

CICLOS TERMODINAMICOS

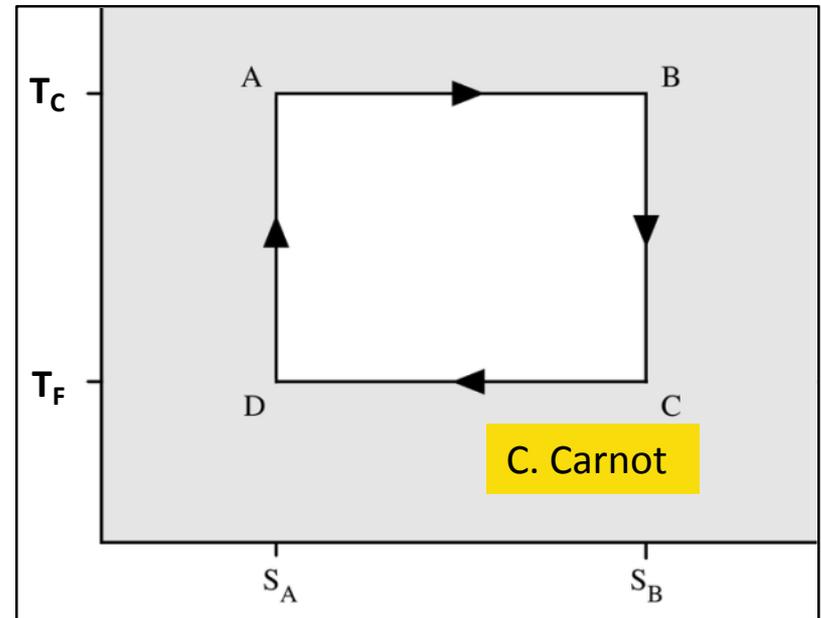
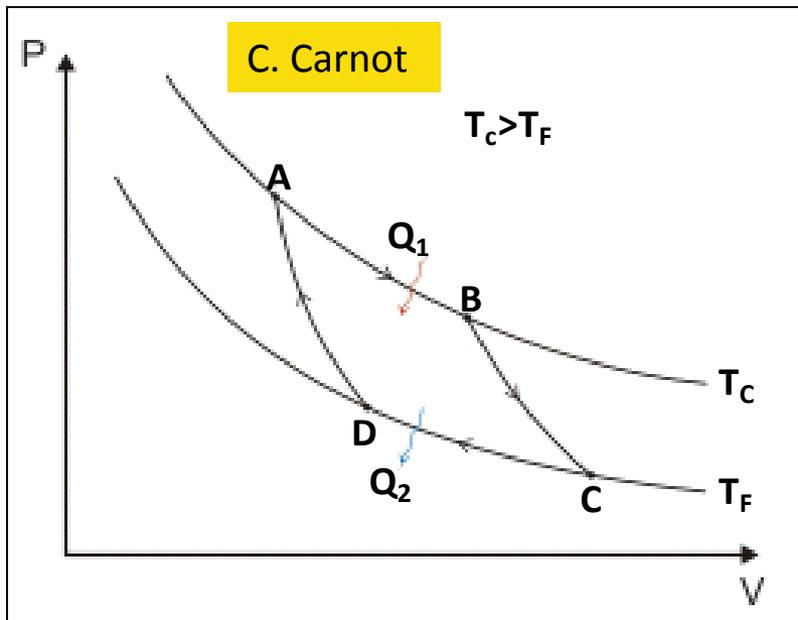
2011-2012

CICLO TERMODINÁMICO

Es un proceso o conjuntos de procesos por los que un sistema evoluciona volviendo al mismo estado inicial.

Para todo ciclo se cumple que: $\Delta U = 0$; $Q = W$

Ciclo reversible: (todos los estados son de equilibrio). Puede representarse en diagramas PV , TS,

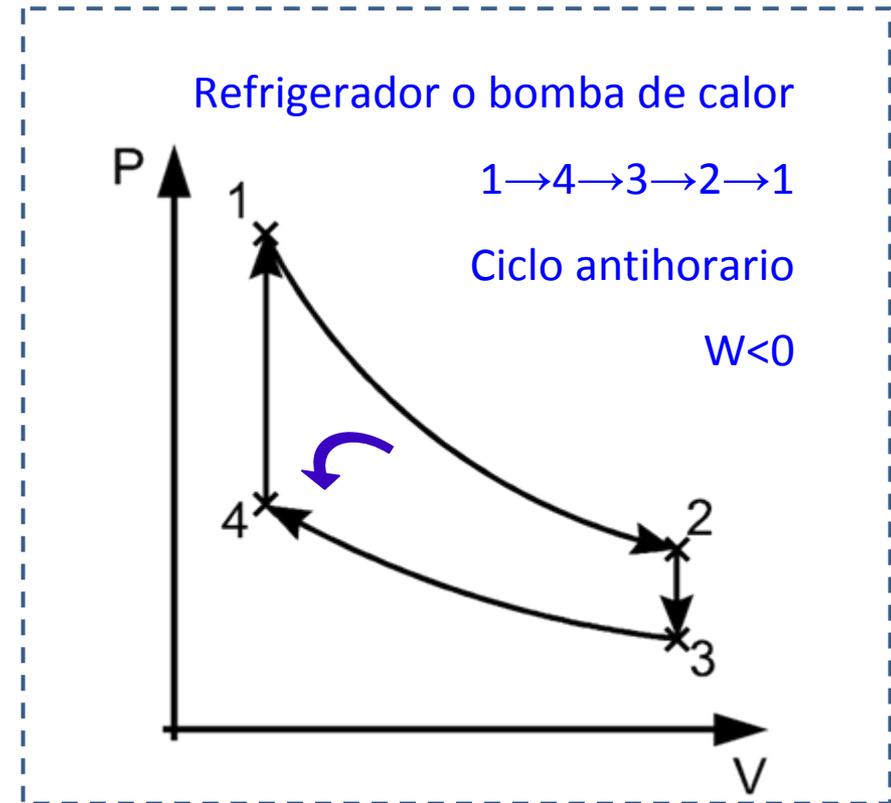
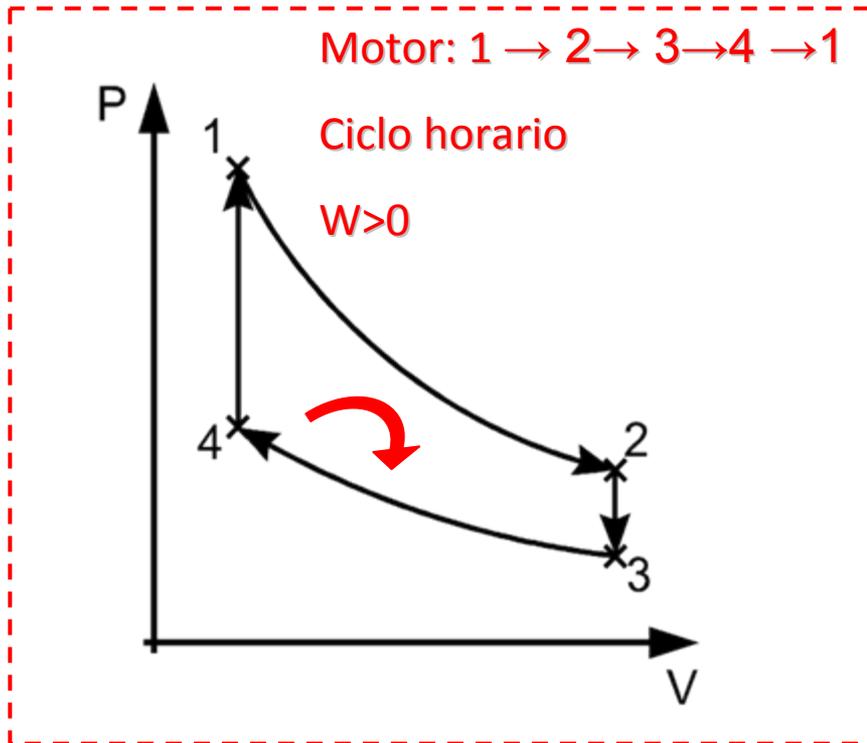


El área dentro del ciclo en un diagrama PV representa el trabajo y en un diagrama TS el calor

Los ciclos termodinámicos permiten:

