

CICLOS TERMODINÁMICOS

CICLOS DE POTENCIA

CICLOS DE REGRIGERACIÓN

Máquina Térmica

Refrigerador, Bomba de calor

Ciclo de gas: La sustancia que lo realiza queda durante el ciclo en estado gas

Ciclo de Vapor: Recorre parte del ciclo en estado vapor y otra parte en estado líquido

Ciclo cerrado: El fluido de trabajo regresa a su estado inicial al final del ciclo (ej. Vapor en una central Térmica)

Ciclo abierto: El fluido de trabajo se renueva en cada ciclo. (ej. automovil)

Máquinas Térmicas	}	<p>Combustión interna: Se quema el combustible dentro de la frontera del sistema</p> <p>Combustión externa: Uso de calderas, pozo geotérmico, reactor nuclear, sol.. (Centrales eléctricas)</p>
-------------------	---	---

Los ciclos reales se aproximan a ciclos ideales, suponiendo:

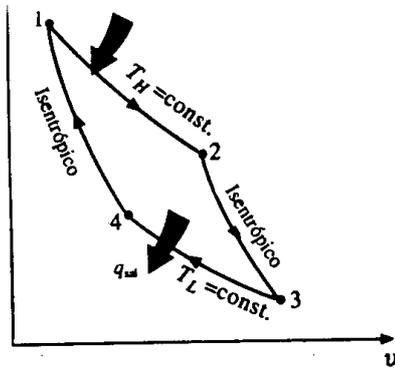
El ciclo no implica ninguna fricción

Procesos de expansión y compresión son cuasiestáticos

Tuberías que conectan las diferentes partes del sistema están bien aisladas

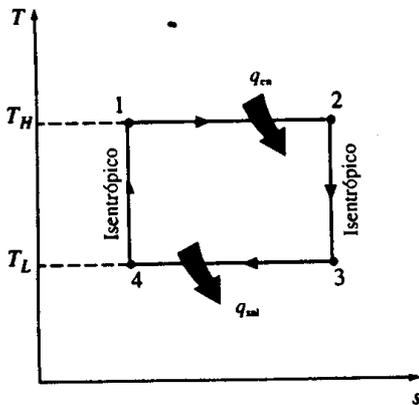
Se ignoran los cambios de energía cinética y potencial del fluido de trabajo (excepto en toberas)

EL CICLO DE CARNOT Y SU VALOR EN INGENIERÍA



$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{ABSORBIDO}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

- ➔ El ciclo de Carnot es el ciclo reversible que tiene mayor rendimiento.
- ➔ Todos los ciclos reversibles que operen con las mismas dos fuentes térmicas tienen el mismo rendimiento.
- ➔ Rendimiento aumenta con la diferencia de temperatura entre las dos fuentes
- ➔ Existen límites físicos para T_H y T_L



