

TD. T3.- Segundo Principio de la Termodinámica

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

TD. T3.- Segundo Principio de la Termodinámica

Objetivos:

En este tema se presenta el Segundo Principio de la Termodinámica: degradación de la energía, tanto en los procesos cíclicos como en los no cíclicos. Se introducen los conceptos de Entropía, Exergía y el Análisis Exergético. Todo ello está encaminado a determinar la eficiencia, o ineficiencia, de un proceso

2

- 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 anergía

(todo, si es el medio ambiente quien le recibe)

Toda la exergía de electricidad que se transforma en calor a T_a se destruye $\Rightarrow An$

3

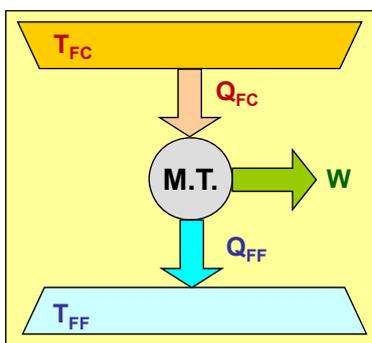
1.- S^{do} Princ. en Procesos Cíclicos (II)

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} ($< T_{FC}$)

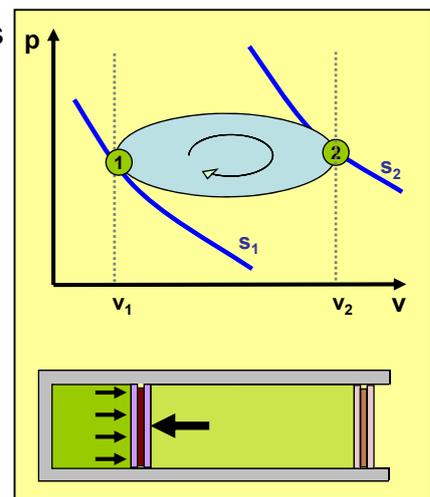


$$Q_{FC} = Ex(Q_{FC}) + An(Q_{FC})$$

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

$$Q_{FF} = Ex(Q_{FF}) + An(Q_{FF}) = Ex(Q_{FF}) + [An(Q_{FC}) + An_{Gen}]$$

$$\text{Si } T_{FF} = T_a \Rightarrow Q_{FF} = An(Q_{FF})$$



1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (III)

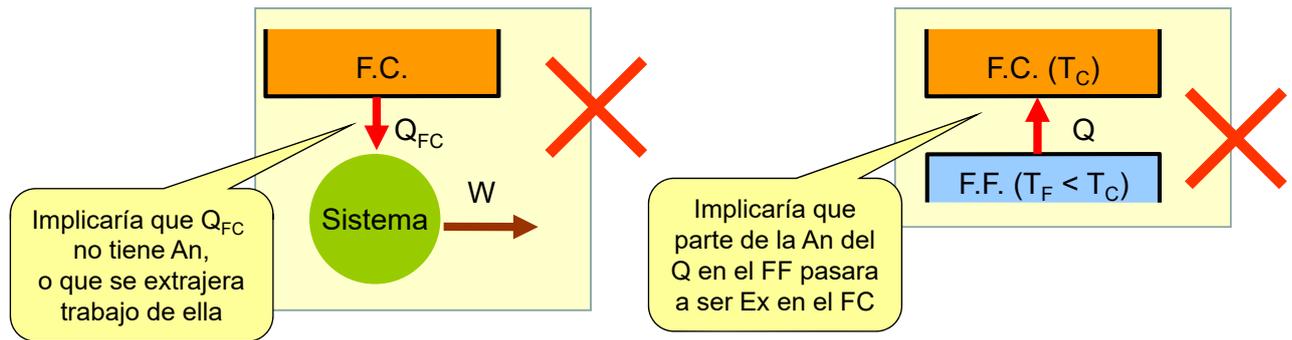
Otros enunciados del S.P.T.

