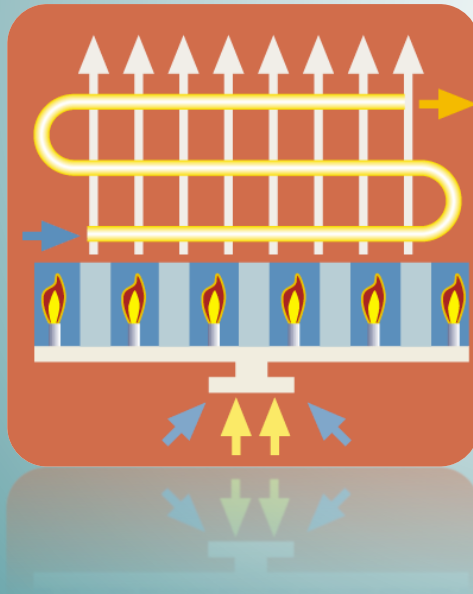


Termodinámica y Máquinas Térmicas

Tema 03. Segundo Principio de la Termodinámica



Inmaculada Fernández Diego
Severiano F. Pérez Remesal
Carlos J. Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)

- 1.- Segundo Principio en Procesos Cíclicos
- 2.- Segundo Principio en Procesos no Cíclicos
- 3.- Cálculo de Exergías
- 4.- Eficiencia de un Proceso Energético

1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (I)

S.P.T. es la degradación de la energía

El calor, Q , posee un parte de exergética, $Ex(Q)$, y otra de anergética $An(Q)$

$$Q = Ex(Q) + An(Q)$$

Cuando un sistema recibe calor, una parte es siempre anergía
(todo, si es el medio ambiente quien le recibe)

Toda la exergía de electricidad que se transforma en calor se destruye

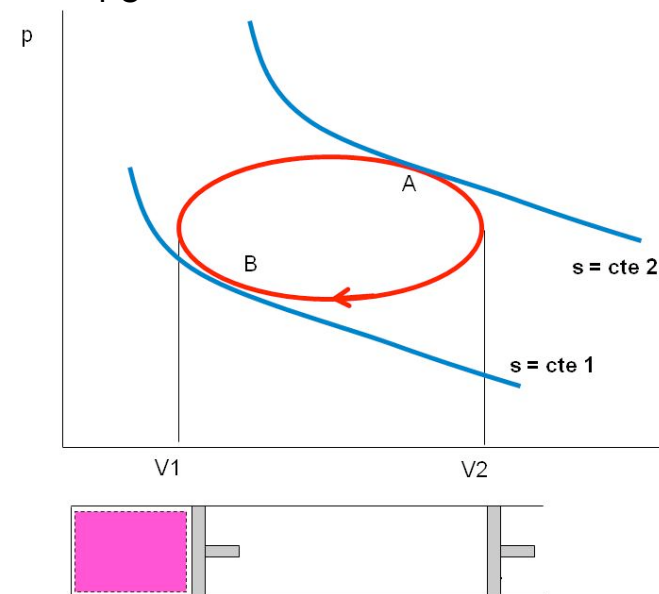
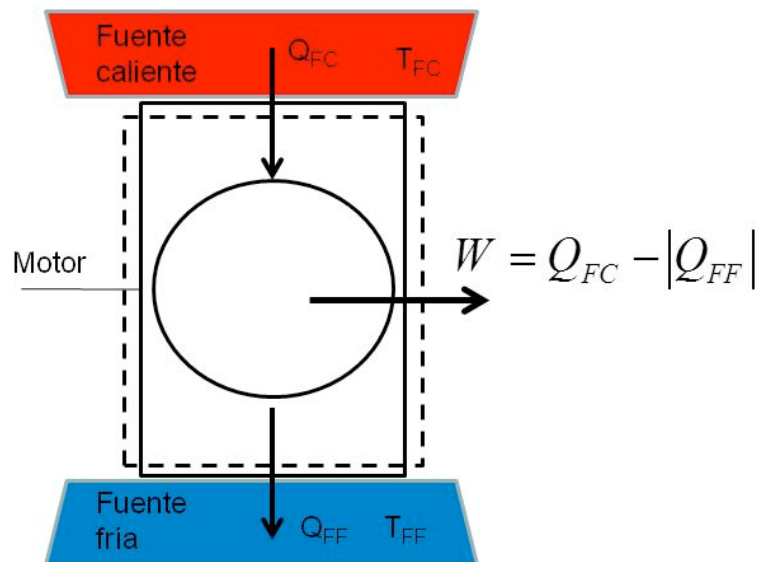
1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (II)