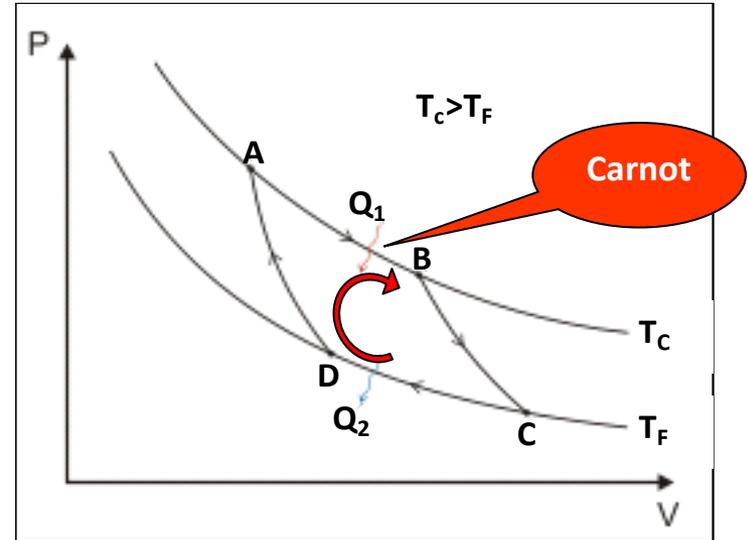
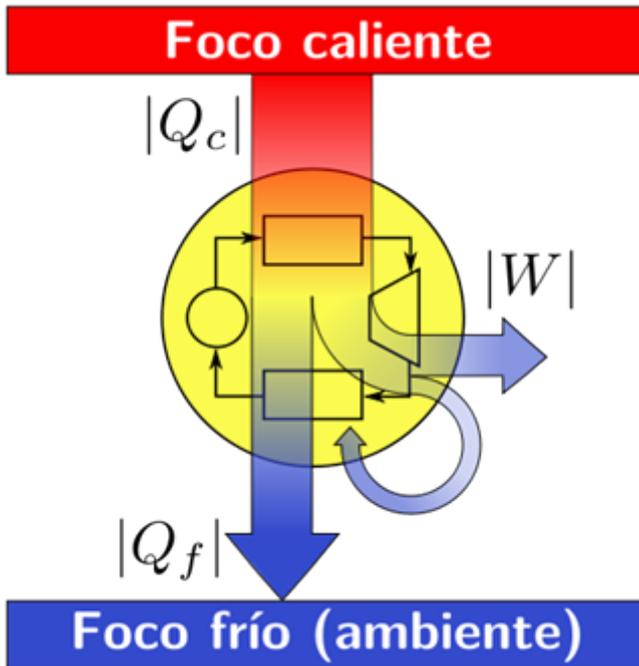
a) Convertir calor en trabajo por interacción con dos focos térmicos -Máquinas o motores térmicos. Se describen en sentido horario

b) Pasar calor de un foco frío a otro a mayor temperatura -frigoríficos o bombas de calor. Se describen en sentido antihorario



MOTOR O MAQUINA TERMICA

El ciclo se utiliza para convertir calor en trabajo. Por ello:
($W > 0$, sentido horario)



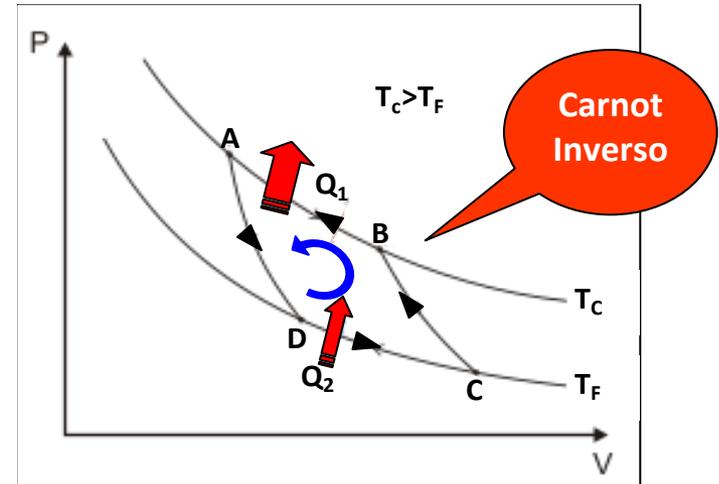
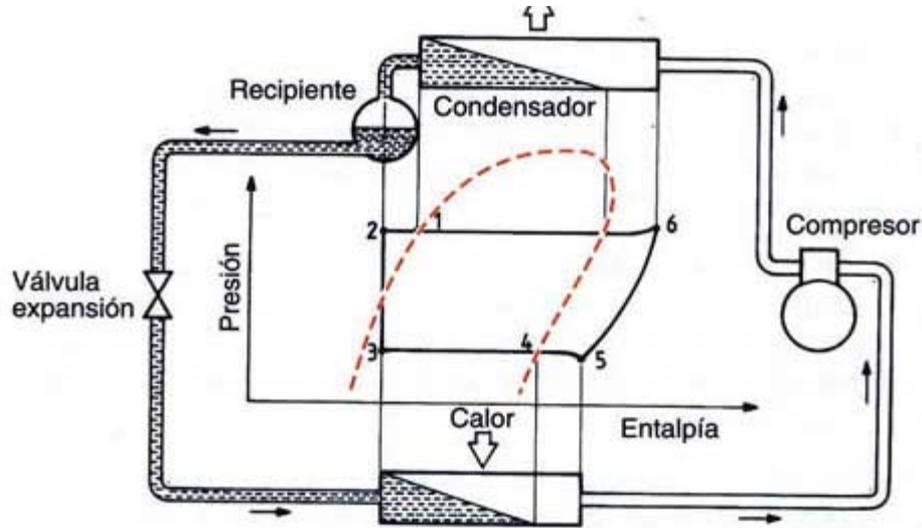
- A → B Expansión isotérmica $\Delta U = 0$, $Q_1 = W_{AB} > 0$
- B → C Expansión adiabática $\Delta U = -W_{BC} > 0$
- C → D Compresión isoterma $\Delta U = 0$; $Q_2 = W_{CD} < 0$
- D → A Compresión adiabática $\Delta U = -W_{DA} < 0$

$$\Delta U = 0; \quad |Q_C| - |Q_F| = Q = W > 0$$

$$\eta = \frac{|Q_C| - |Q_F|}{|Q_C|} = \frac{W_{util}}{|Q_C|} < 1$$

MAQUINA FRIGORIFICA Y BOMBA DE CALOR

El fluido cede calor del foco caliente



El fluido toma calor del foco frio

$$\Delta U = 0; \quad |Q_C| - |Q_F| = Q = W < 0$$

$$\eta_f = \frac{|Q_F|}{|W|} = \frac{|Q_F|}{|Q_C| - |Q_F|} < \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$\eta_{bomba} = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_C| - |Q_F|} = \frac{T_C}{T_C - T_F} > 1$$