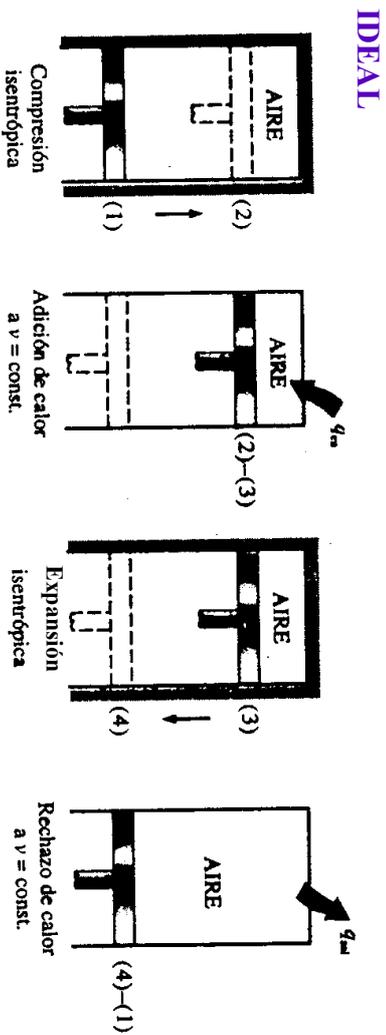
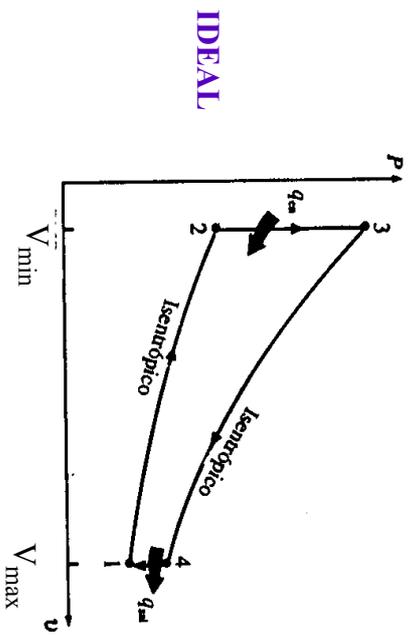
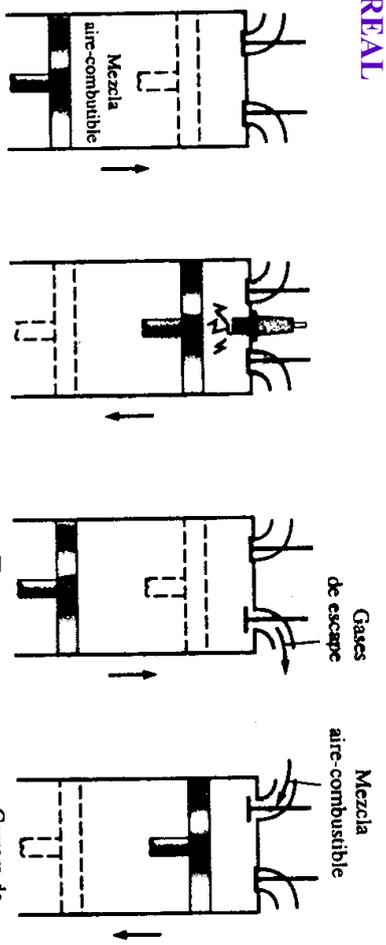
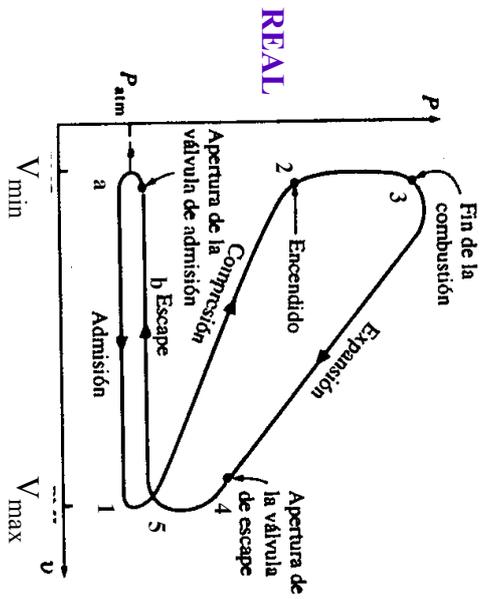
El ciclo de Carnot podría llevarse a cabo en un sistema cerrado (cilindro-pistón) o bien en un sistema de flujo permanente (dos turbinas y dos compresores)

INCONVENIENTES PARA SU EXACTA REALIZACIÓN PRÁCTICA:

En ciclos de gas: La transferencia de calor isotérmica reversible es difícil de llevar a cabo en la realidad ya que requeriría tiempos muy largos

En ciclos de vapor: Es difícil de encontrar la composición exacta de líquido que cierre el ciclo.

CICLO DE OTTO
 Máquina de Combustión Interna
 Ciclo ideal para las máquinas de encendido de chispa. Motor de Ignición



CICLO DE OTTO

a - 1 Se abre la válvula de admisión, el pistón baja absorbiendo la mezcla fresca aire-gasolina. P aprox cte= 1atm

1 - 2 El pistón sube y comprime la mezcla adiabáticamente.

2 En V_{min} de la mezcla, la chispa produce la combustión instantáneamente.

2 - 3 Aumenta la temperatura y la presión a $v=cte$

3 - 4 Expansión adiabática con realización de trabajo. Fase de Potencia

4 - 5 Se abre la válvua de escape, la presión cae a 1 atm. $V=cte$.

