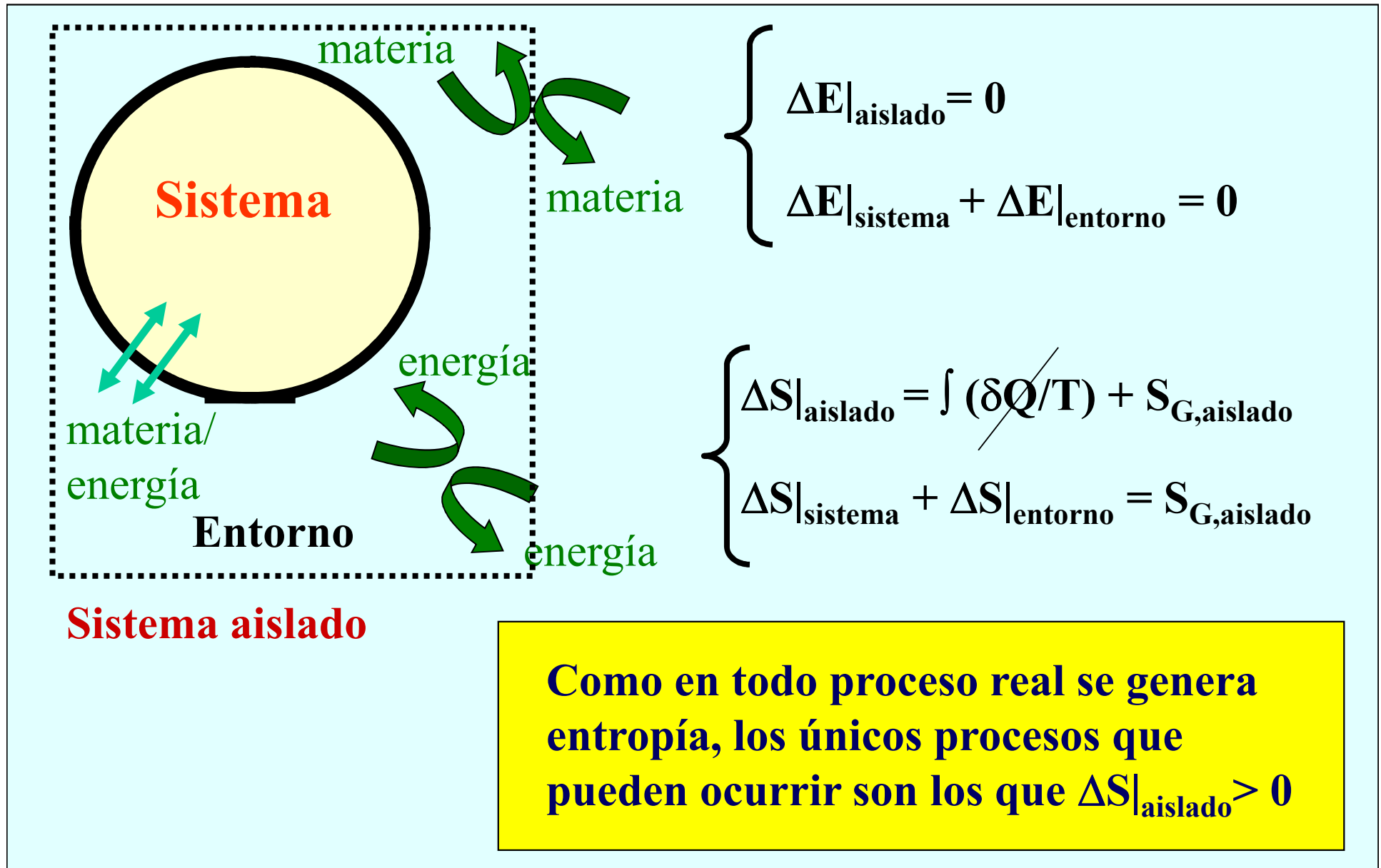


S_G no puede ser negativo, no puede haber una transferencia de calor espontánea desde $T_{ex} < T_{in}$