PRINCIPALES CICLOS

◆ DE POTENCIA

Ideal de Carnot

Rankine

Brayton

Stirling

◆ DE REFRIGERACION

De Carnot inverso

Refrigeración por compresión

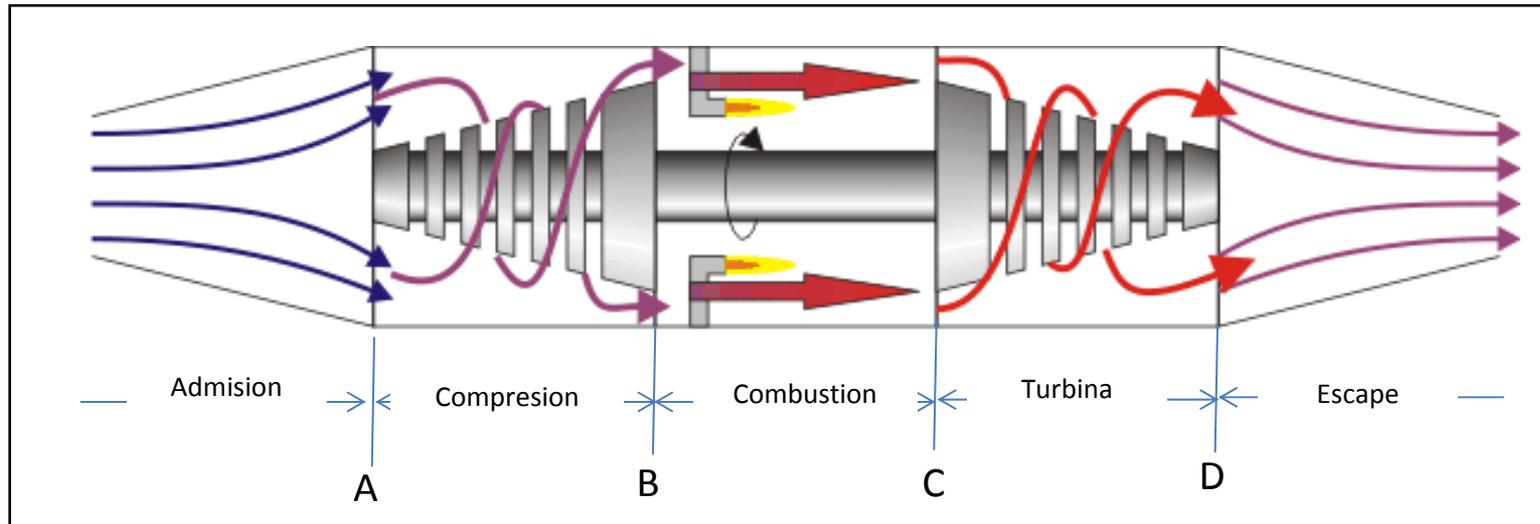
Por absorción

CICLO DE BRAYTON

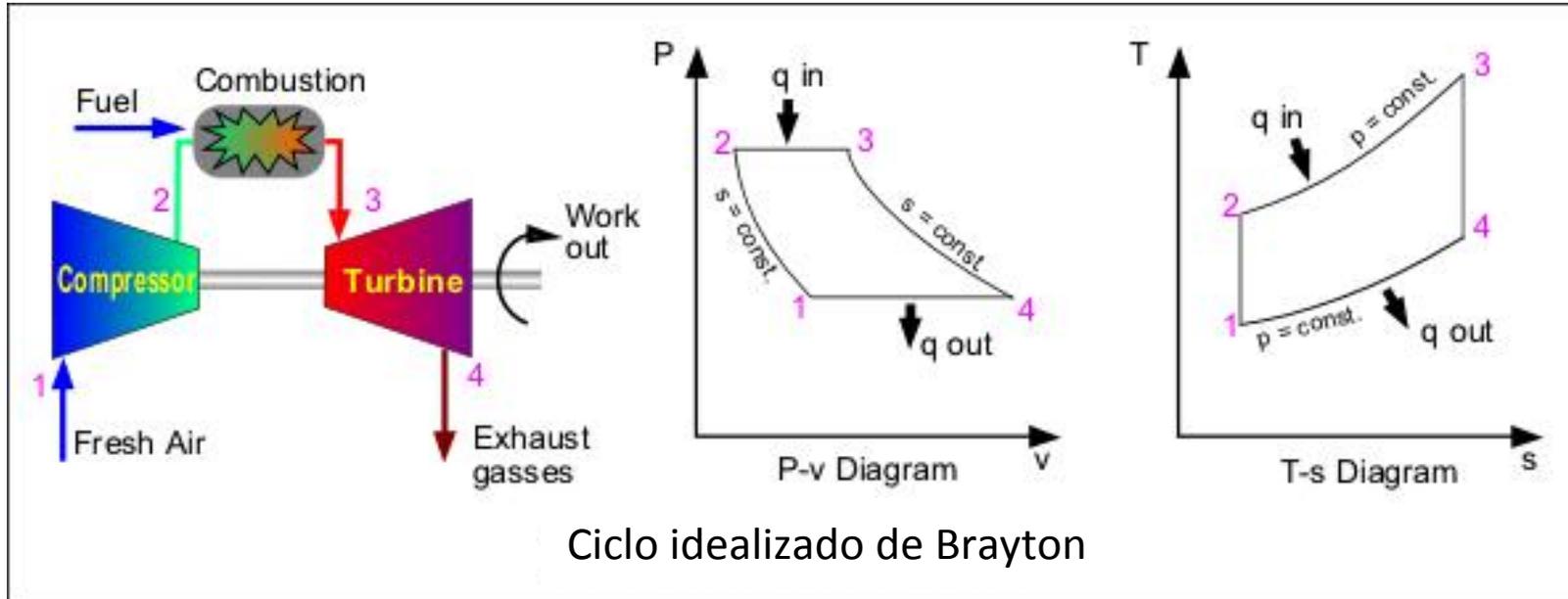
Modela el comportamiento ideal **de una turbina a gas** (normalmente aire)

Aunque es un ciclo de potencia de combustión interna abierto (los gases de salida no se reutilizan normalmente), es conveniente, para el análisis termodinámico, suponer que los gases de escape son reutilizados en el ingreso, permitiendo el análisis como ciclo cerrado

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO



REPRESENTACION TERMODINAMICA DEL CICLO

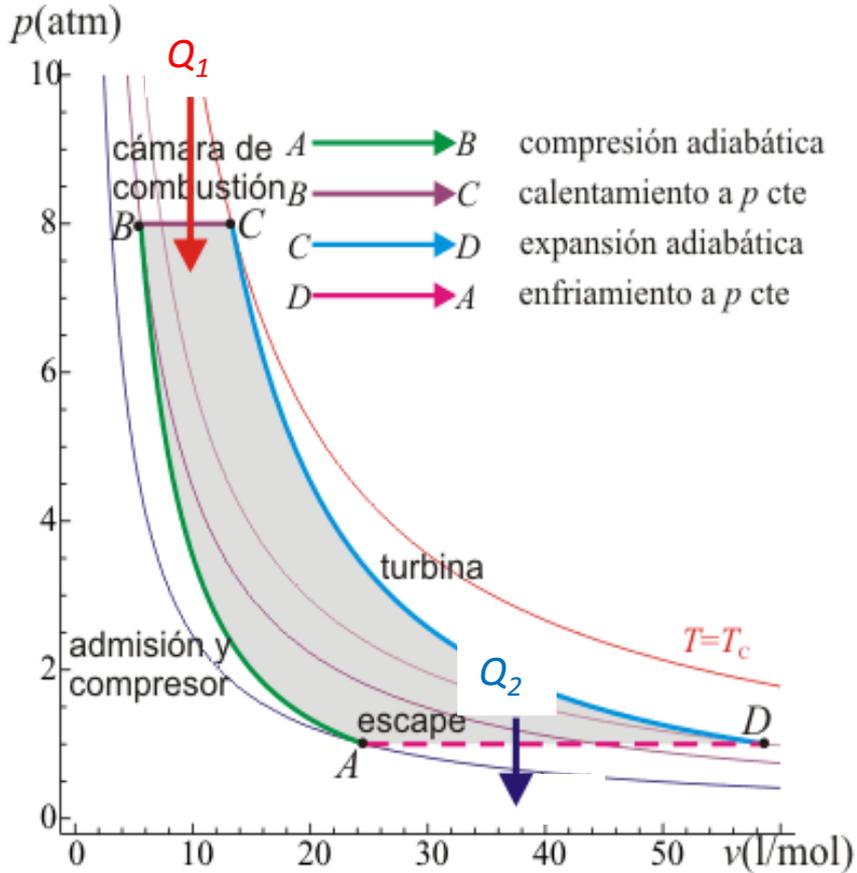


Es un motor térmico que produce trabajo por intercambio de calor con dos focos , térmicos a distinta temperatura

El rendimiento viene dado por:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{absorbido}}} = \frac{|Q_{\text{foco caliente}}| - |Q_{\text{foco frio}}|}{|Q_{\text{foco caliente}}|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|}$$

ANALISIS TERMODINAMICO



a) Procesos isobáricos

$$p_A = p_D$$

$$p_B = p_C$$

b) Procesos adiabáticos
Isoentropicos

$$p_A^{1-\gamma} T_A^\gamma = p_B^{1-\gamma} T_B^\gamma$$

$$p_C^{1-\gamma} T_C^\gamma = p_D^{1-\gamma} T_D^\gamma$$

$$\boxed{\frac{T_D}{T_A} = \frac{T_C}{T_B}} \quad (1)$$

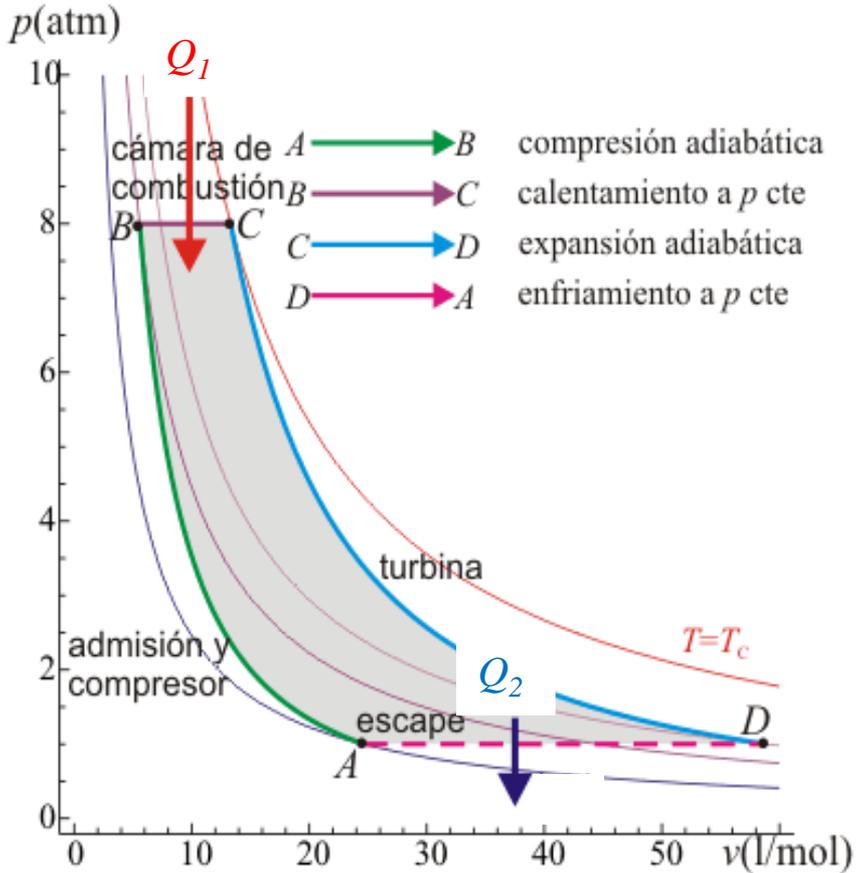
Restando la unidad a cada miembro

$$\frac{T_D}{T_A} - 1 = \frac{T_C}{T_B} - 1 \rightarrow \frac{T_D - T_A}{T_A} = \frac{T_C - T_B}{T_B}$$