5 - b El pistón empuja los gases de combustión fuera a $P=cte=1atm$

a - 1 Se abre la válvula.....comienza el ciclo de nuevo

No es exactamente un ciclo

- 1) Combustible no reutilizable
- 2) 5 - b y a - 1 no totalmente coincidentes

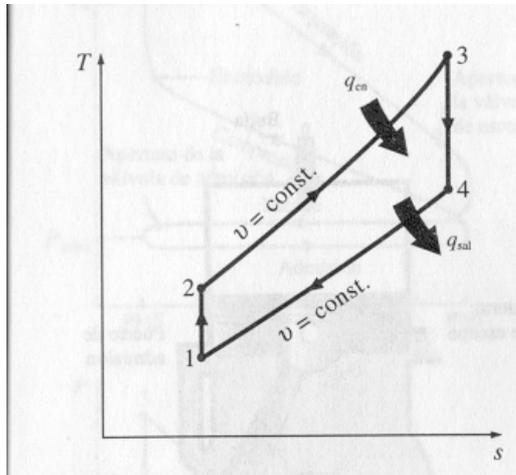
Suposición para considerarlo ideal: Se realiza un ciclo 1 -2- 3- 4.

Dos Isócoras y dos adiabáticas. Ciclo cerrado

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

- $\gamma \rightarrow$ Índice adiabático
- $r = \frac{v_{max}}{v_{min}}$ Relación de compresión

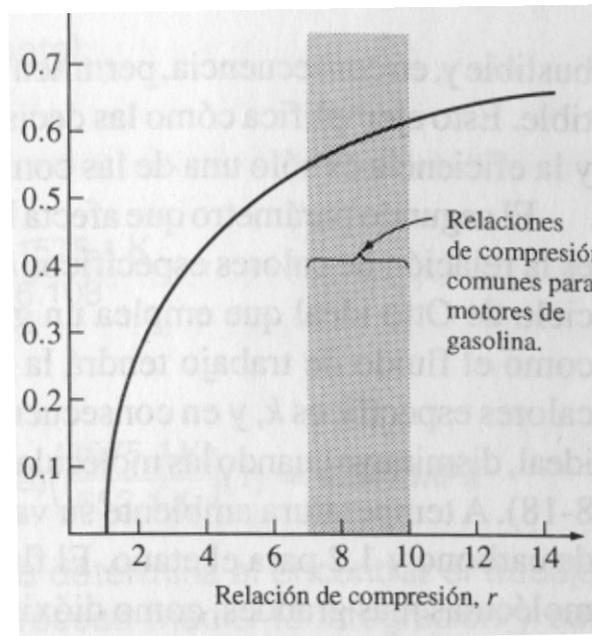
DIAGRAMA TS PARA EL CICLO DE OTTO



$$|Q_{abs}| = \Delta U_{2 \rightarrow 3} = nc_v(T_3 - T_2)$$

$$|Q_{ced}| = \Delta U_{4 \rightarrow 1} = nc_v(T_4 - T_1)$$

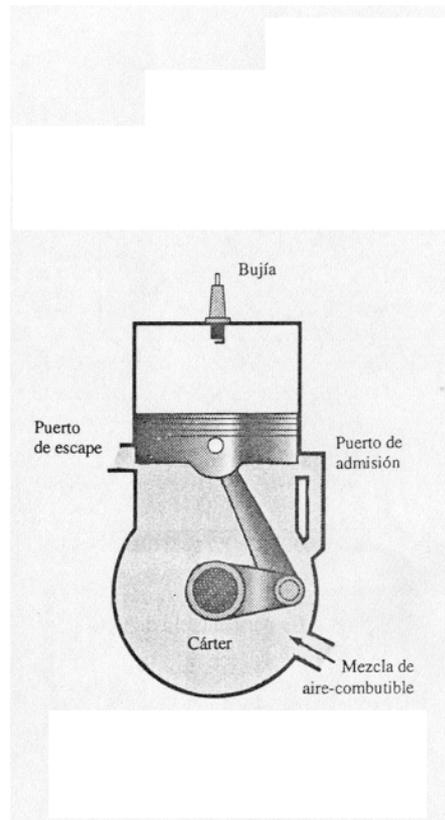
Eficiencia Térmica de un ciclo de Otto ideal como función de la relación de compresión ($\gamma=1.4$)