Kelvin Plank

Es imposible producir un trabajo neto con un motor térmico, en un ciclo completo, intercambiando calor solamente, con un cuerpo a una temperatura fija

Clausius

Es imposible construir una máquina, que funcionando con un ciclo, no produzca otro efecto, que transferir calor desde un cuerpo a otro de mayor temperatura



1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (IV)

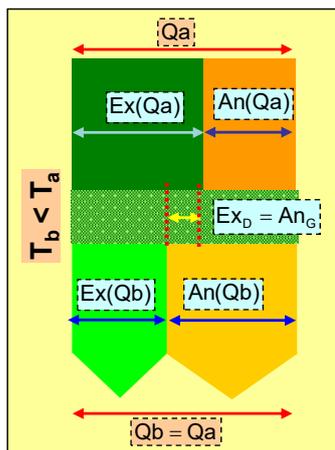
El **Rendimiento Térmico de un ciclo** es el cociente entre el trabajo teórico (área del ciclo) y el calor introducido

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

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

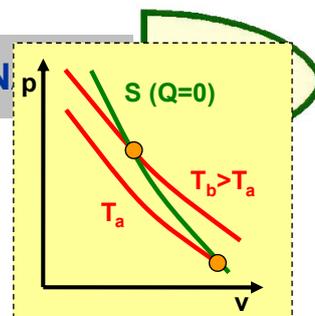
$$W = Q_{FC} - |Q_{FF}|$$

$$\eta_t \leq 1$$



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

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



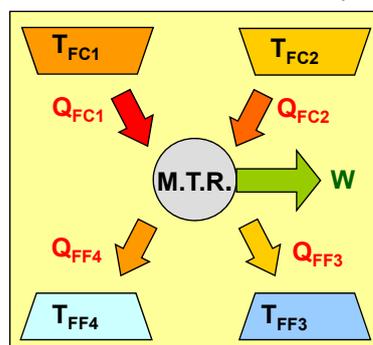
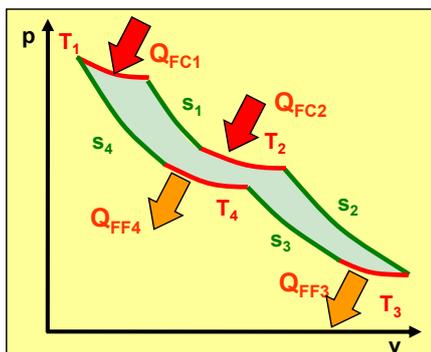
1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (V)

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 funciones con procesos cuasiestáticos y éstos sean:

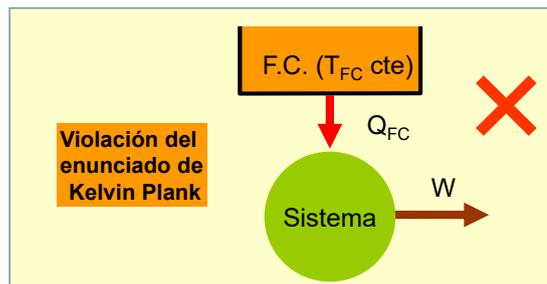
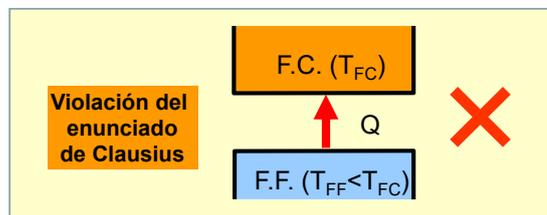
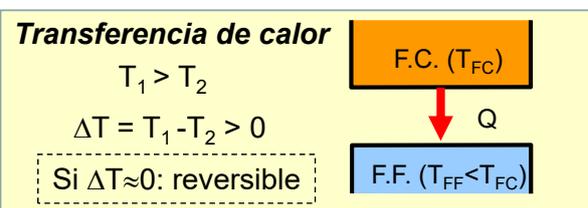
- aportes y cesiones de calor se produzcan en isotermas
- que estas tengan la misma T^a que el foco que cede/recibe el calor
- que los estados entre isotermas sean a través de adiabáticas ($Q = W_r = 0$)



1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (VI)

Son PROCESOS IREVERSIBLES

¿Es posible la inversión del Proceso?



Proceso no cuasiestático

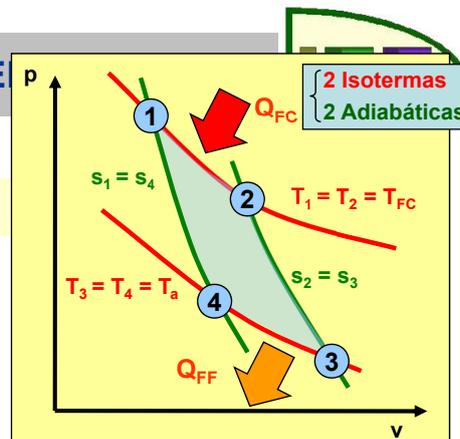
Imposible reproducir los estados del proceso, ya que no están definidos

1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (VII)