Y recombinando términos

$$\boxed{\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = \frac{T_A}{T_B}} \quad (2)$$

CALOR NETO EN EL CICLO



$$|Q_1| = Q_{B \rightarrow C} = n c_p |T_C - T_B|$$

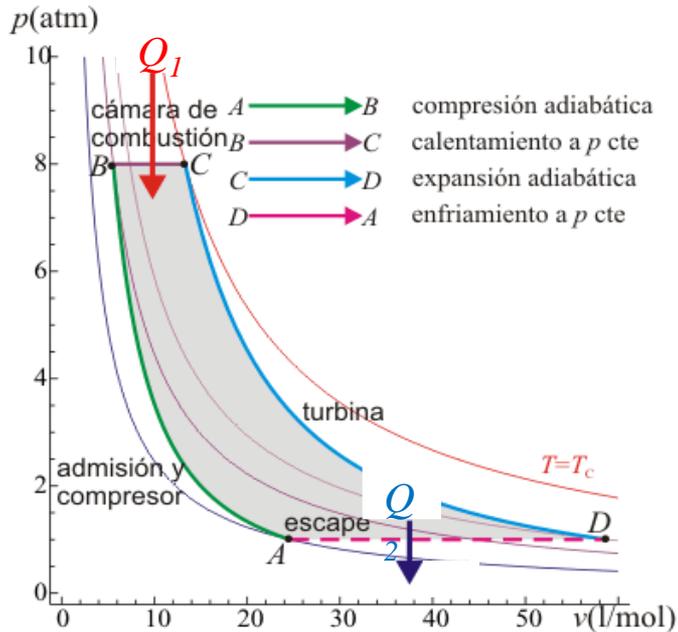
$$|Q_2| = Q_{D \rightarrow A} = n c_p |T_A - T_D|$$

$$Q_{\text{neto}} = |Q_1| - |Q_2| = n c_p [(T_B - T_D) - (T_D - T_A)]$$

El rendimiento en función de las temperaturas podrá expresarse como:

$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)}$$

TRABAJO EN EL CICLO



$$\left[\begin{aligned}
 W_{A \rightarrow B} &= \Delta U_{A \rightarrow B} = n c_v (T_B - T_A) < 0 \\
 W_{B \rightarrow C} &= p_B (V_C - V_B) = n R (T_C - T_B) > 0 \\
 W_{C \rightarrow D} &= \Delta U_{C \rightarrow D} = n c_v (T_D - T_C) > 0 \\
 W_{D \rightarrow A} &= p_A (V_A - V_D) = n R (T_A - T_D) < 0
 \end{aligned} \right.$$

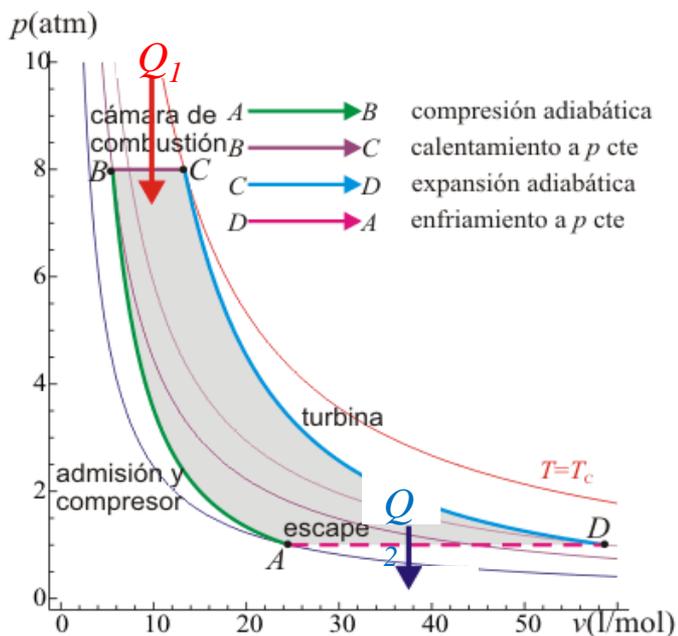
El trabajo neto en el ciclo (positivo), se obtiene sumando los trabajos de cada tramo y aplicando la relación de Mayer

$$c_p = c_v + R$$

$$W_{neto} = n c_p [(T_C - T_B) - (T_A - T_D)]$$

Como era de esperar **trabajo y calor neto coinciden**

EL RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA RAZÓN DE COMPRESIÓN “r”



$$\eta = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)^{(2)}} = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \left(\frac{p_A}{p_B} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Definiendo la razón de compresión “r” como:

$$r = \frac{p_B}{p_A} > 1$$

la ecuación del rendimiento se transforma en:

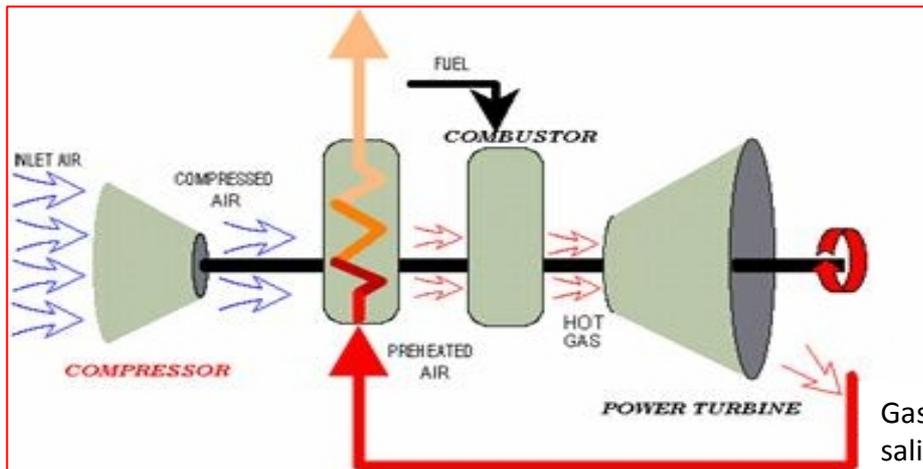
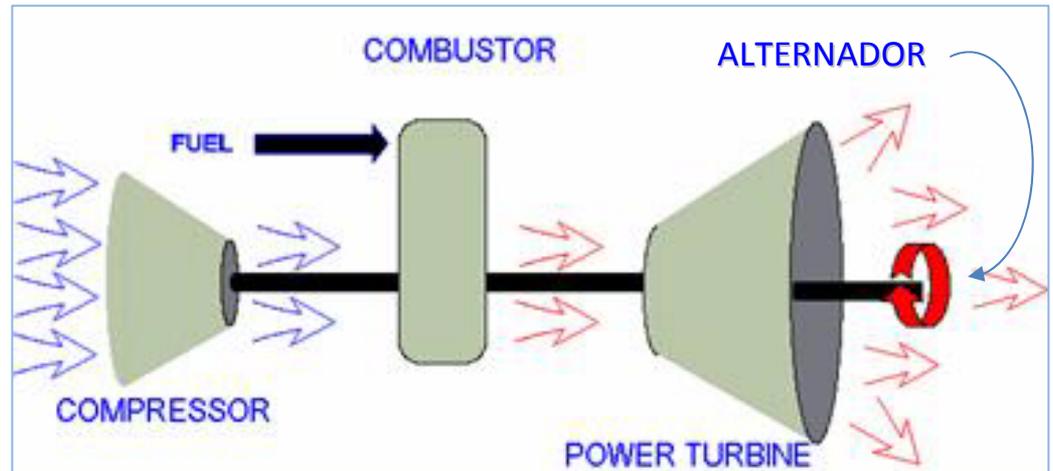
$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

con $\left[\gamma = \frac{c_p}{c_v} \right]$ coeficiente adiabático

MEJORA DE LA TURBINA SIMPLE: REGENERACION

El rendimiento del ciclo se mejora si parte de los gases de salida se introducen en un intercambiador para precalentar el gas de entrada a la cámara de combustión

TURBINA SIMPLE



TURBINA CON REGENERADOR

Gases de salida

USO EN APLICACIONES SOLARES



CENTRAL DE POTENCIA TERMOSOLAR

MOTOR DE STIRLING

El motor Stirling (1816) compitió en sus inicios con la máquina de vapor. En los últimos años ha suscitado de nuevo interés porque:

- Su rendimiento puede, teóricamente, alcanzar el límite máximo de Carnot.
- El fluido de trabajo opera en un ciclo cerrado con fuente de calor externa. Esto hace que este motor sea, potencialmente, de muy bajo nivel de emisiones.
- Al utilizar una fuente de calor externa es adaptable a una gran gama de fuentes de energía calorífica (nuclear, solar, calor de desecho de procesos, etc.)

Desventajas:

El fluido de trabajo es un gas lo que acarrea dificultades operativas. En general se utiliza el hidrógeno y el helio por sus buenas propiedades termodinámicas.