Un *Motor Térmico* (M.T.) transforma Q en W

Si fuera reversible separaría la $Ex(Q)$ de la $An(Q)$

El M.T. recibe Q_{FC} , de un foco caliente a $\uparrow T$ (T_{FC}), de la $Ex(Q)$ recibida extrae W

La $An(Q)$ recibida más An_{gen} (irreversibilidades) las cede en forma de calor, Q_{FF} a un foco frío a T_{FF} ($< T_{FC}$)



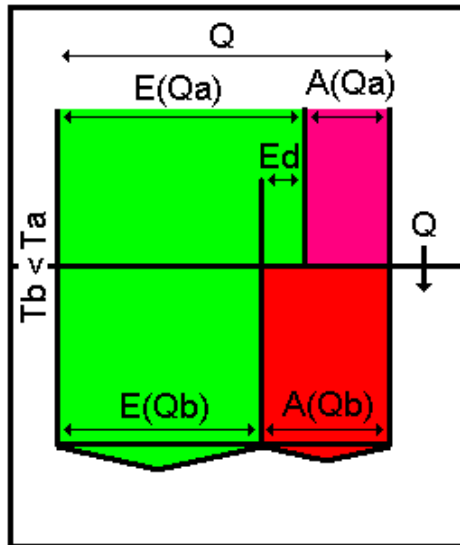
1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (III)

El *Rendimiento Térmico de un ciclo* es el cociente entre el trabajo teórico (área del ciclo) y el calor introducido

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{FC}}$$

$$\eta_t = \frac{Q_{FC} - |Q_{FF}|}{Q_{FC}} = 1 - \frac{|Q_{FF}|}{Q_{FC}}$$

$$W = Q_{FC} - |Q_{FF}|$$



Siempre que pasa calor de un sistema a otro a baja temperatura se produce una *Irreversibilidad Térmica*, se destruye exergía, Ex_D

$$Ex_D = |Ex(Q)_{FC}| - Ex(Q)_{FF} = An(Q)_{FF} - |An(Q)_{FC}|$$

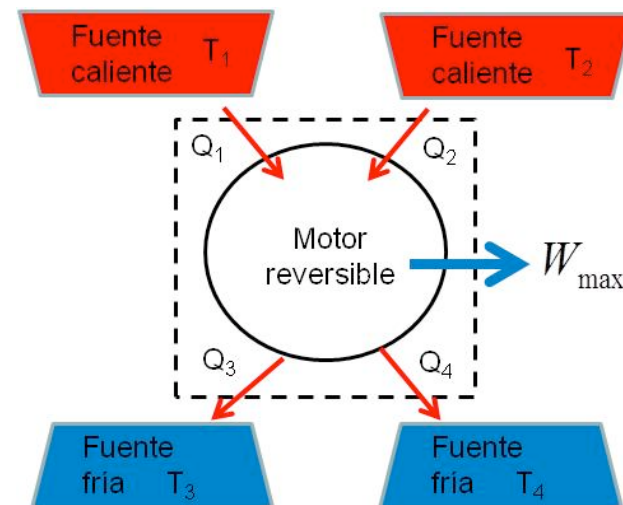
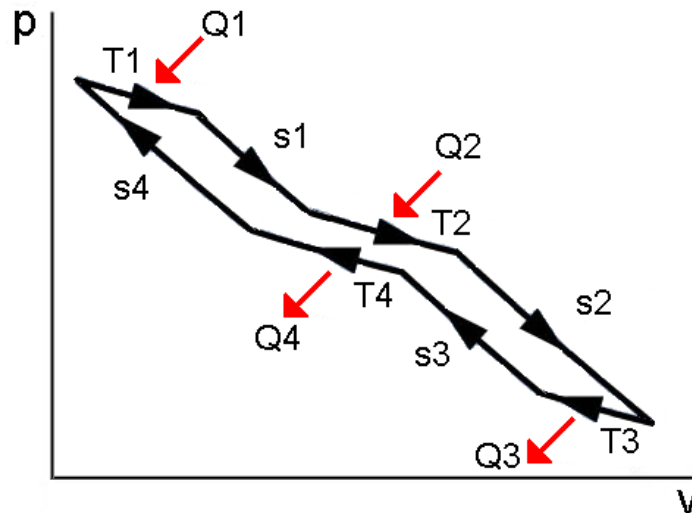
1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (IV)