La eficiencia térmica aumenta con la relación de compresión

Si la relación de compresión es excesivamente grande puede perjudicar al motor ya que se produce el autoencendido. (Durante la compresión se elevaría en exceso la temperatura)

MOTOR DE DOS TIEMPOS

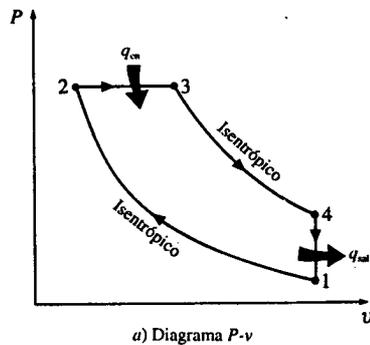


Idealmente sigue el mismo ciclo de Otto que el motor de cuatro tiempos.

En el ciclo REAL durante la expansión adiabática (Tiempo de Potencia) se abre primero el puerto de escape y luego el de admisión.

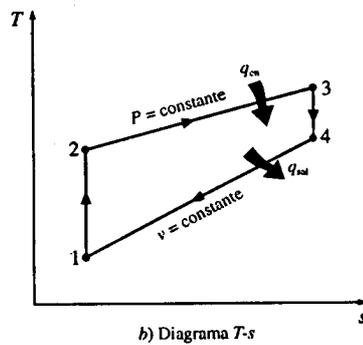
CICLO DIESEL Encendido por compresión

DIAGRAMA PV Y TS



SE USAN MAS ALTAS RELACIONES DE COMPRESIÓN

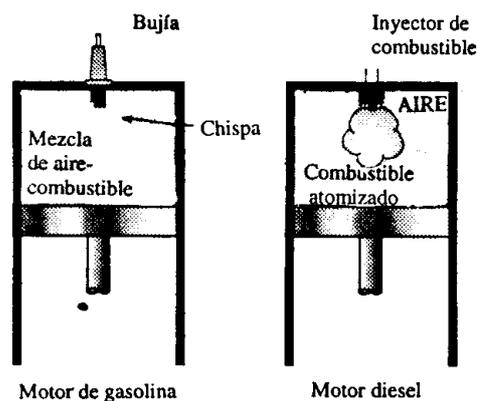
- 1 - 2 compresión de aire
- 2- 3 Se inyecta el combustible manteniendo la P=cte
- 3- 4 Se cierra el inyector. Expansión adiabática. Tiempo de Potencia



$$\eta = 1 - \left[\frac{r_0^\gamma - 1}{\gamma(r_0 - 1)} \right] \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad r_0 = \frac{v_3}{v_{min}}$$