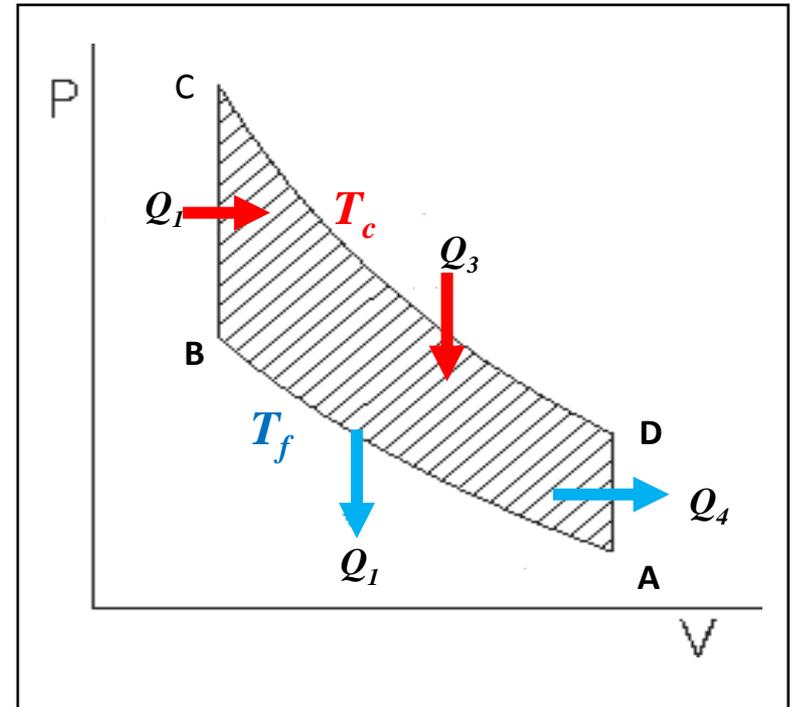
REPRESENTACION TERMODINAMICA DEL CICLO

A→B: Compresión isoterma del gas a la temperatura inferior, T_f . Se cede calor Q_1 , a la fuente fría por absorción del trabajo mecánico para la compresión.

B→C: Calentamiento isocórico. El gas absorbe del calor, Q_2 , aumentando su temperatura hasta T_c y su presión.

C→D: Expansión isoterma del gas a alta temperatura, T_c . El gas toma el calor Q_3 de la fuente caliente produciendo una cantidad equivalente de trabajo.

D→A : Enfriamiento isocórico hasta la temperatura del foco frío T_f por cesión del calor Q_4 .



RENDIMIENTO DEL CICLO

Se absorbe calor en el calentamiento isocórico y en la expansión isoterma, y se cede en los otros dos procesos.

$$\text{Calor neto absorbido: } |Q_c| = |Q_{A \rightarrow B}| + |Q_{B \rightarrow C}| = nRT_f \ln \frac{V_A}{V_B} + nc_v(T_C - T_f)$$

$$\text{Calor neto cedido } |Q_f| = |Q_{C \rightarrow D}| + |Q_{D \rightarrow A}| = nRT_c \ln \frac{V_A}{V_B} + nc_v(T_C - T_f)$$

Por lo que el rendimiento es:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{RT_f \ln r + c_v(T_c - T_f)}{RT_c \ln r + c_v(T_c - T_f)} \quad \text{con} \quad r = \frac{V_A}{V_B} = \frac{p_B}{p_A}$$

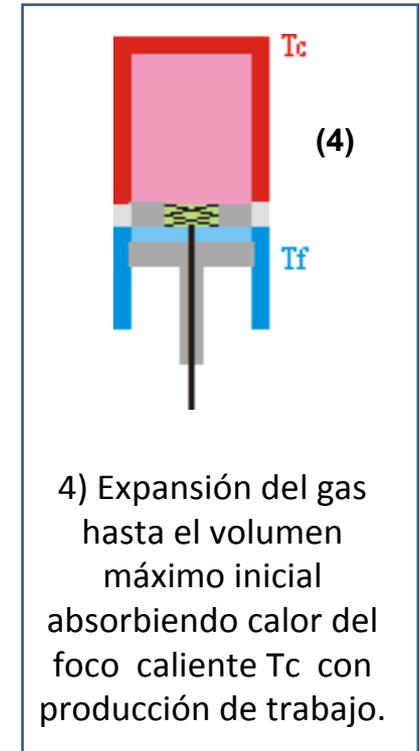
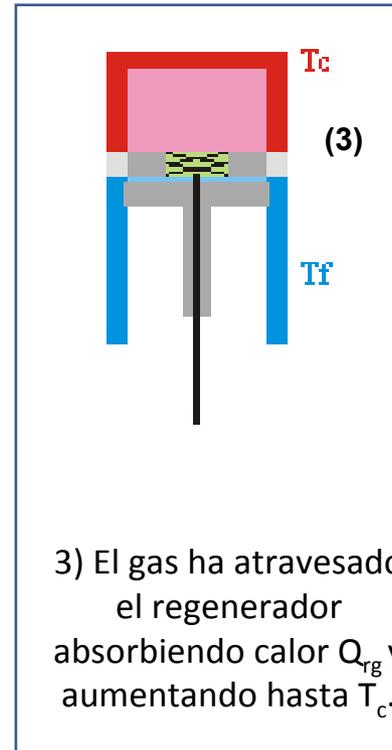
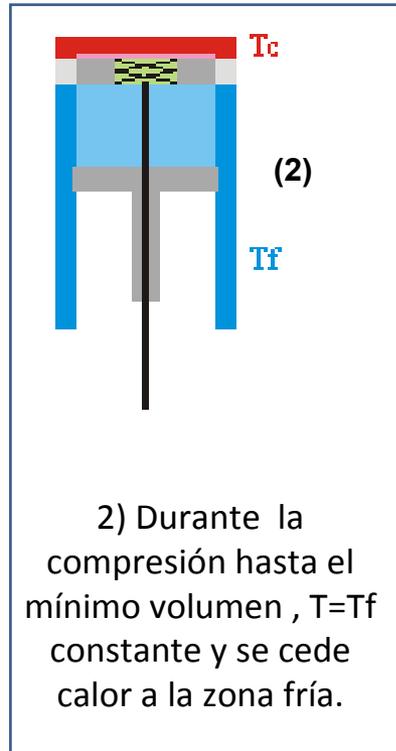
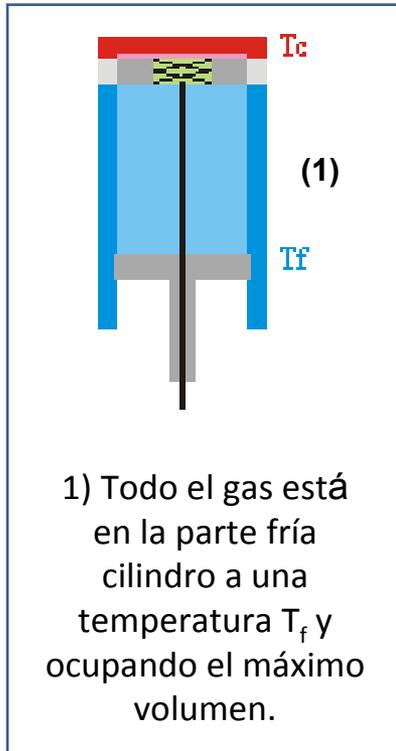
Este rendimiento es siempre menor que el máximo ideal: $\eta_{\max} = 1 - \frac{|T_f|}{|T_c|}$

Se cumple:

$$\eta_{\max} - \eta = \frac{c_v(T_c - T_f)^2}{T_c [RT_c \ln r + c_v(T_c - T_f)]} > 0$$

DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO

Un sistema que realiza el ciclo Stirling está formado por un cilindro, un pistón de trabajo y un pistón de desplazamiento con un regenerador de calor que divide al sistema en dos zonas, una zona caliente a T_c y una zona fría a T_f .



Se vuelve a la posición inicial atravesando otra vez el regenerador, pero esta vez el gas cederá una cantidad de calor, al regenerador bajando su temperatura hasta T_f

IMPORTANTE:

Lo que hace especial al ciclo de Stirling es la presencia de un intercambiador de calor (o regenerador).

En el enfriamiento del gas, se pasa de la temperatura T_c a T_f liberando calor. En el calentamiento, se pasa de T_f a T_c , absorbiendo calor. Puesto que, teóricamente, se pasa por las mismas temperaturas es posible aprovechar el calor liberado al enfriarse sin violar el segundo principio de la termodinámica: el calor que se va liberando gradualmente en un punto del enfriamiento se cede al punto a la misma temperatura en el calentamiento. Puesto que ambos puntos se encuentran a la misma temperatura el proceso sería reversible.

En la realidad siempre se necesita una diferencia de temperaturas para la transferencia, pero pueden ser lo suficientemente pequeñas como para que el rendimiento real se aproxime bastante al máximo ideal.