Ciclo de Carnot

2 Isotermas y 2 Adiabáticas (Isoentrópicas)

Isotermas (T = cte), 1-2 y 3-4



[T2] $q = w = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{v_b}{v_a}\right) = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_a}{p_b}\right)$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{FC} = q_{12} = w_{12} = R \cdot T_{FC} \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \\ q_{FF} = q_{34} = w_{34} = R \cdot T_{FF} \cdot \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right) < 0, \text{cedido} \Rightarrow \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right) < 0 \end{array} \right.$$

Adiabáticas (s = cte), 2-3 y 4-1

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

[T1] $\frac{T_b}{T_a} = \left(\frac{v_a}{v_b}\right)^{\gamma-1}$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{FC} \cdot v_2^{\gamma-1} = T_{FF} \cdot v_3^{\gamma-1} \\ T_{FC} \cdot v_1^{\gamma-1} = T_{FF} \cdot v_4^{\gamma-1} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4} \Rightarrow \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \ln\left(\frac{v_3}{v_4}\right)$$

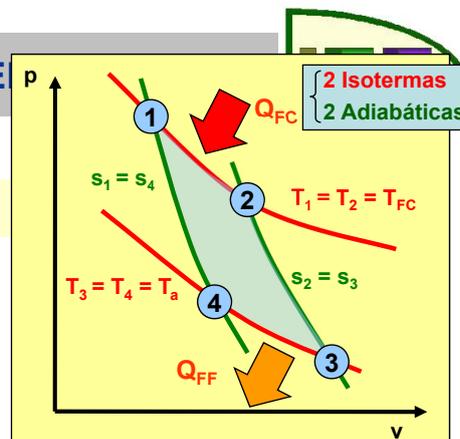
1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (VIII)

Ciclo de Carnot

2 Isotermas y 2 Adiabáticas (Isoentrópicas)

Rendimiento de Carnot

Un motor térmico logrará un rendimiento máximo si funciona entre dos niveles de temperatura con un ciclo reversible



Cambio de orden en el cociente por el signo negativo

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

$$\eta = \frac{W}{Q_{FC}} = \frac{Q_{FC} - |Q_{FF}|}{Q_{FC}} = 1 - \frac{|Q_{FF}|}{Q_{FC}} = 1 - \frac{T_{FF} \cdot \ln\left(\frac{v_3}{v_4}\right)}{T_{FC} \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

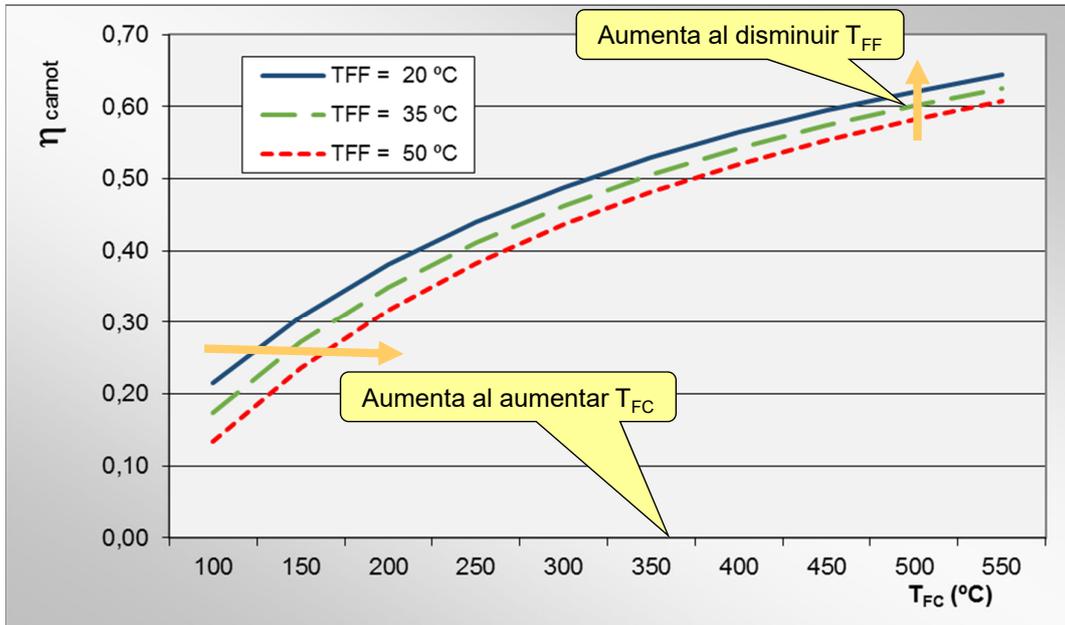
$q_{FC} = R \cdot T_{FC} \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$
 $q_{FF} = R \cdot T_{FF} \cdot \ln\left(\frac{v_4}{v_3}\right) < 0$
 $\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \ln\left(\frac{v_3}{v_4}\right)$