$$S_G = Q/T_{ex} - Q/T_{in} \geq 0$$

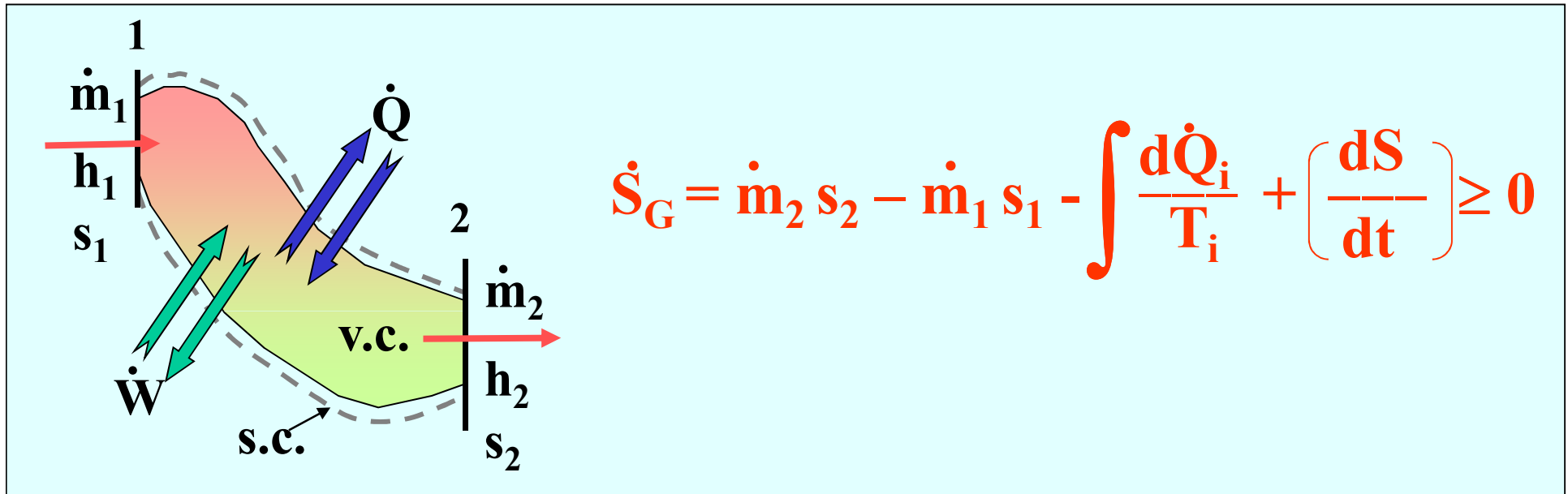
($\Delta s = 0$ mientras $Q = cte$)

Principio de aumento de entropía

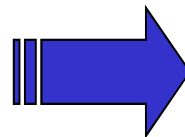


Aplicación del segundo principio a sistemas abiertos

$$\text{Acumulación de entropía en el V.C.} = \text{Entropía que entra al V.C.} - \text{Entropía que sale del V.C.} + \text{Generación de entropía}$$

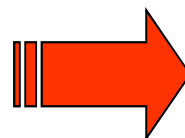


Régimen estacionario



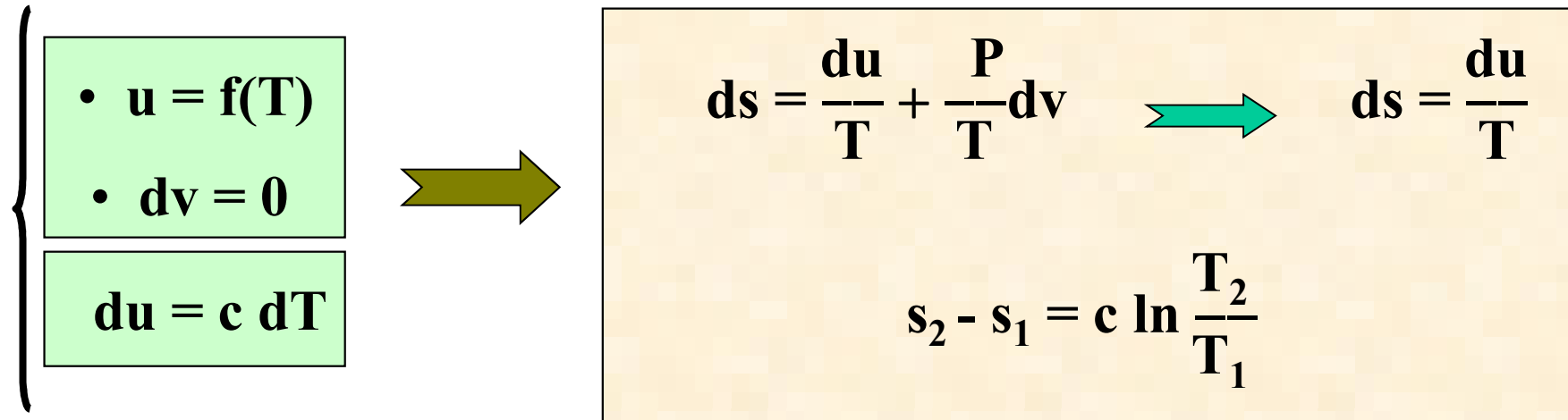
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} \quad \left[\frac{dS}{dt} \right] = 0$$