Para que un M.T. sea reversible, ha de tener:

- reversibilidad interior ($W_r = 0$)
- exterior ($W_m = 0$)
- y reversibilidad térmica, ($Ex_D = 0$)

Requiere que:

- aportes y cesiones de calor se produzcan en isotermas
- que estas tengan la misma T que el foco que cede/recibe el calor
- que los estados entre isotermas sean a través de adiabáticas ($Q = W_r = 0$)



1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (V)

M.T. reversible $Ex(Q) \Rightarrow W$

Transf. adiabática
gas perfecto [T1]

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_1}{T_a} = \left(\frac{p_1}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_a} = \left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{p_1}{p_4} = \frac{p_2}{p_3}; \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_4}{p_3}$$

Isoterma gas
perfecto [T2]

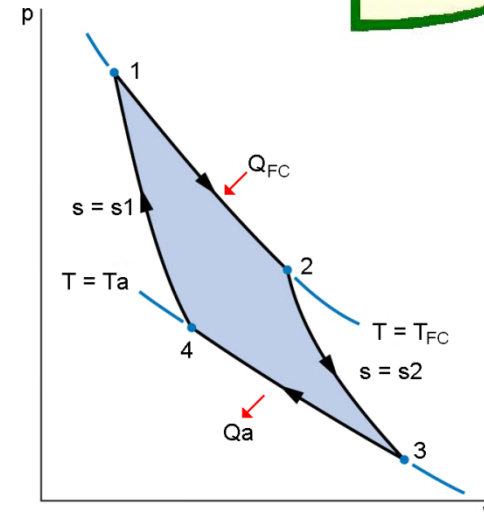
$$Q = R T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\frac{Q_{FC}}{T_{FC}} = R \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\frac{Q_a}{T_a} = R \ln \left(\frac{p_4}{p_3} \right)$$

$$\frac{Q_{FC}}{T_{FC}} = \frac{Q_a}{T_a}$$

$$\ln \left(\frac{A}{B} \right) = \ln A - \ln B = -(\ln B - \ln A) = -\ln \left(\frac{B}{A} \right)$$



1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (VI)

El **Contenido Exergético del Calor**, f_e , se puede evaluar como:

$$\left. \begin{aligned}
 \eta_t &= \frac{W}{Q_{FC}} \Rightarrow \eta_{t-\max} = \frac{W_{\max}}{Q_{FC}} \\
 \eta_t &= 1 - \frac{|Q_{FF}|}{Q_{FC}} \\
 \frac{Q_{FC}}{T_{FC}} &= \frac{Q_a}{T_a} \Rightarrow \frac{Q_{FC}}{Q_a} = \frac{T_{FC}}{T_a}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow W_{\max} = \text{Ex}(Q) = \eta_{t-\max} Q_1$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Ex}(Q) &= Q_{FC} \left(1 - \frac{|Q_a|}{Q_{FC}} \right) \\
 \text{Ex}(Q) &= Q_{FC} \left(1 - \frac{T_a}{T_{FC}} \right)
 \end{aligned} \right\}$$

$$f_e = \left(1 - \frac{T_a}{T_1} \right) \quad \uparrow T_{FC} \Rightarrow \uparrow \text{Ex}(Q)$$