$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$ en K

1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (IX)

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

Tas en K

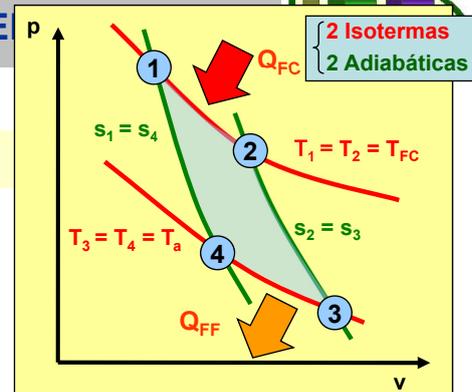


11

1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (X)

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

Si el F.F. es el ambiente (T_a, p_a):



Transf. adiabática
gas perfecto [T1]

•1-4 $\frac{T_1}{T_4} = \frac{T_1}{T_a} = \left(\frac{p_1}{p_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

$$\frac{T_a}{T_b} = \left(\frac{p_a}{p_b}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

•2-3 $\frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_a} = \left(\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

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

Isoterma gas
perfecto [T2]

$$q = R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_a}{p_b}\right)$$

•1-2 $\frac{q_{FC}}{T_{FC}} = R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$

•4-3 $\frac{q_a}{T_a} = R \cdot \ln\left(\frac{p_4}{p_3}\right)$

$$\frac{q_{FC}}{T_{FC}} = \frac{q_a}{T_a}$$

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

12

1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (XI)

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

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{FC}} \Rightarrow \eta_{t-max} = \frac{W_{max}}{Q_{FC}} \Rightarrow W_{max} = Ex(Q) = Q_{FC} \cdot \eta_{t-max}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{|Q_{FF}|}{Q_{FC}} \quad \eta_{t-max} \Rightarrow Q_{FF} = Q_a \rightarrow Ex(Q) = Q_{FC} \cdot \left(1 - \frac{|Q_a|}{Q_{FC}}\right)$$

$$\frac{Q_{FC}}{T_{FC}} = \frac{Q_a}{T_a} \Rightarrow \frac{Q_{FC}}{Q_a} = \frac{T_{FC}}{T_a} \rightarrow Ex(Q) = Q_{FC} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{FC}}\right)$$

$$f_e = \left(1 - \frac{T_a}{T_{FC}}\right) \left\{ \begin{array}{l} T_{FC} \Rightarrow Ex(Q) \\ \downarrow T_a \Rightarrow Ex(Q) \end{array} \right.$$

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

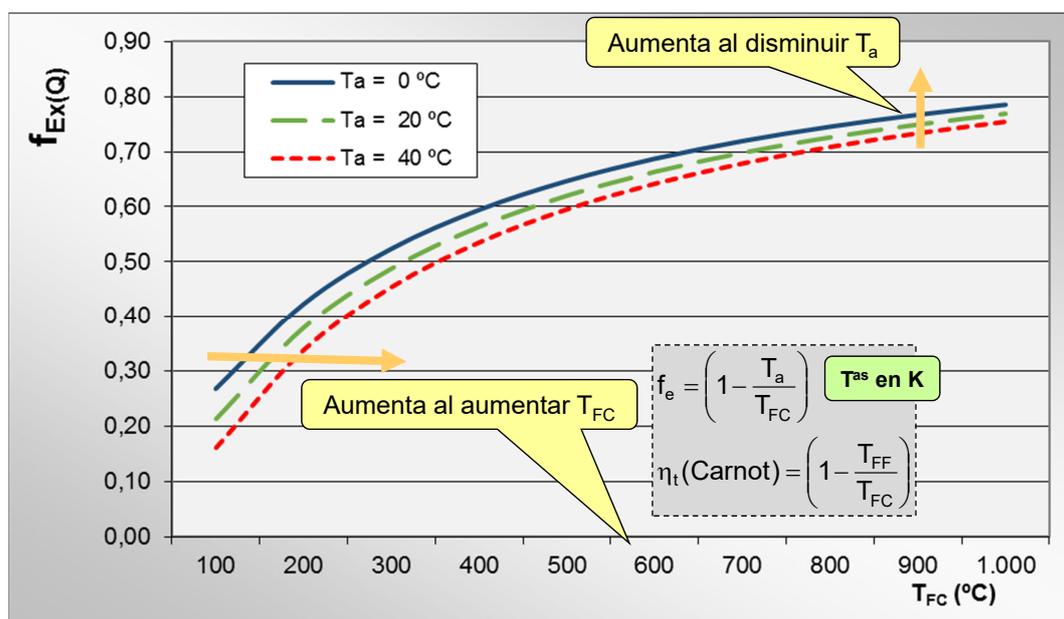
$$Q_{FC} = Q_{FC} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_{FC}}\right) + Q_{FC} \cdot \frac{T_a}{T_{FC}}$$