Proceso adiabático



$$\int \frac{d\dot{Q}_i}{T_i} = 0$$

Variación de entropía de una sustancia incompresible



Si el calor específico depende de T^a

$$s_2 - s_1 = \int \frac{c(T)}{T} dT$$

Trabajo en proceso de expansión adiabática de una sustancia incompresible

Turbina hidráulica

$$w_{12} = (h_2 - h_1) + (c_2^2 - c_1^2)/2 + g (z_2 - z_1)$$

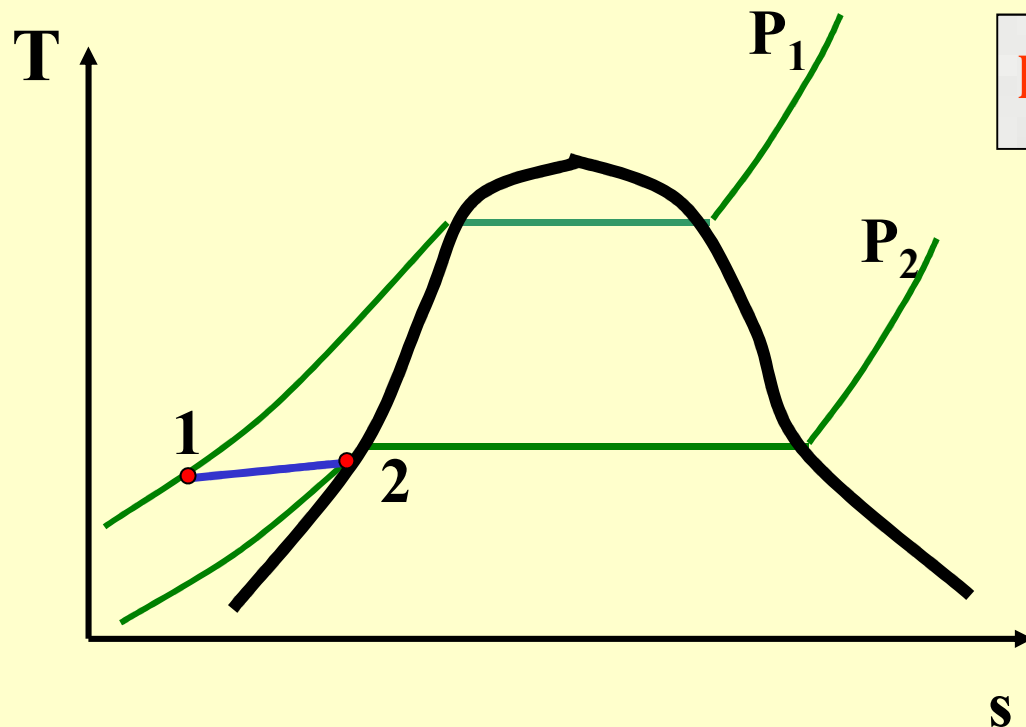
$$h_2 - h_1 = (u_2 - u_1) + v (P_2 - P_1)$$

$$S_G = \Delta s_{12} = c \ln \frac{T_2}{T_1} \geq 0$$

$$T_2 > T_1 \quad \text{Real} \quad T_2 \approx T_1 + 0,5$$

$$w_{12} = v (P_2 - P_1) + (c_2^2 - c_1^2)/2 + g (z_2 - z_1)$$

Ideal



Trabajo en procesos estacionarios y reversibles

$$0 = \dot{q} - \dot{w} - (\dot{h}_2 - \dot{h}_1) - \Delta \dot{e}_c - \Delta \dot{e}_z$$



$$\delta w = \delta q - dh - de_c - de_z$$

$$S_G = (s_2 - s_1) - \int \frac{dQ_i}{T_i}$$



$$\delta q = T ds - T S_G$$

Despejando el trabajo: $\delta w = T ds - T S_G - dh - de_c - de_z$

Sabiendo: $T ds = dh - v dP$

$$\delta w = \cancel{dh} - v dP - T S_G - \cancel{dh} - de_c - de_z$$

$$|w_r|$$

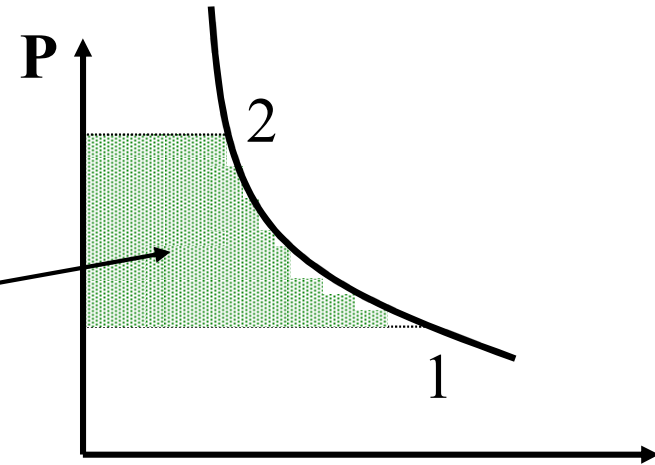


$$w = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v dP - |w_r|$$

Trabajo en procesos reversibles

$$w = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v \, dP - |w_r|$$

$$w_{\text{reversible}} = - \int v \, dP$$



Procesos de derrame

$$0 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v \, dP - |w_r|$$

Toberas: Siempre P y T ↓

Difusores: P y T ↑ (si $w_r=0$ o $w_r \approx 0$)