$$\text{Calor} = \text{Ex}(Q) + \text{An}(Q)$$

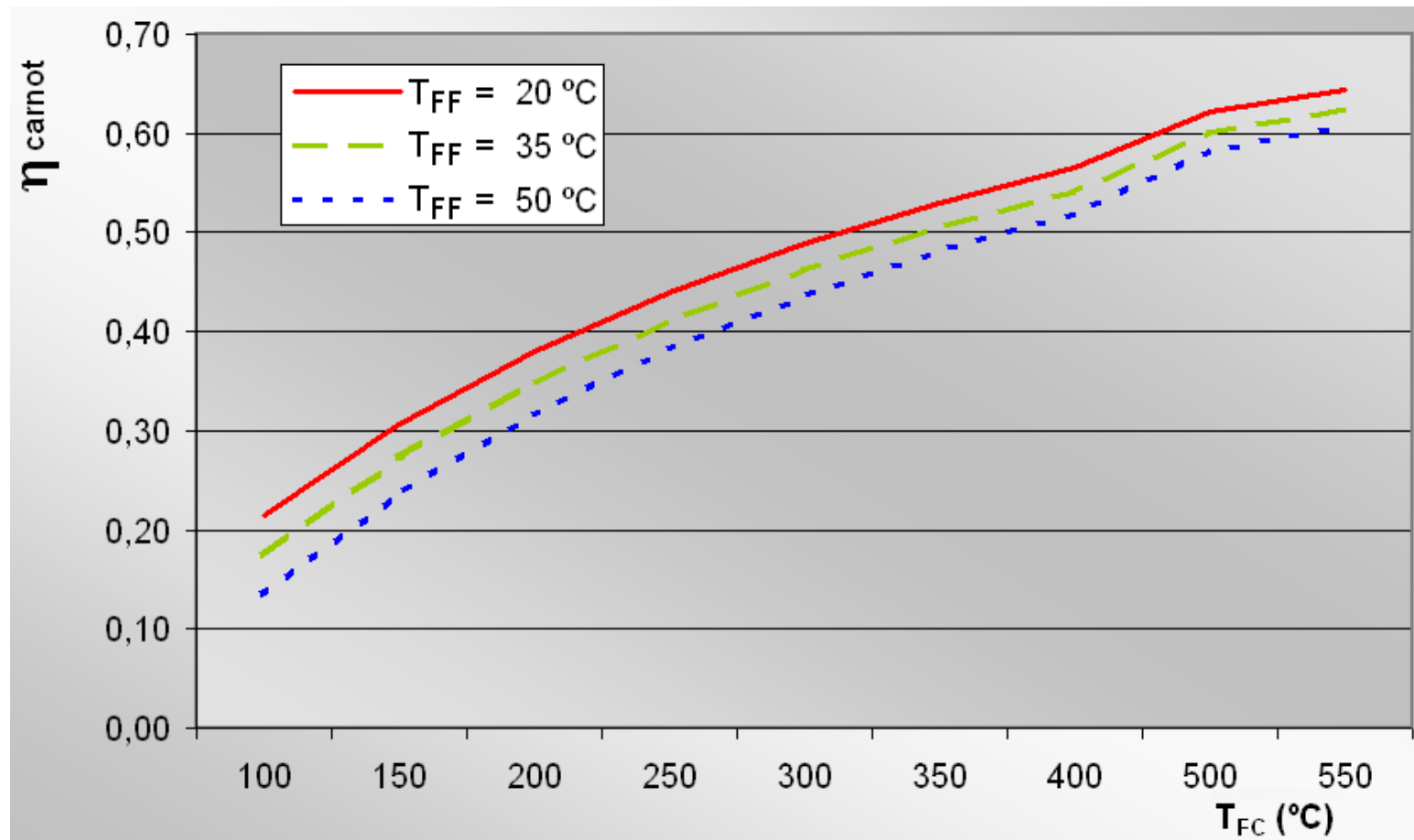
$$Q_{FC} = Q_{FC} \left(1 - \frac{T_a}{T_{FC}} \right) + Q_{FC} \frac{T_a}{T_{FC}}$$

Si la M.T. no funciona con el medio ambiente como foco frío, sino con otro a otra temperatura T_{FF} , se obtiene el **Rendimiento de Carnot** como:

$$\eta_t(\text{Carnot}) = \left(1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}} \right) \quad \begin{cases} \eta_{M.T} f(T_{FC} \text{ y } T_{FF}) \\ \eta_{M.T.} \leq \eta_{\text{Carnot}} \end{cases}$$

1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (VII)