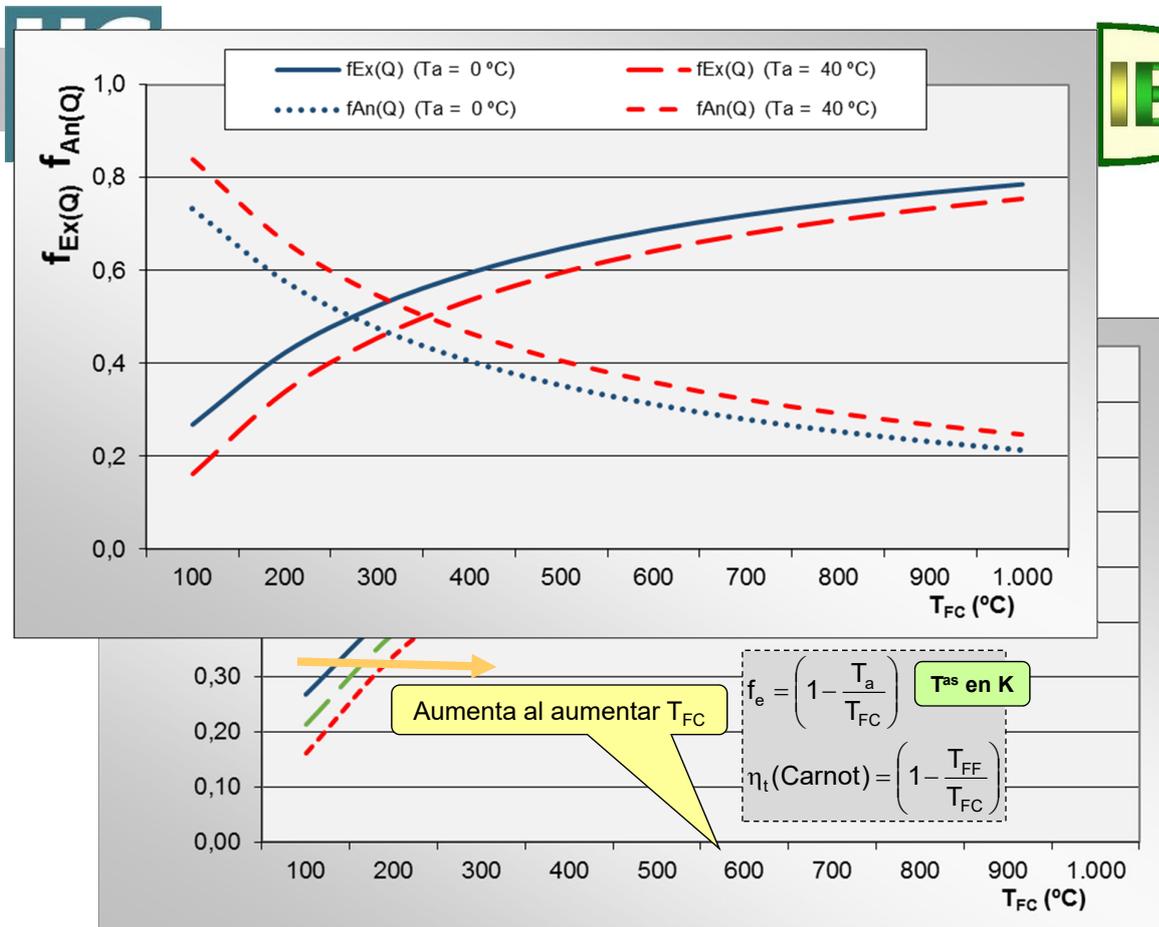
Si la M.T. no funciona con el medio ambiente como foco frío, sino con otro a otra temperatura T_{FF} , se obtiene el **Rendimiento de Carnot** como:

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

Recordar que las T^as se expresan en K

1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (XII)





1.- Sdo Princ. en Procesos Cíclicos (XIII)

$$\eta_t(\text{Carnot}) = \left(1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}\right) \quad T^{\text{as}} \text{ en K}$$

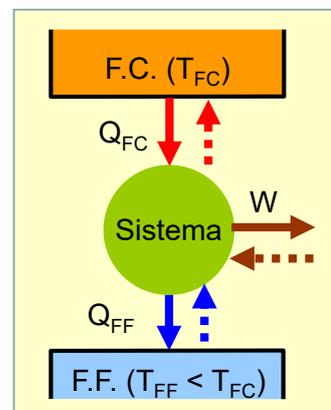
Para que un **motor térmico sea reversible** tiene que trabajar con el ciclo de **Carnot**

$$\eta = \frac{W}{Q_{FC}} = \frac{Q_{FC} - Q_{FF}}{Q_{FC}} = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} = \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} = \frac{T_{FF}}{T_{FC}} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

Funcionando como Maquina Frigorífica (reverso)

$$\eta = \frac{Q_{FF}}{W} = \frac{Q_{FF}}{Q_{FC} - Q_{FF}} = \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}} = \frac{T_{FF}}{T_{FC}} = \frac{Q_{FF}}{Q_{FF} \cdot \frac{T_{FC}}{T_{FF}} - Q_{FF}} = \frac{T_{FF}}{T_{FC} - T_{FF}}$$

$$\Rightarrow W = \frac{Q_{FF} \cdot (T_{FC} - T_{FF})}{T_{FF}} \Rightarrow \text{si } T_{FF} \rightarrow 0 \text{ K} \Rightarrow W \rightarrow \infty$$



El Cero absoluto no se puede conseguir



Calcular la Ex del calor al salir de un sistema cuya temperatura es de 750 K si el ambiente está a 300 K

Calcular la Ex del calor al salir de un sistema cuya temperatura es de 1.500 K si el ambiente está a 300 K



A costa de su u un sistema cerrado puede dar W y Q por separado o a la vez (también puede recibirlo); analizar que ocurre con la Ex y la An

Un motor térmico reversible en el que el fluido cede 80 kJ/min a una fuente fría a 27°C tiene un rendimiento del 60%. Calcular la temperatura del foco caliente y la potencia del motor

19

2.- Sdo Princ. en Procesos no Cíclicos (I)

La Ex_D en el paso de Q entre dos *sistemas isotermos* a T_{FC} y T_{FF} :

$$Ex(Q) = Q \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T}\right)$$

$$An(Q)_{FC} = Q \cdot \frac{T_a}{T_{FC}}$$

$$An(Q)_{FF} = Q \cdot \frac{T_a}{T_{FF}}$$

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

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

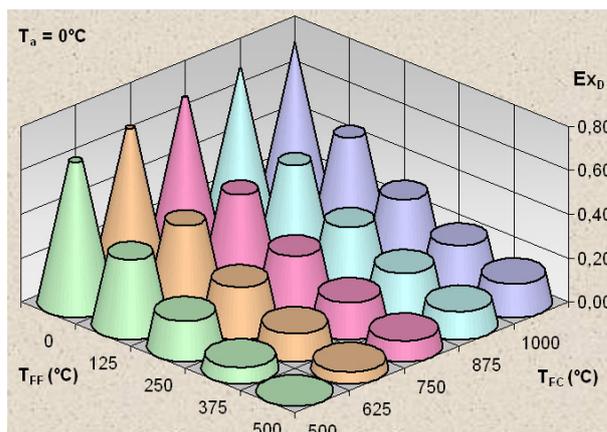
$$Ex_D = Q \cdot T_a \cdot \frac{T_{FC} - T_{FF}}{T_{FC} \cdot T_{FF}}$$

Recordar que:
T en K

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

$$Ex_D \uparrow \text{ al } \uparrow (T_{FC} - T_{FF}) \quad \left. \begin{array}{l} Ex_D \uparrow \text{ al } \uparrow T_{FC} \\ Ex_D \uparrow \text{ al } \downarrow T_{FF} \end{array} \right\}$$

$$Ex_D \uparrow \text{ al } \downarrow (T_{FC} \cdot T_{FF}) \quad \left. \begin{array}{l} Ex_D \uparrow \text{ al } \downarrow T_{FC} \\ Ex_D \uparrow \text{ al } \downarrow T_{FF} \end{array} \right\}$$