Son procesos casi reversibles

$$0 = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} - \int_1^2 v \, dP$$

$$\delta w = \cancel{dh} - v dP - T S_G - \cancel{dh} - de_c - de_z$$



- **Ecuación de Bernoullí**

En un líquido $\rho = \text{cte} \rightarrow v_1 = v_2 = v$

Proceso de derrame: $\delta w = 0$

Proceso reversible, $T S_G = W_r = 0$ (fluidos ideales)

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{c^2_2 - c^2_1}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Trabajo en procesos politrópicos, estacionarios y reversibles

Procesos politrópicos $\Rightarrow P v^n = K \quad n \Rightarrow (-\infty, +\infty)$

$$P v^n = K \quad \Rightarrow \quad P_1 v_1^n = P_2 v_2^n \quad n = \text{exponente politrópico}$$

$$w_{12} = -\int_1^2 v \, dP = -\int_{v_1}^{v_2} K \frac{dP}{P^{1/n}} \quad \Rightarrow \quad w_{12} = \frac{-n}{n-1} (P_2 v_2 - P_1 v_1)$$

Gas ideal

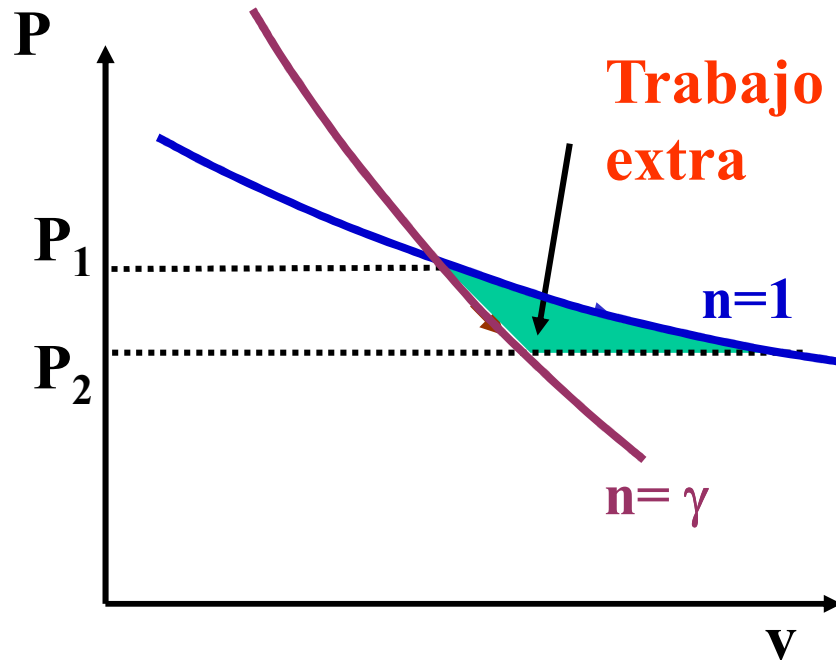
$$\frac{P v}{T} = R \quad \Rightarrow \quad \frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$$

$$\Rightarrow \quad w_{12} = \frac{-nR}{n-1} (T_2 - T_1)$$

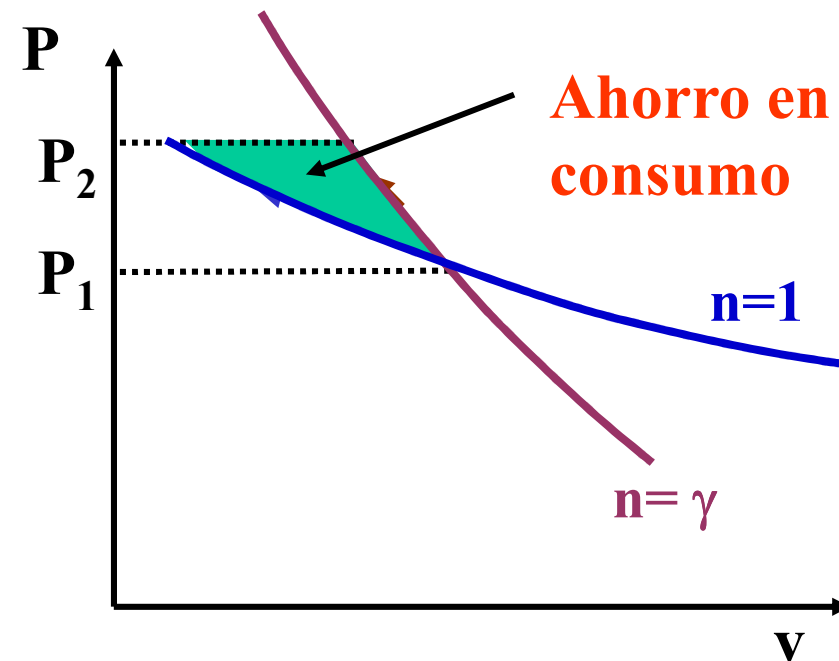
Comparación: Trabajo de expansión y compresión