$\eta_D < \eta_{otto}$ Para la misma relación de compresión

Para Diesel $r_D < r_{otto}$ Al final tiene mayor η



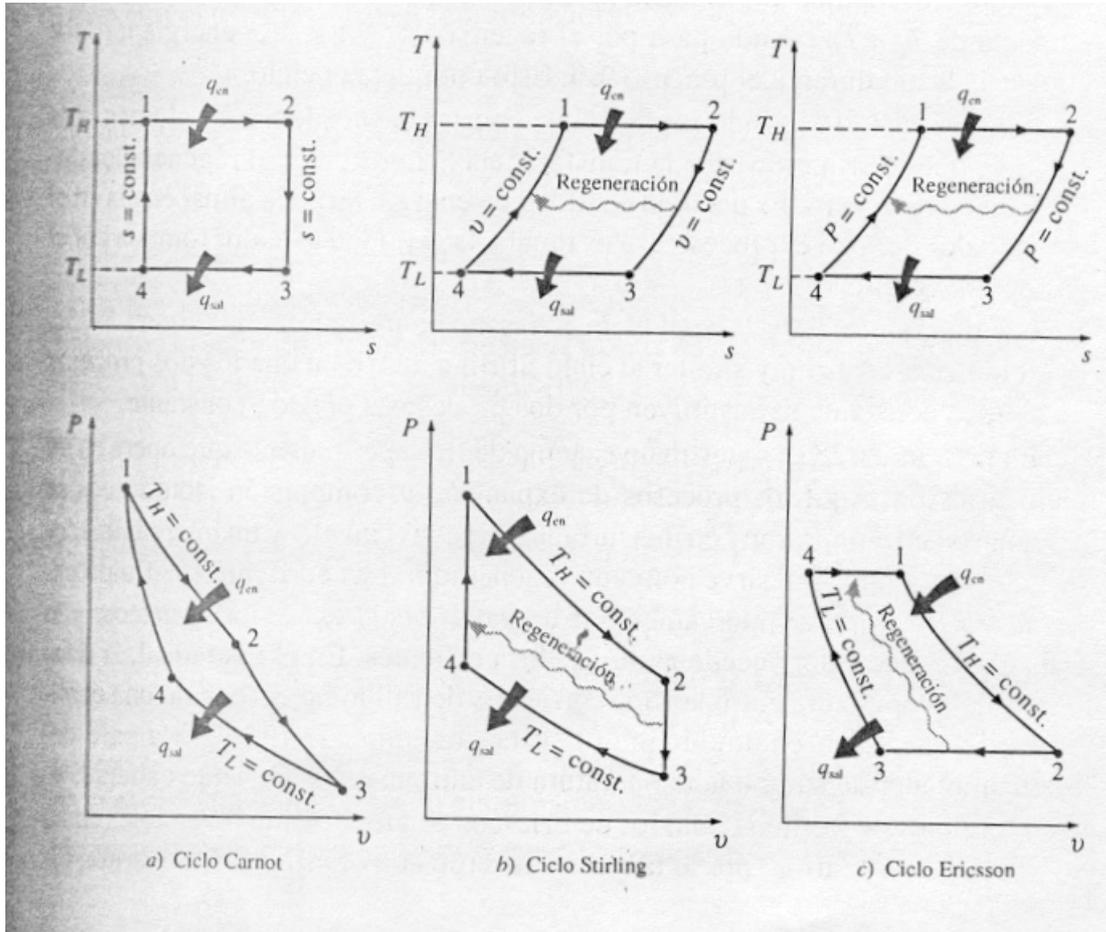
En los motores diesel la bujía se reemplaza por un inyector de combustible

CICLOS DE STIRLING Y ERICSSON

Combustión externa

Más similares al de Carnot ya que trabaja entre dos fuentes térmicas

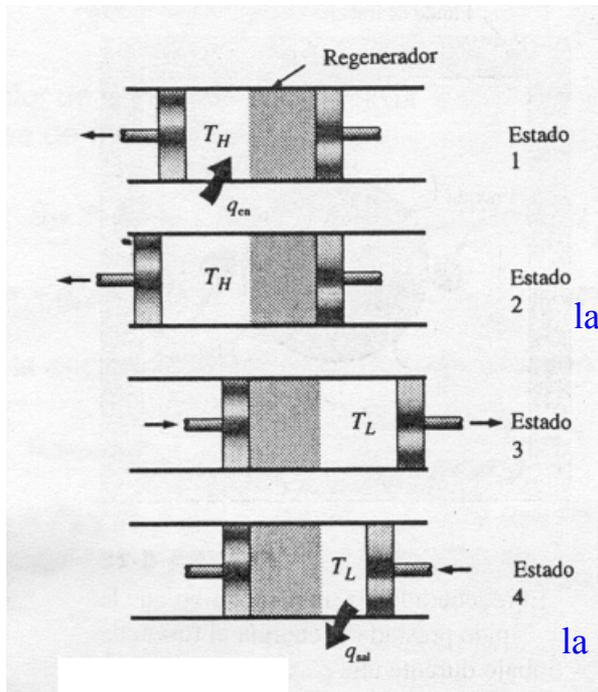
Diagramas TS y PV de los ciclos de Carnot, Stirling y Ericsson



No son prácticos: Necesitarían la transferencia ideal de calor a $T = \text{cte}$