20

Isotermas

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

2.- Sdo Princ. en Procesos no Cíclicos (II)

Si las **temperaturas** de los sistemas son **variables**:

(Ej: Q en una isóbara)

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

Las integrales sólo se pueden resolver si son conocidas las transformaciones
(politrópica de exponente conocido)

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 y se expresa como el cociente entre el calor cedido y su temperatura (en K) ($\Delta S \Rightarrow EX_D$)

$$S = \int \frac{dQ}{T} \quad s = \int \frac{dq}{T}$$

No depende de la transformación

Cualquier camino que una dos estados tiene la misma entropía

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

21

2.- Sdo Princ. en Procesos no Cíclicos (IV)

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

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

$$[T2] \quad dq + |dw_r| = dh - v \cdot dp$$

$$s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

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

$$[T2] \quad dq + |dw_r| = du + p \cdot dv$$

$$s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

22

2.- Sdo Princ. en Procesos no Cíclicos (V)

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

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

$$Ex_D = An_G = T_a \cdot S_G$$

23

2.- Sdo Princ. en Procesos no Cíclicos (VI)

En un **sistema adiabático** ($Q = 0$) S no puede disminuir, sólo aumentar si se genera una irreversibilidad (W_r)

$$\Rightarrow Ex_D = An_G = T_a \cdot S_G \Rightarrow \Delta S$$

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

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

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

En un sistema:

- S disminuye si cede calor (traspasa An y ésta disminuye)
 - S aumenta cuando recibe calor (recibe An)
 - S aumenta cuando se produce en su interior por una irreversibilidad
- } $\Leftarrow \text{Calor} = Ex(Q) + An(Q)$

24

2.- Sdo 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

$$s = \int \frac{dq}{T} \Rightarrow ds = \frac{dq + |dw_r|}{T} \Rightarrow T \cdot ds = dq + |dw_r| \Rightarrow q + |w_r| = \int_1^2 T \cdot ds$$

$$dq + |dw_r| = du + p \cdot dv$$

[T2]

$$dq + |dw_r| = dh - v \cdot dp$$

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

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

$$Ex_D = An_G = T_a \cdot S_G$$

Hallar la Ex del Q y la Ex_D en un intercambio térmico cuando $T_a = 300$ K

a) cuando $T_{FC} = 700$ K y $T_{FF} = 600$ K

b) cuando $T_{FC} = 400$ K y $T_{FF} = 300$ K

Hallar la Ex_D cuando $T_a = 300\text{ K}$ y recibe W_r un sistema cuya T es de:

- a) $T_s = 1.000\text{ K}$
- b) $T_s = 600\text{ K}$
- c) $T_s = 300\text{ K}$

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 ($Ex \geq 0$)

El **contenido exergético del calor** que pasa de un sistema, 1, a otro, 2, es:

$$\left. \begin{aligned} \text{Calor} &= Ex(Q) + An(Q) \\ An &= T_a \cdot S \end{aligned} \right\} Ex(Q) = Q - T_a \cdot (S_2 - S_1)$$

3.- Cálculo de Exergías (II)

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

$$ex_u = \underbrace{(u - u_a)}_{\Delta u} - T_a \cdot \underbrace{(s - s_a)}_{-A(Q)} - p_a \cdot \underbrace{(v_a - v)}_{-W \text{ vencer } p_a}$$

[T2] $h = u + p \cdot v \left[\frac{J}{kg} \right]$

El contenido exergético de la entalpía

$$ex_h = \underbrace{(h - h_a)}_{\Delta h} - T_a \cdot \underbrace{(s - s_a)}_{-A(Q)}$$

Sólo una parte de la h es exergía

Al circular un fluido por una máquina térmica no se puede convertir toda su entalpía en trabajo

[T2] Energía de un flujo : $\varepsilon = h + \frac{c^2}{2}$

$ex_f = ex_h + \frac{c^2}{2}$ **La energía cinética es exergía**

3.- Cálculo de Exergías (III)

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

$$ex_h = (h - h_a) - T_a \cdot (s - s_a)$$

$$c_p = \left[\frac{dh}{dT} \right]_p = c_p(p, T)$$

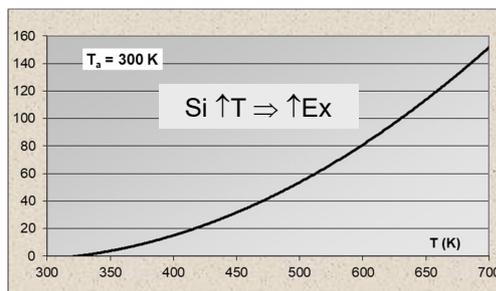
$$s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