Procesos politrópicos \Rightarrow

$$w_{12} = \frac{-n}{n-1} (P_2 v_2 - P_1 v_1)$$



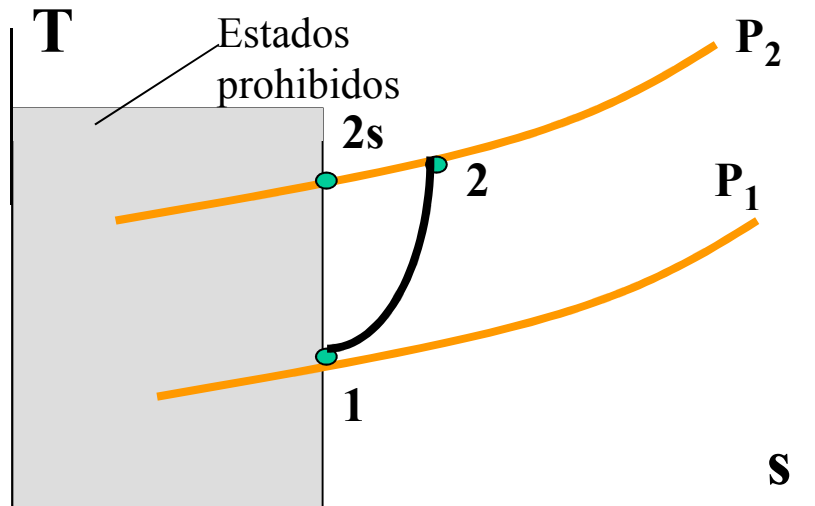
Expansión



Compresión

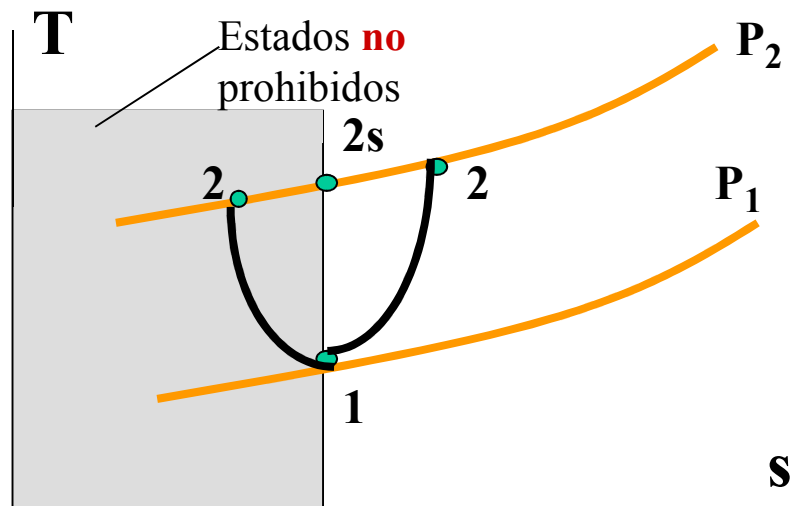
Interesa que ambos procesos se hagan sin variación de T^a ,
esto en la práctica es verdaderamente complicado