Esto requeriría superficies muy grandes o un tiempo infinito

LA EJECUCIÓN DEL CICLO STIRLING



1 -2 Expansión Isoterma.
Se absorbe calor de la fuente a T_H

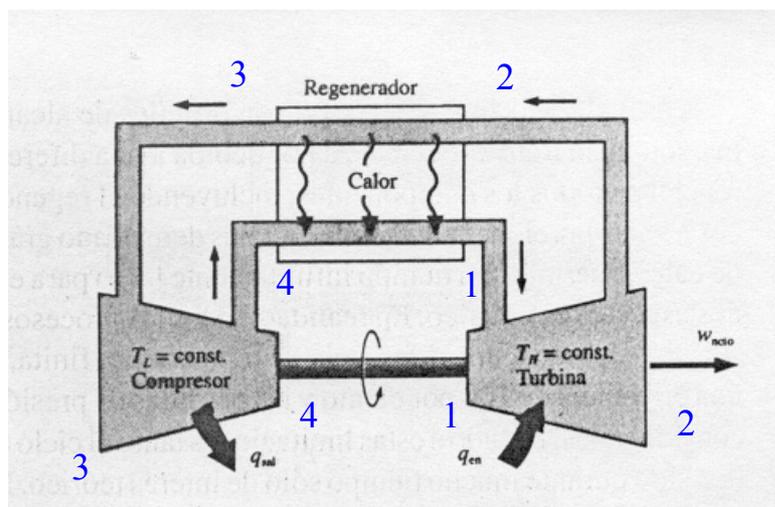
2 -3 Ambos pistones se mueven a la misma velocidad manteniendo $v=cte$

3- 4 Compresión Isoterma,
se cede calor a la fuente a T_L

4-1 Ambos pistones se mueven a la misma velocidad manteniendo $v=cte$

El regenerador se queda con el calor en 2 3 haciendo que el gas se enfríe este calor lo devuelve en 4 1 haciendo que se caliente

UN MOTOR ERICSSON DE FLUJO PERMANENTE



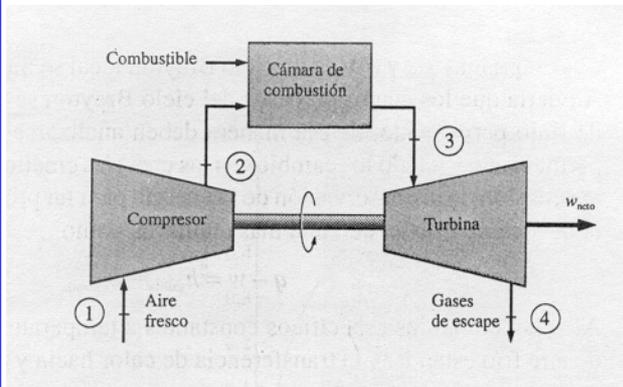
El fluido fluye de manera constante. La compresión y la expansión se produce en el compresor y en la turbina respectivamente

El regenerador es ahora un intercambiador de calor a contraflujo

CICLO BRAYTON

El ciclo ideal para los motores de turbina de gas. Ciclo abierto

Motor de turbina de gas de ciclo abierto. REAL



1 -2 Entra aire fresco en el compresor
T y P aumentan

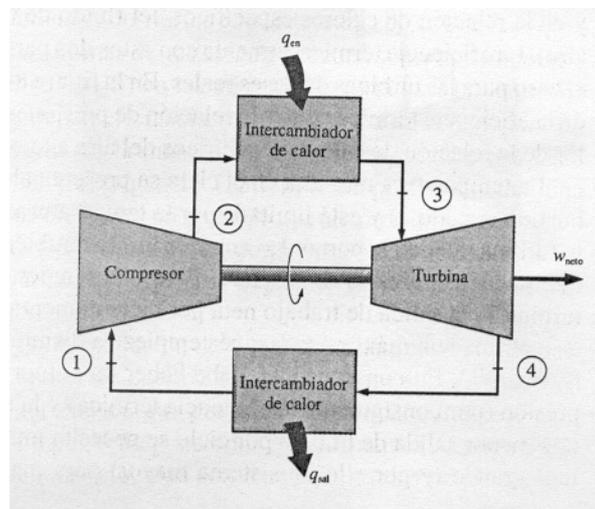
2 -3 El combustible se quema a $P=cte$

3-4 Los gases de alta temperatura
entran en la turbina donde se
expanden hasta P_{atm} .

Producción de potencia

Motor de turbina de gas de ciclo cerrado. Modelado del real.