Como funciona? <http://personales.able.es/jgros/>
<http://www.youtube.com/watch?v=76eneqAO9RA>
<http://www.youtube.com/watch?v=duNNtU2uyi4&feature=related>

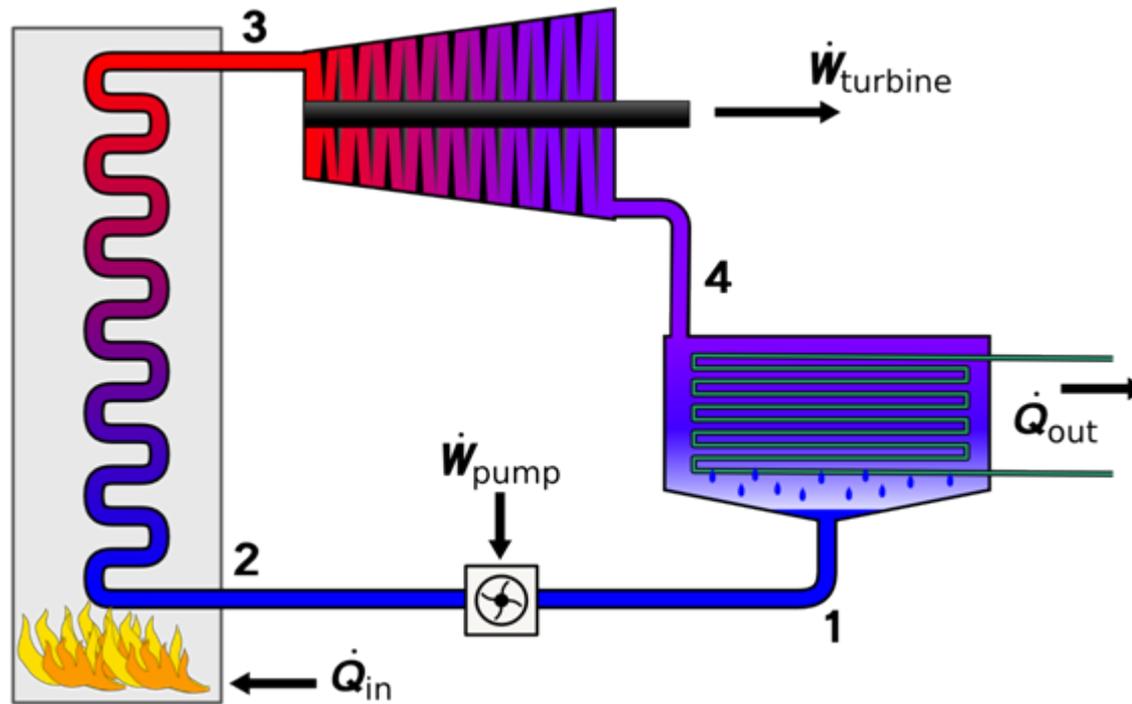
USOS EN APLICACIONES SOLARES:



Disco Stirling de la plataforma solar de Almería

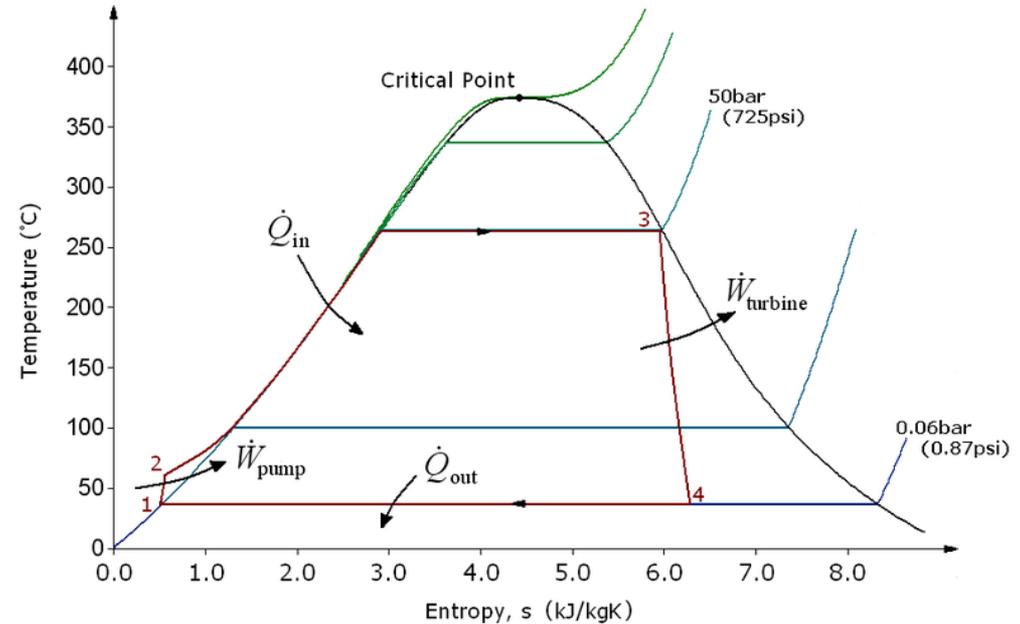
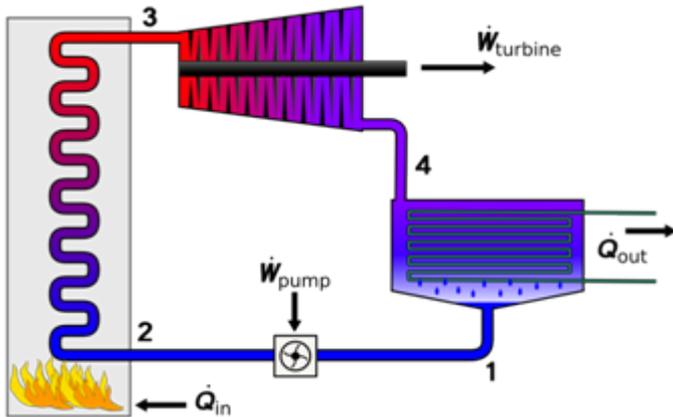


CICLO DE RANKINE



El calor suministrado por una fuente externa se convierte parcialmente en trabajo utilizando normalmente agua. Se aprovecha la entalpía de cambio de fase.

CICLO DE RANKINE: IDEAL



1-2: Calentamiento sensible adiabático del líquido ($T_f \rightarrow T_c$) por compresión. Requiere bomba o compresor.

2-3: Calentamiento isobárico del líquido hasta convertirlo en vapor saturado. Requiere de una fuente de calor externa. (Vaporización)

3-4: Expansión adiabática del vapor saturado en la turbina, con generación de potencia. La temperatura y la presión bajan y aparece condensación. (Enfriamiento sensible $T_c \rightarrow T_f$ y de cambio de fase por condensación)

4-1: Condensación isoterma del vapor hasta la saturación. El vapor se convierte en líquido saturado.

RENDIMIENTO DEL CILO RANKINE

$$\eta = \frac{\dot{W}_{Turbina} - \dot{W}_{Bomba}}{\dot{Q}_C}$$

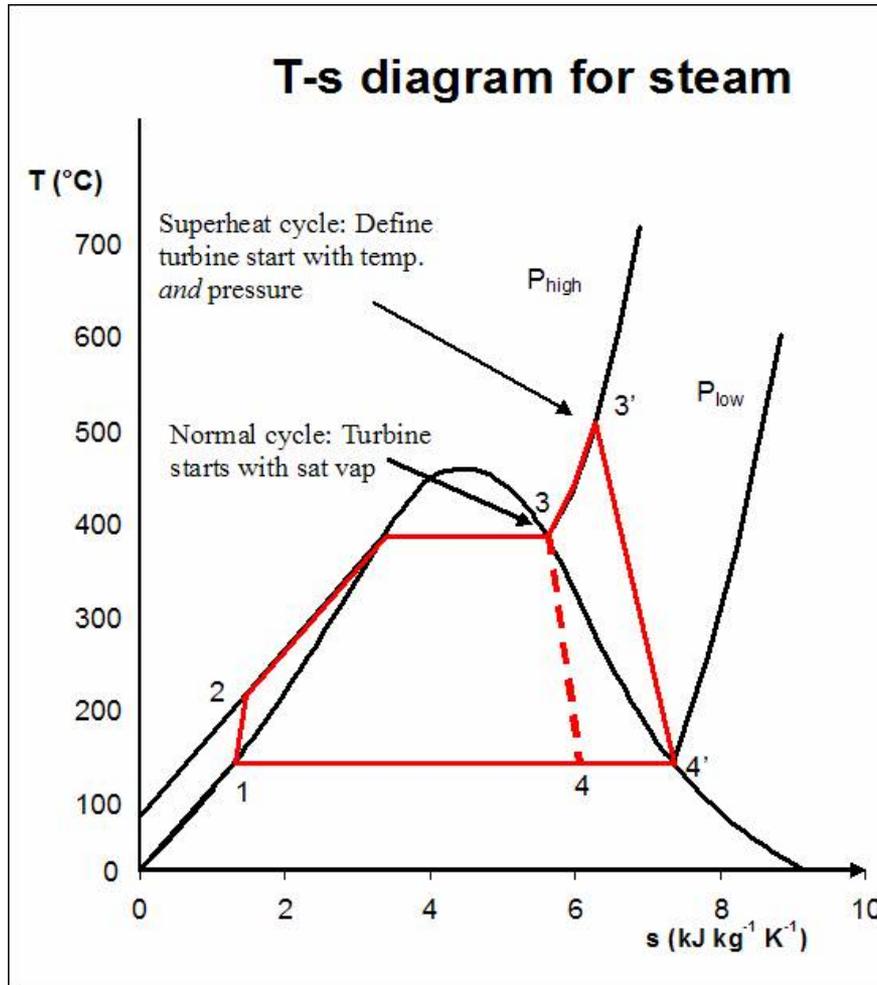
$$\frac{\dot{W}_{Turbina}}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