Estados permitidos según el 2º Principio



$$s_2 - s_1 = f(Q) + S_G$$

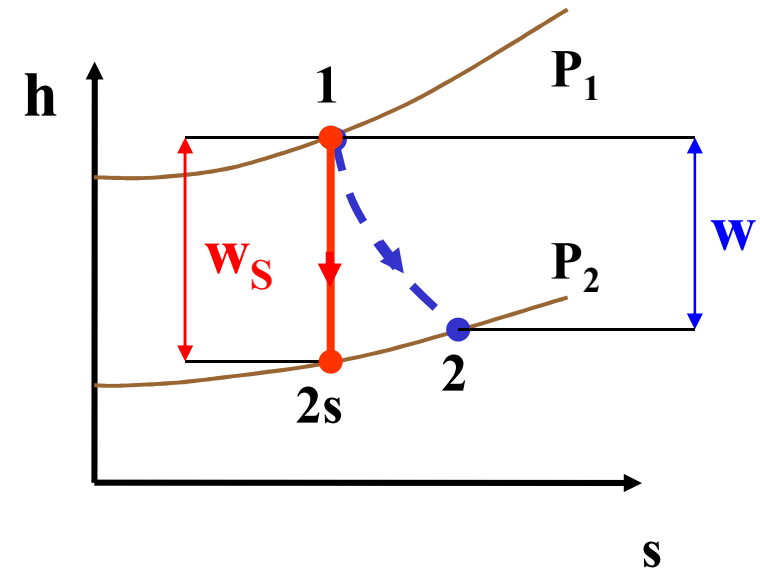
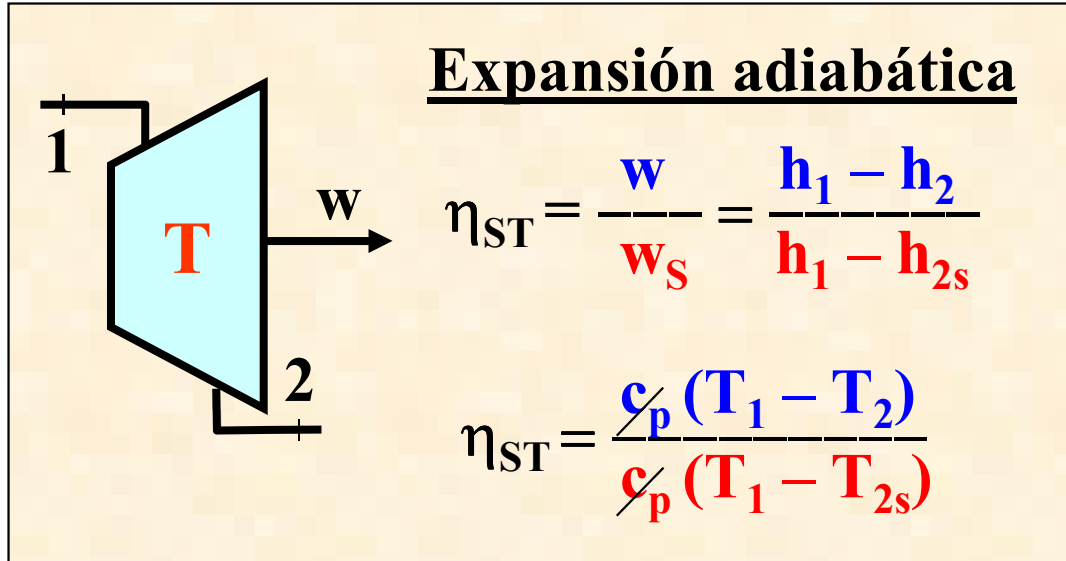
- i) $Q=0$ (adiabático) o
 $Q>0$ (aporte de calor)



- ii) $Q<0$ (pérdida de calor)

**Válido para sistemas
cerrados y abiertos**

Rendimiento interno o isentrópico



* Gas perfecto $h = c_p T$

TOBERA

(considerando sustancia incompresible)

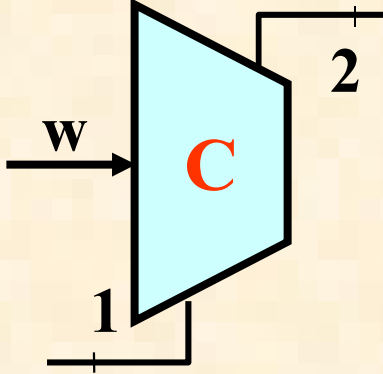
$$\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} = h_2 - h_1 = c (T_2 - T_1) + v (P_2 - P_1)$$

$$S_G = 0 = c \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{isoentrópico})$$

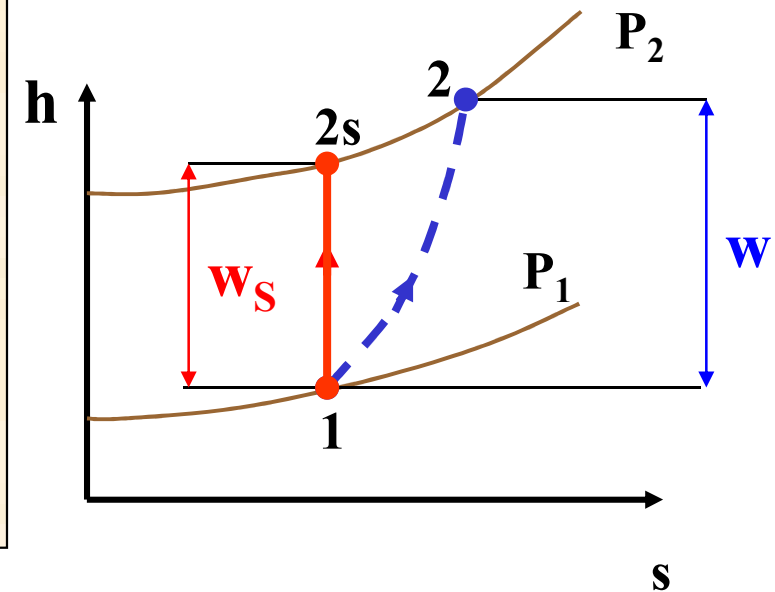
$$\eta_{STob} = \frac{\Delta E c}{\Delta E c_S} = \frac{(c_2^2 - c_1^2)/2}{(c_{2s}^2 - c_1^2)/2} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = \frac{(c_2^2 - c_1^2)/2}{v (P_1 - P_2)}$$