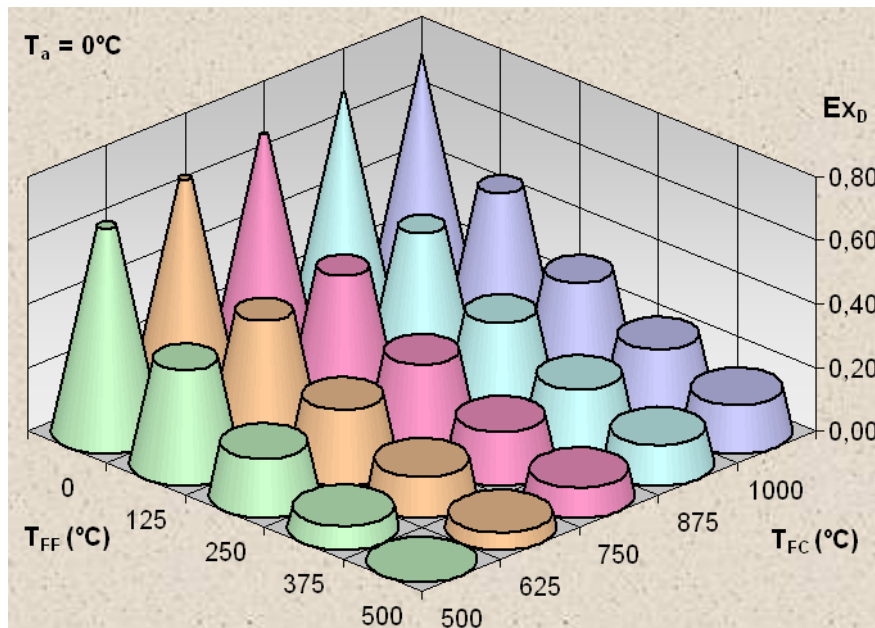
$$\eta_t(\text{Carnot}) = \left(1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}} \right)$$



2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (I)

La Ex_D en el paso de Q de un sistema a T_{FC} a otro a T_{FF} :

$$Ex(Q) = Q \left(1 - \frac{|Q_a|}{Q} \right) \quad \left. \begin{array}{l} An(Q)_{FC} = Q \frac{T_a}{T_{FC}} \\ An(Q)_{FF} = Q \frac{T_a}{T_{FF}} \end{array} \right\} Ex_D = An(Q)_{FF} - |An(Q)_{FC}| = \Delta An$$



$$Ex_D = Q \frac{T_a}{T_{FF}} - |Q| \frac{T_a}{T_{FC}}$$

$$Ex_D = Q T_a \frac{T_{FC} - T_{FF}}{T_{FC} T_{FF}}$$

$$Ex_D \uparrow \text{ al } \uparrow T_a$$

$$Ex_D \uparrow \text{ al } \uparrow (T_{FF} - T_{FC})$$

$$Ex_D \uparrow \text{ al } \downarrow (T_{FC} \cdot T_{FF})$$

2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (II)

Si las temperaturas de los sistemas son variables

$$Ex_D = T_a \left(\int \frac{dQ}{T_{FF}} - \int \frac{dQ}{T_{FC}} \right)$$

Las integrales sólo se pueden resolver si están definidas las transformaciones

Si sólo se conocen el estado inicial y final, hay que utilizar **la Entropía, S** [J / K]
Es una propiedad extensiva, s [J / (kg K)]

La **Entropía, S** es *una* magnitud que mide la parte de la energía que no se puede utilizar para producir trabajo

$$s = \int \frac{dQ}{T}$$

No depende de la transformación

Cualquier camino que una dos estados tiene la misma entropía

$$\Delta s_{1 \rightarrow 2} = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (III)

Cualquier transformación reversible ($W_r = 0$) en un gas perfecto, si c_p y c_v ctes:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta s_{1 \rightarrow 2} = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \\ [T2] \quad dQ + |dW_r| = dh - v dp \end{array} \right\} \quad s_2 - s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta s_{1 \rightarrow 2} = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \\ [T2] \quad dQ + |dW_r| = du + p dv \end{array} \right\} \quad s_2 - s_1 = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (IV)

La exergía destruida, Ex_D , ha de ser igual al incremento de anergía, ΔAn , o lo que es lo mismo, a la anergía generada, An_G :

$$Ex_D = \Delta An = An_G$$

Y se puede calcular en función de entropía, s , como

$$Ex_D = T_a \left(\int \frac{dQ}{T_2} - \int \frac{dQ}{T_1} \right) = \left| S = \int \frac{dQ}{T} \right| = T_a (S_2 - S_1) = T_a \Delta S = T_a S_G$$

$$Ex_D = An_G = T_a S_g$$

2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (V)

En un sistema adiabático S no puede disminuir, sólo aumentar si se genera una irreversibilidad

$$\Rightarrow Ex_D = An_G = T_a S_g \Rightarrow \Delta s$$

En las transformaciones adiabáticas $Q = W_r = 0$, la S no cambia

$$\text{Adiabática} = \text{Isoentrópica} (s = \text{cte})$$

En un sistema:

- S disminuye si cede calor (traspasa An y ésta disminuye)
- S aumentar cuando recibe calor (recibe An)
- S aumenta cuando se produce en su interior por una irreversibilidad

$$\Leftarrow \text{Calor} = Ex(Q) + An(Q)$$

2.- S^{do} Princ. en Procesos no Cíclicos (VI)

El P.P.T. se puede expresar en función de s , cuya variación depende del calor tomado o cedido y del trabajo de rozamiento

$$s = \int \frac{dQ}{T} \Rightarrow ds = \frac{dQ + |dW_r|}{T} \Rightarrow T ds = dQ + |dW_r| \Rightarrow dQ + |dW_r| = \int_1^2 T ds$$

$$dQ + |dW_r| = du + p dv$$

[T2]

$$dQ + |dW_r| = dh - v dp$$

$$T ds = du + p dv \quad ; \quad \int_1^2 T ds = u_2 - u_1 + \int_1^2 p dv$$

$$T ds = dh - v dp \quad ; \quad \int_1^2 T ds = h_2 - h_1 - \int_1^2 v dp$$

3.- Cálculo de Exergías (I)

El desequilibrio de un sistema respecto del medio ambiente puede ser térmico (temperatura), mecánico (presión), o químico

El trabajo máximo que se puede obtener de un sistema es su exergía, que en un sistema cerrado siempre es positiva

El contenido exergético del calor es:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Calor} = \text{Ex}(Q) + \text{An}(Q) \\ \text{An} = T_a S \end{array} \right\} \quad \text{Ex}(Q) = Q - T_a (S_2 - S_1)$$

La exergía, ex_u , o el trabajo útil que se puede obtener de un sistema es:

$$ex_u = (u - u_a) - T_a (s - s_a) - p_a (v_a - v)$$

$\Delta u \qquad -A(Q) \qquad -W \text{ vencer } p_a$

El contenido exergético de la entalpía es:

$$ex_u = (h - h_a) - T_a (s - s_a)$$

$\Delta h \qquad -A(Q)$

3.- Cálculo de Exergías (II)

Estado muerto

H es un valor de referencia, la más usual en Termodinámica es a 20°C y 1 bar

En ocasiones, como en psicrometría, se suele referenciar a 0°C y 1 bar

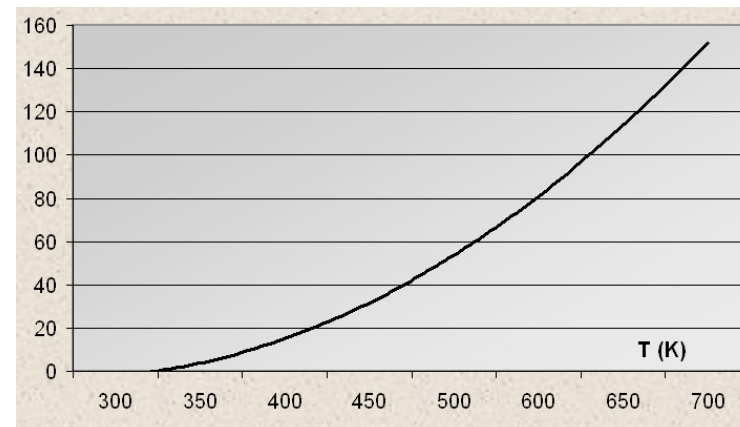
$$\left. \begin{aligned} ex_u &= (h - h_a) - T_a (s - s_a) \\ c_p &= \left[\frac{dh}{dT} \right]_p = c_p(p, T) \\ s_2 - s_1 &= c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \end{aligned} \right\}$$

$$ex_u = c_p(T - T_a) - T_a c_p \ln\left(\frac{T}{T_a}\right) + T_a R \ln\left(\frac{p}{p_a}\right)$$

Ex ↑ con T y p

[T2] Ley Joule: En los gases perfectos
Si $T_1 = T_2 \Rightarrow u_1 = u_2$ y $h_1 = h_2$

$$X = (T - 300) - 300 \ln\left(\frac{T}{300}\right) \Rightarrow$$



4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (I)

La parte útil de la energía es la exergía, la anergía no es útil
El análisis energético de los procesos permite optimizarlos