$$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{m}} = h_4 - h_3$$

$$\frac{\dot{Q}_C}{\dot{m}} = h_1 - h_4$$

$$\frac{\dot{Q}_F}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

CICLO DE RANKINE: REAL

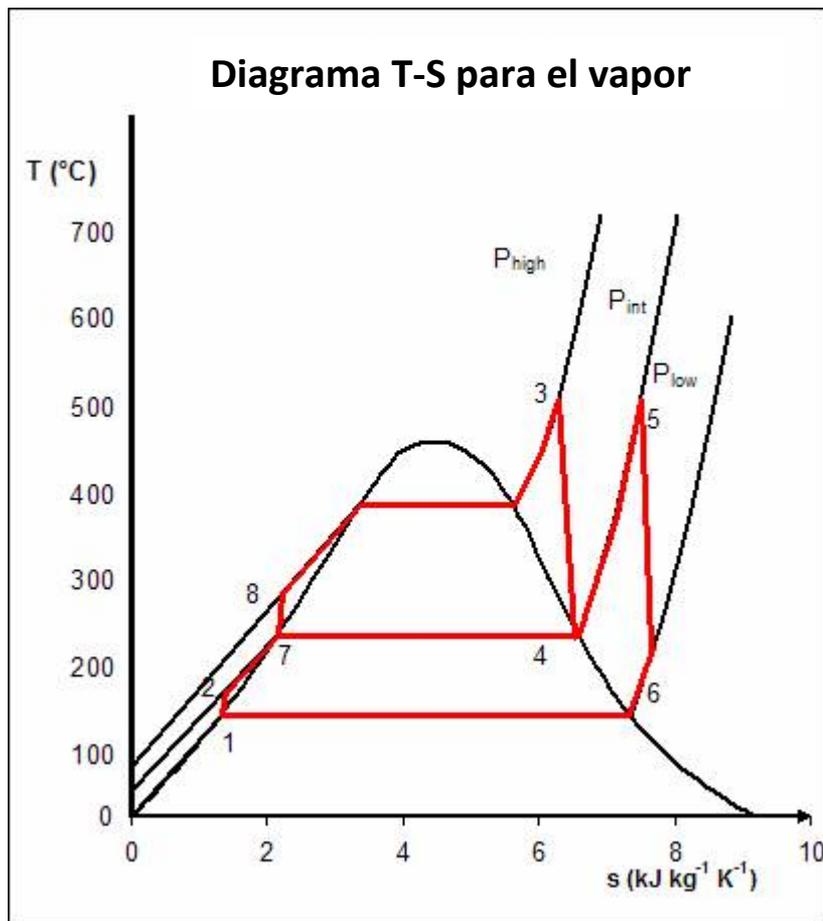


En un ciclo real la compresión en la bomba y la expansión en la turbina no son isentrópicas, por lo que son procesos no reversibles con aumento de entropía mayor consumo en la bomba y menor rendimiento global

La eficiencia de la turbina se reduce por la formación de gotas en el condensado que al chocar contra las aletas de la turbina reducen su velocidad, las erosiona y reduce su vida de uso.

La solución mas fácil es sobrecalentar el vapor (procesos $3 \rightarrow 3'$) para desplazar el diagrama hacia la derecha ($3' \rightarrow 4'$), por lo que se produce un vapor mas seco tras la expansión, lo que evita el goteo

CICLO DE RANKINE: REAL CON RECUPERADOR DE CALOR



Se introduce en el ciclo un intercambiador de calor por contacto directo (punto 2 del ciclo), en el que entran en contacto parte del vapor que sale de la turbina con el fluido que hay en el condensador (4), con lo que se consigue un líquido saturado a una temperatura intermedia (punto 7).

De esta forma se consigue aumentar el rendimiento del ciclo aunque se aumenta la complejidad de la instalación y con ello los problemas ligados al mantenimiento,

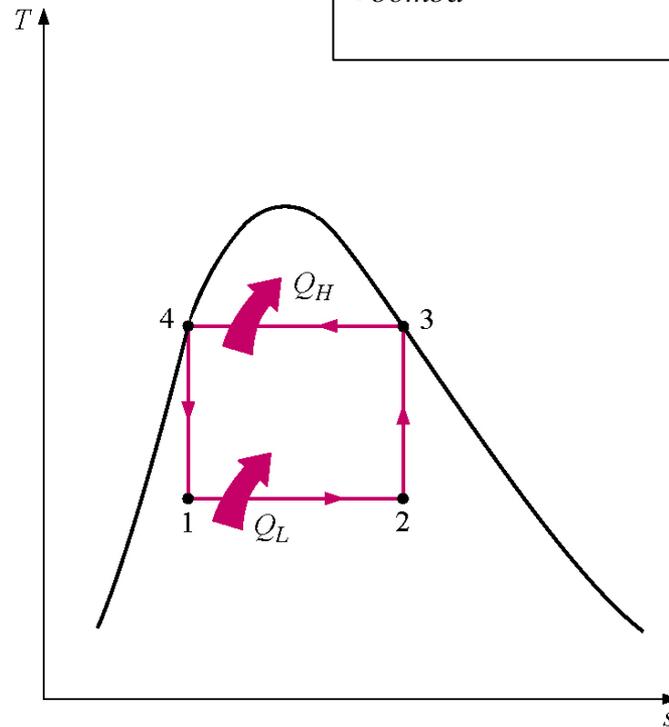
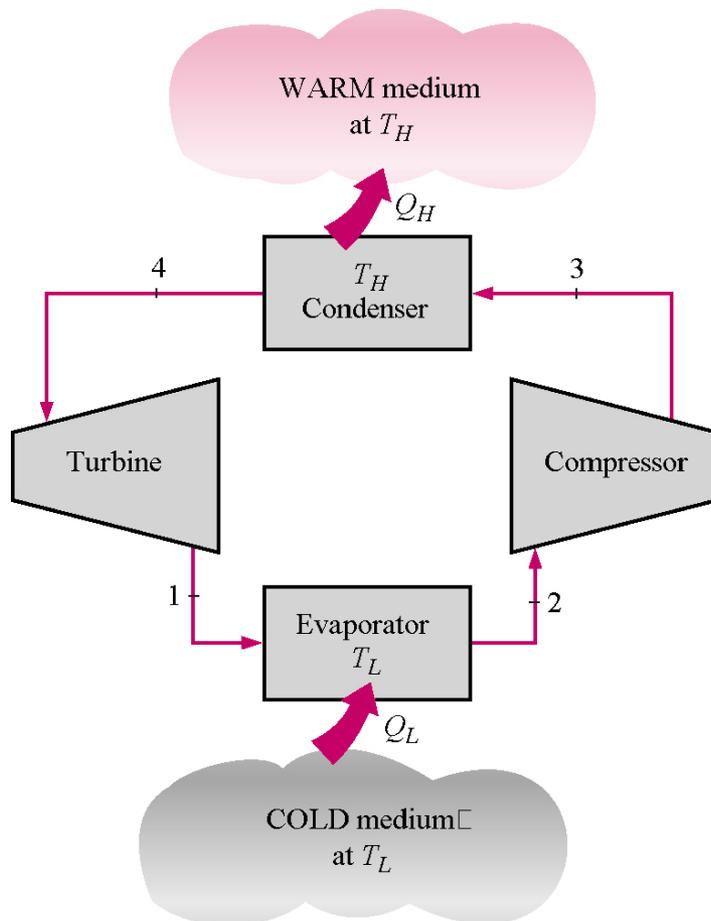
Es el ciclo que habitualmente se utiliza en las centrales de potencia

CICLOS DE REFRIGERACION

1.- Ciclo de Carnot inverso: ciclo ideal descrito por un gas (no condensable)

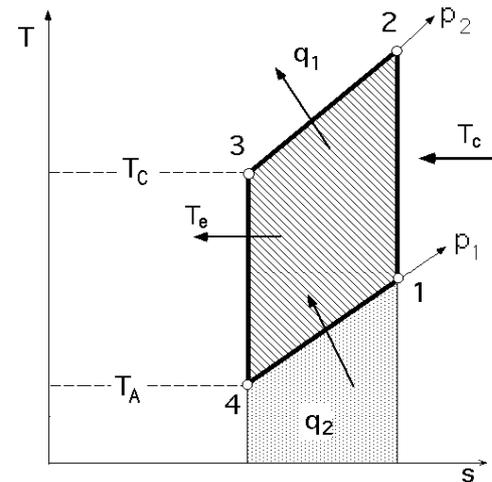
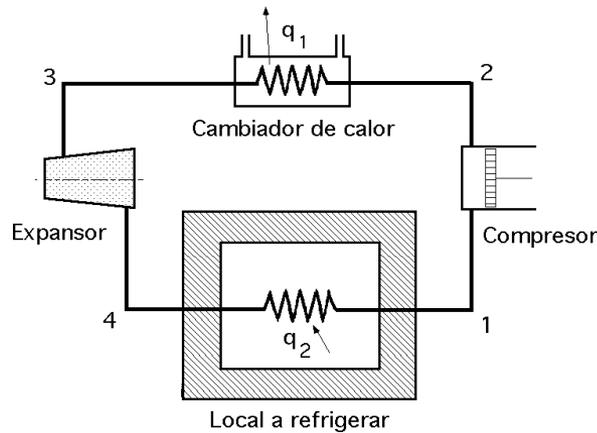
$$\eta_f = \frac{T_F}{T_C - T_F}$$

$$\eta_{bomba} = COP = \frac{T_C}{T_C - T_F} > 1$$



CICLO DE JOULE (MAQUINAS FRIGORÍFICAS DE AIRE)

Las máquinas frigoríficas de aire funcionan según un ciclo Joule. Aunque tienen un elevado consumo de energía se usan por la seguridad que supone el utilizar aire como fluido así como por el poco peso de las instalaciones (compresores rotativos).