Rendimiento interno o isentrópico

Compresión adiabática



$$\eta_{sc} = \frac{|w_s|}{|w|} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

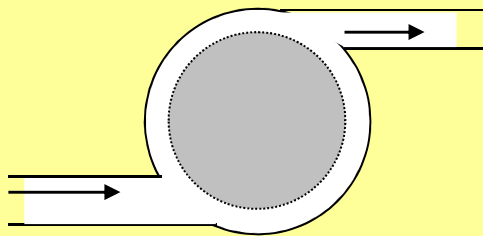
$$\eta_{sc} = \frac{c_p (T_{2s} - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)}$$


* Gas perfecto $h = c_p T$

BOMBA

(considerando sustancia incompresible)

$$h_2 - h_1 = c (T_2 - T_1) + v (P_2 - P_1)$$



$$S_G = 0 = c \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{isoentrópico})$$

$$\eta_{SB} = \frac{v (P_2 - P_1)}{h_2 - h_1}$$

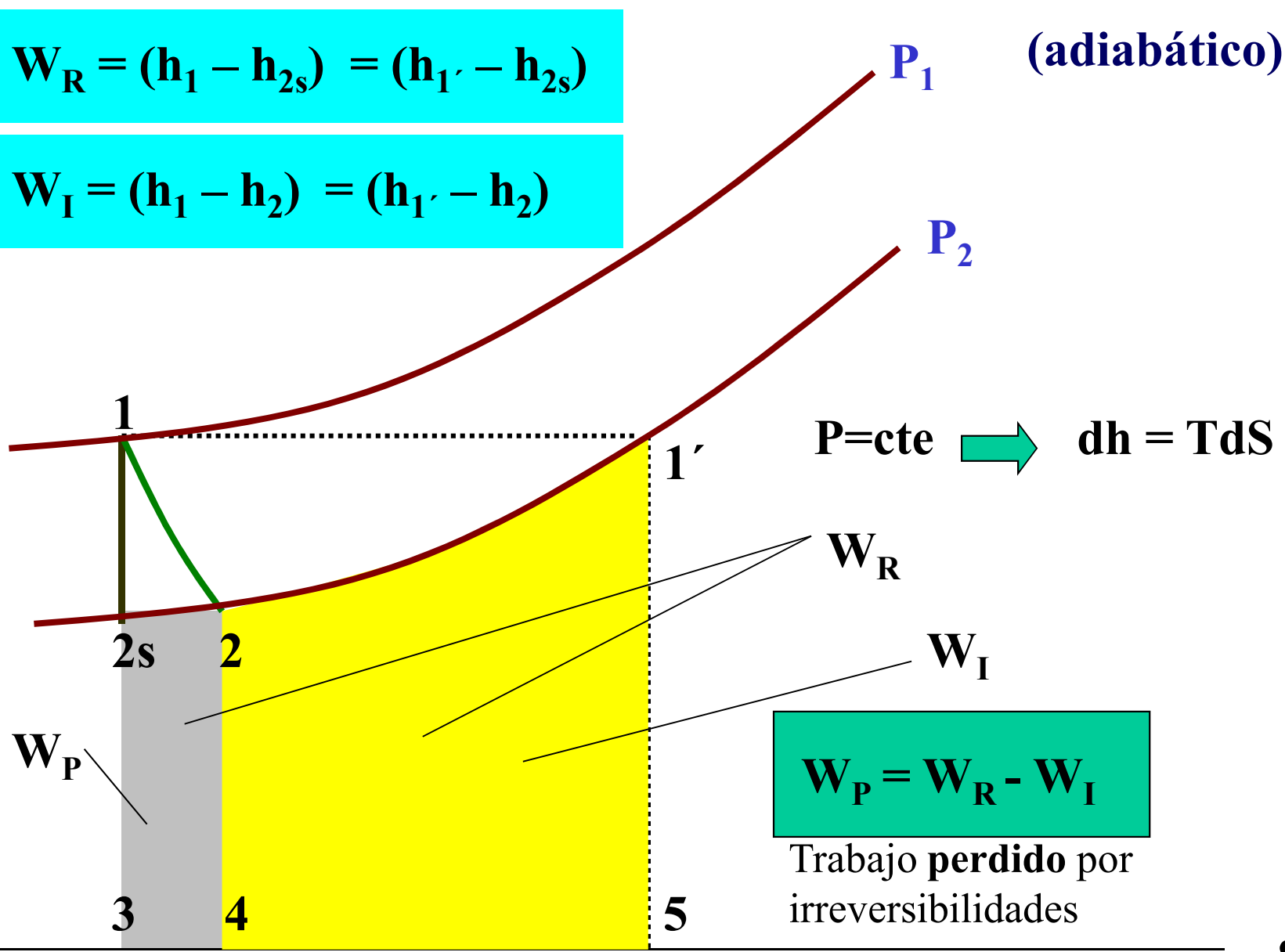
Ejemplo del uso del diagrama T-S

Gas ideal
(adiabático)