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

$Ex \uparrow$ con T y p

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

$$X = \underbrace{(T - 300)}_{\uparrow \text{ con } T} - 300 \cdot \underbrace{\ln\left(\frac{T}{300}\right)}_{\downarrow \text{ con } T} \Rightarrow$$



Cuanta capacidad de realizar trabajo útil se pierde en el condensador de un central al que entra vapor de agua con un título del 85% y 5 kPa y sale agua a igual presión

		Vol. específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		m ³ / kg		kJ / kg		kJ / kg			kJ / kg K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	L-Vapor	Vapor	Líquido	Vapor
Temp,	Presión	sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
°C	bar	v _f x 10 ³	v _g	u _f	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927
Presión	Temp,	sat,	sat,	sat,	sat,	sat,	vaporiz,	sat,	sat,	sat,
bar	°C	v _f x 10 ³	v _g	u _f	u _g	h _f	h _{fg}	h _g	s _f	s _g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304

$$5 \text{ kPa} = 5.000 \text{ Pa} = 0,05 \text{ bar}$$

31

Suponiendo que las capacidades caloríficas no varían con la temperatura, calcular para qué presiones la exergía entálpica de un flujo de aire resulta negativa, cuando la temperatura del mismo sea de:

a) $T = T_a = 20 \text{ °C}$

b) $T = 400 \text{ °C}$

32

4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (I)

La parte útil de la energía para generar W es la exergía, la anergía no es útil
El análisis exergético 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:

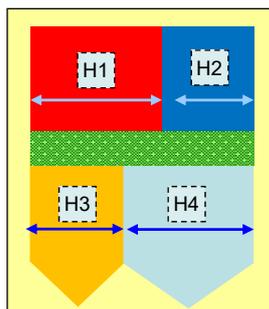
$$k = \frac{1}{\psi} = \frac{F}{P} = \frac{F}{F - Ex_D}$$

33

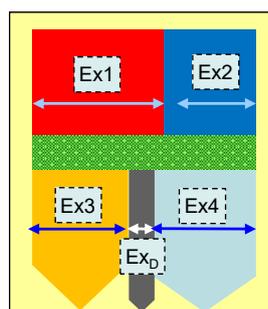
4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (II)

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

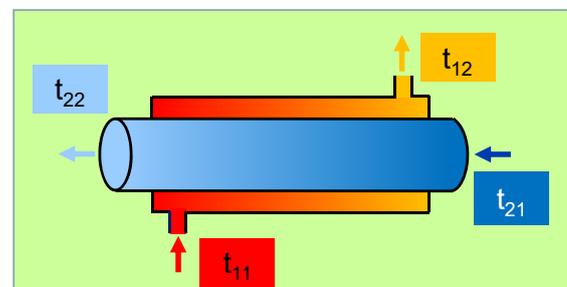
–Para un intercambiador de calor:



Energético



Exergético

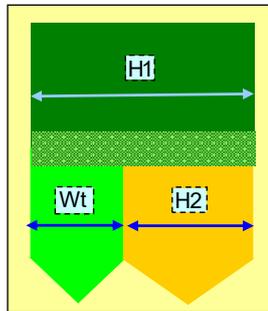


$$\psi = \frac{P}{F} = \frac{Ex_3 + Ex_4}{Ex_1 + Ex_2}$$

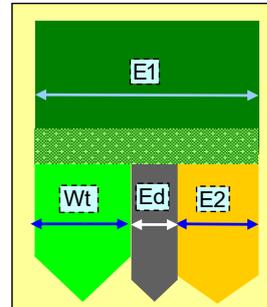
34

4.- Eficiencia de un Proceso Exergético (III)

–Para una turbina de gas o vapor:



Energético



Exergético

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

En una central térmica hay multitud de equipos

El análisis puede tener en cuenta un único elemento, varios, o el conjunto

35

En un intercambiador de calor entra aire a 600 K y sale a 850 K. El otro flujo es gas que entra a 1.000 K. Las corrientes son de 90 kg/s, las presiones de entrada de 1 bar, y no hay caída de presión en el intercambiador. Suponiendo nulas las pérdidas térmicas, las propiedades del aire, y el estado muerto a 300 K y 1 bar, calcular:

a) T_{salida} de los gases

b) Variación de exergía en cada flujo

c) La Ex_D por unidad de tiempo

36