1-2. Compresión adiabática con aumento de T. Requiere compresor.

2-3: Enfriamiento isobárico con cesión de calor.

3-4: Expansión adiabática en turbina o maquina de pistón o turbina.

4-1: Calentamiento isobárico por absorción de calor por contacto con foco caliente

$$COP = \frac{T_C}{T_C - T_F} = \frac{1}{\left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)}} \Rightarrow 1$$

CICLO DE REFRIGERACION POR ABSORCION

La refrigeración **por absorción** es un medio de producir frío aprovechando la variación de entalpía asociada al cambio de fase $L \leftrightarrow V$

El ciclo se basa físicamente en:

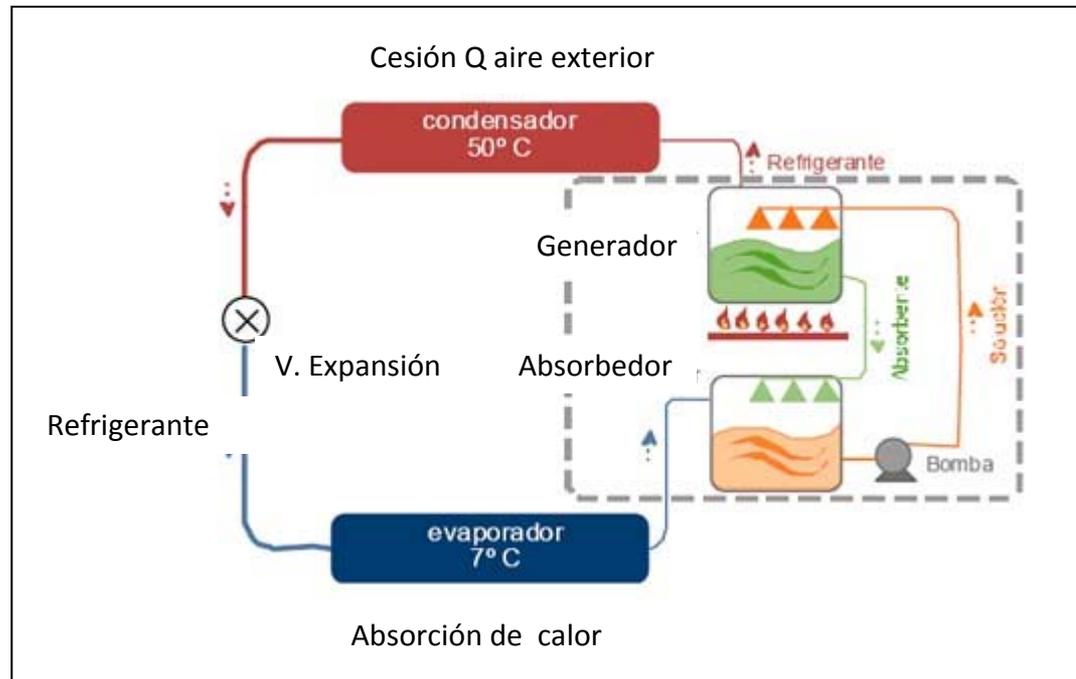
A) cambio de solubilidad con la temperatura: por ejemplo agua-NH₃ (el NH₃ es el soluto)

B) la capacidad de algunas sustancias, como el [bromuro de litio](#) de absorber otra sustancia – agua - en fase de [vapor](#).

PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE POR ABSORCIÓN: NH₃-AGUA

Generador: La solución NH₃-H₂O se lleva a ebullición, por aporte calorífico externo. El fluido refrigerante- NH₃ se vaporiza y se separa del agua (presión unos 20 bares)

Condensador: el vapor de NH₃ condensa por enfriamiento con aire ambiente exterior

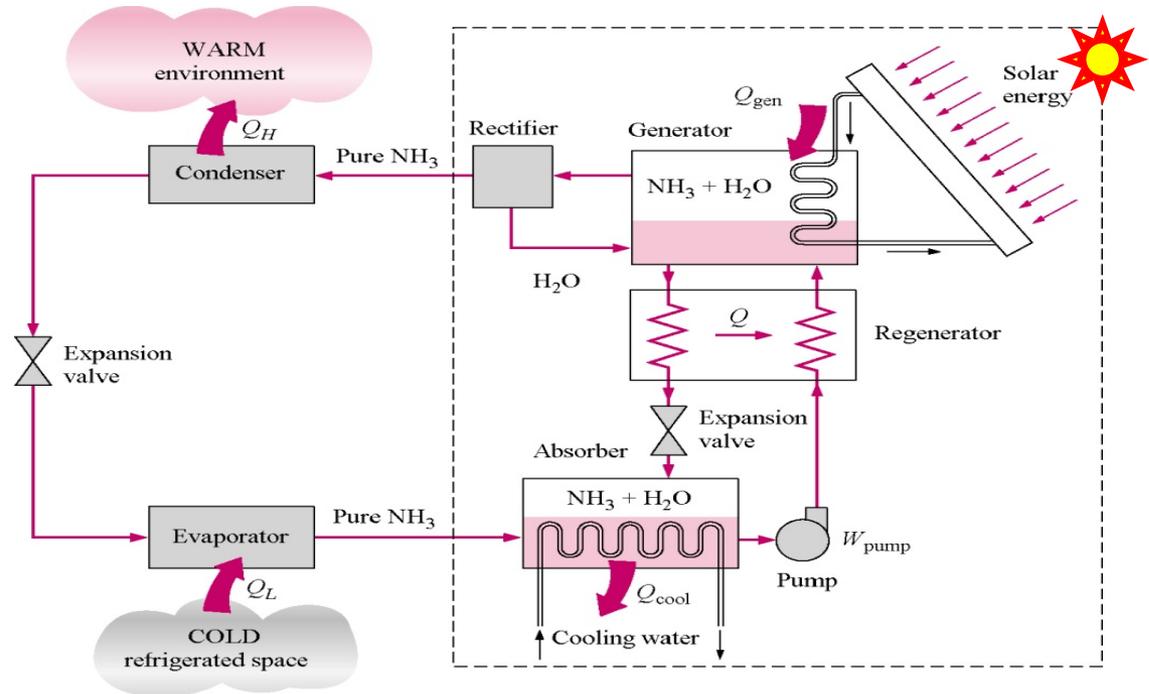


Evaporador: NH₃ líquido se evapora a baja presión (unos 4 bares) absorbiendo calor del circuito de utilización (T próxima 3 ° C).

Absorbedor: El vapor de NH₃ es absorbido por el agua proveniente de la separación amoníaco agua que se produjo en el generador

CICLO NH3 -H2O

- El fluido que se mueve e intercambia calor es el NH3.
- El agua es la sustancia absorbidora
- Los ciclos termodinámicos son los inversos de Rankine o Joule
- Precisa de una bomba para llevar la disolución concentrada al evaporador



$$COP = \frac{Q_{\text{Extraido foco frio}}}{Q_{\text{fuente externa}} + W_{\text{Bomba}}} \approx \frac{Q_{\text{Extraido}}}{Q_{\text{generado}}}$$

CICLO DE REFRIGERACION POR ABSORCION: BrLi-H₂O

El bromuro de litio es una sal higroscópica cuya salmuera tiene gran afinidad por el vapor de agua que lo absorbe del aire húmedo.

Es un ciclo similar al de NH₃-AGUA, aunque en este caso el fluido que describe el ciclo refrigerante es el agua. El ciclo básico consta de los mismos cuatro procesos básicos: absorción de vapor de agua, evaporación de vapor de agua, regeneración y condensación de vapor de agua.

Ventajas: el absorbente es no volátil por lo que no acompaña al vapor y no se necesita rectificador.

Inconvenientes:

- el absorbente, no es del todo soluble en el agua para todos los valores de presión y temperatura que pueden darse en el sistema (precauciones para evitar la cristalización del Bromuro de Li),
- por ser el agua el refrigerante, las presiones de operación sub-atmosféricas
- el bromuro de litio es corrosivo