El **Rendimiento Exergético**, ψ , es el cociente entre la exergía contenida en la utilidad deseada del equipo analizado, P , y la exergía empleada para conseguirlo, F

$$\psi = \frac{P}{F} = \frac{F - Ex_D}{F} = 1 - \frac{Ex_D}{F}$$

Hay que definir P y F , por ejemplo, los humos de escape de una chimenea pueden tener algún contenido energético que no sea aprovechable

Para equipos de un solo flujo se define como el cociente entre la exergía saliente, Ex_s y la entrante, Ex_e

$$\psi = \frac{Ex_s}{Ex_e}$$

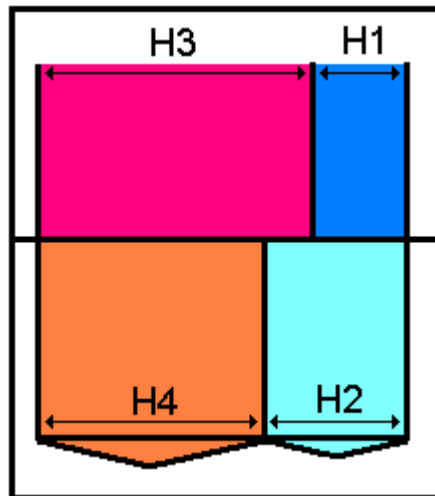
El **Coste Exergético** es la inversa de ψ
El unitario, k se define:

$$k = \frac{1}{\psi} = \frac{F}{P} = \frac{F}{F - Ex_D}$$

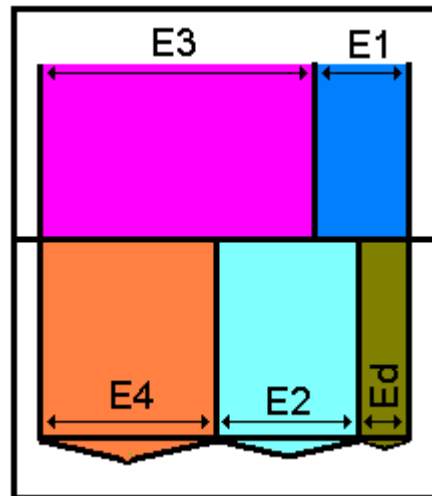
4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (II)

Los **Diagramas de Flujo** ofrecen una visión gráfica de los balances energéticos y exergéticos

–Para un intercambiador de calor:



Energético

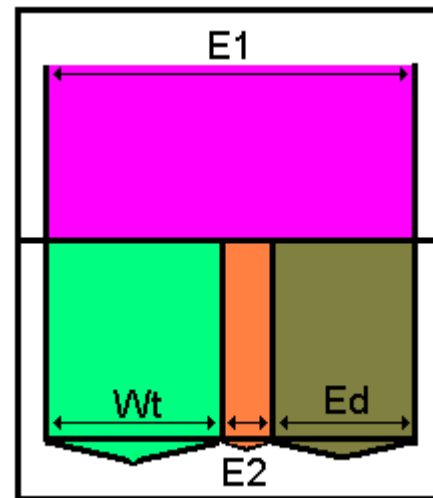
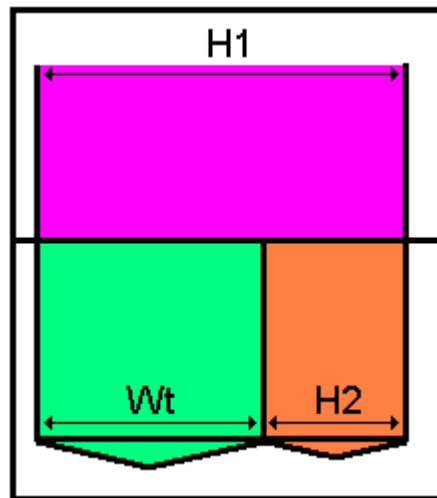


Exergético

$$\psi = \frac{P}{F} = \frac{Ex_2 - Ex_1}{Ex_3 - Ex_4}$$

4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (III)

–Para una turbina
de gas o vapor:



$$\psi = \frac{P}{F} = \frac{W}{Ex_1 - Ex_2}$$

En una central térmica hay multitud de equipos
El análisis puede tener en cuenta un único elemento, varios, o el conjunto