$$W_R = (h_1 - h_{2s}) = (h_{1'} - h_{2s})$$

$$W_I = (h_1 - h_2) = (h_{1'} - h_2)$$

E
x
p
a
n
s
i
ó
n



$P=cte \rightarrow dh = TdS$

W_R

W_I

$$W_P = W_R - W_I$$

Trabajo **perdido** por irreversibilidades

Ejemplo del uso del diagrama T-S

Gas ideal

(adiabático)

$$W_R = (h_{2s} - h_1) = (h_{2s} - h_{1'})$$

$$W_I = (h_2 - h_1) = (h_2 - h_{1'})$$

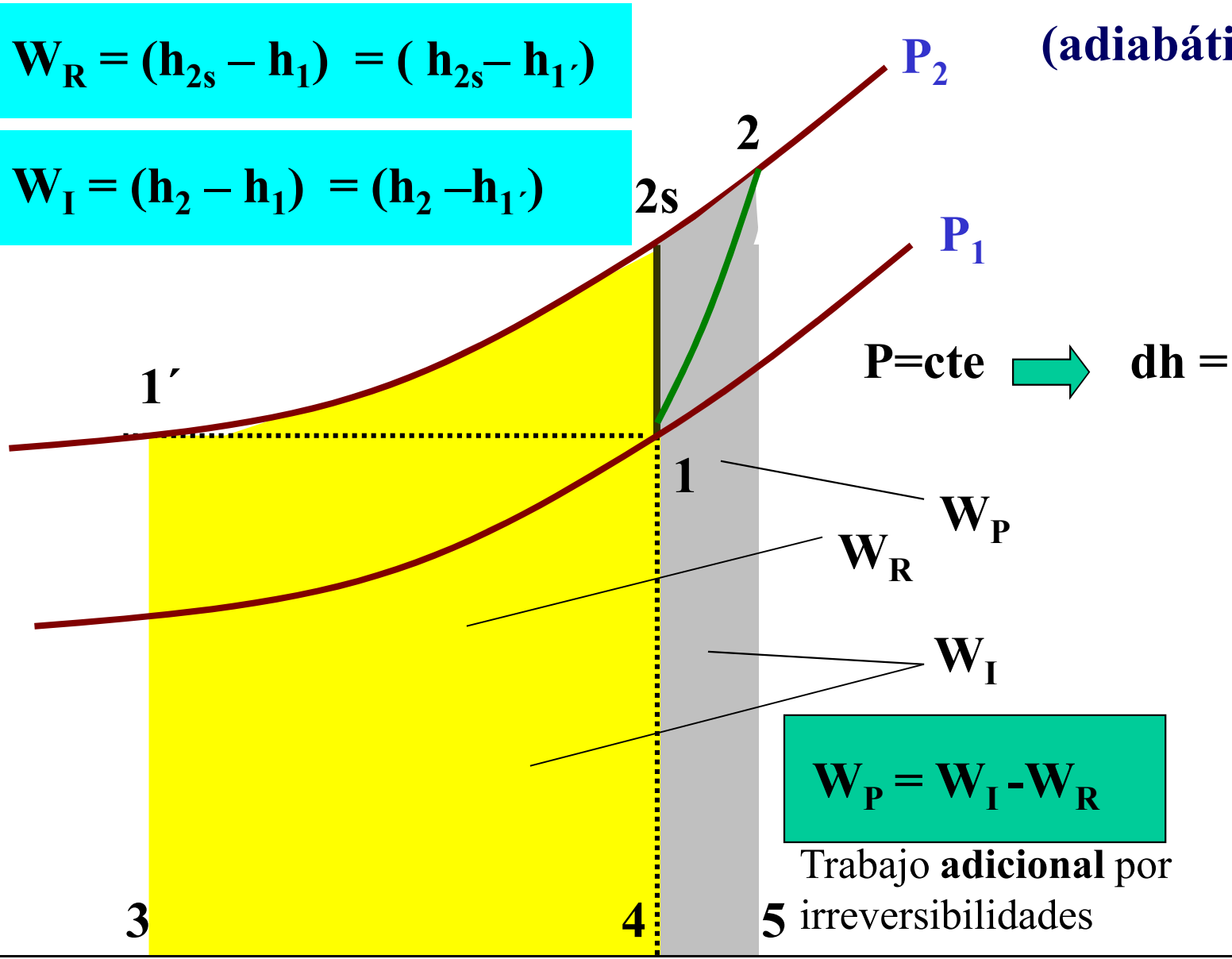
$$P = \text{cte} \rightarrow dh = TdS$$

$$W_P = W_I - W_R$$

Trabajo adicional por
5 irreversibilidades

T

Compresión



S

Ejemplo del uso del diagrama T-S

Cualquier sustancia

(isotermo y reversible)

(no adiabático)

$$-w_{12} = -q_{12} + (h_1 - h_2)$$