IDEAL

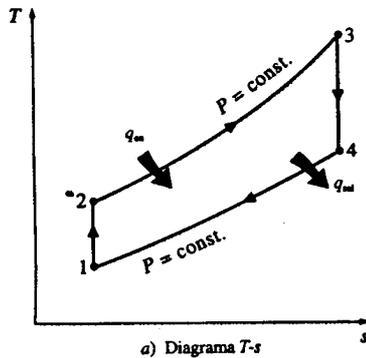


Los procesos de compresión y expansión quedan iguales

El proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a $P=cte$

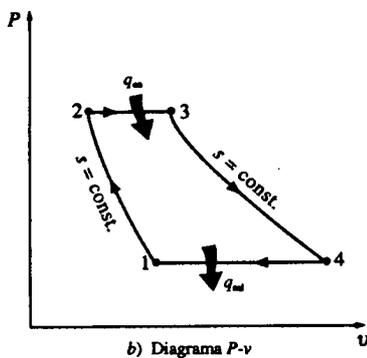
El proceso de escape se sustituye por uno de cesión de calor a presión constante hacia el aire ambiente

Diagramas T-s y P-v para el ciclo Brayton ideal



a) Diagrama T-s

- 1 - 2 Compresión Isoentrópica
- 2 - 3 Adición de calor a P=cte
- 3 - 4 Expansión Isoentrópica
- 4 - 1 Cesión de calor a P=cte



b) Diagrama P-v

$$|Q_{abs}| = \Delta H_{2 \rightarrow 3} = nc_p(T_3 - T_2)$$

$$|Q_{ced}| = \Delta H_{4 \rightarrow 1} = nc_p(T_4 - T_1)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_p^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

$\gamma \rightarrow$ Índice adiabático

$$r_p = \frac{p_2}{p_1} \quad \text{Relación de presiones}$$

- ➡ El rendimiento aumenta con la relación de presiones
- ➡ La temperatura más alta se consigue al final del proceso de combustión (estado 3) que está limitada por la máxima temperatura que los alabes de la turbina pueden soportar, este hecho limita la relación de presiones
- ➡ Las principales áreas de aplicación de las turbinas de gas son:

La propulsión de aviones y la generación de energía eléctrica

CICLOS IDEALES DE PROPULSIÓN A CHORRO

En un motor de chorro, los gases de alta temperatura y alta presión que salen de la turbina se aceleran en una tobera para proporcionar el empuje.

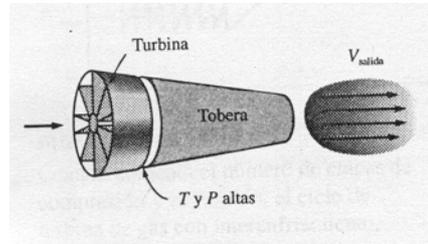
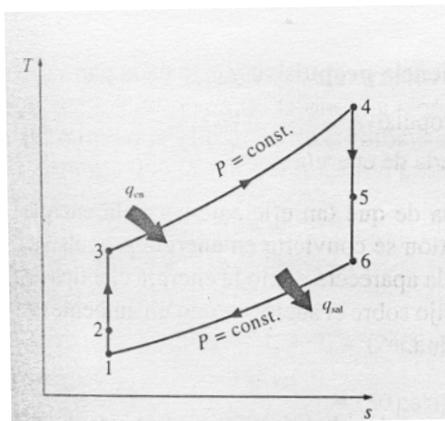
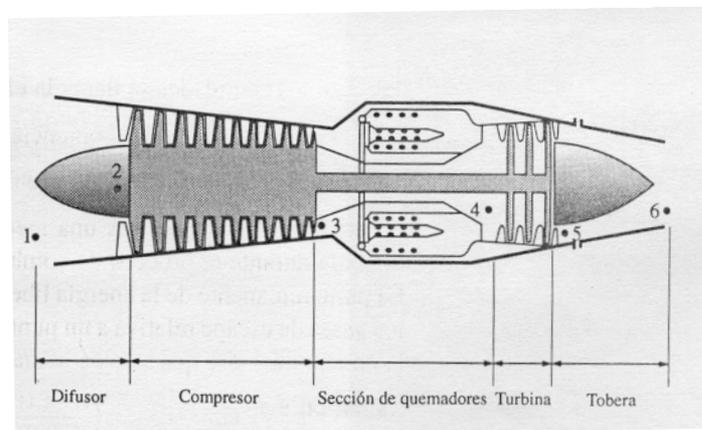


Diagrama T-s del ciclo turbochorro ideal



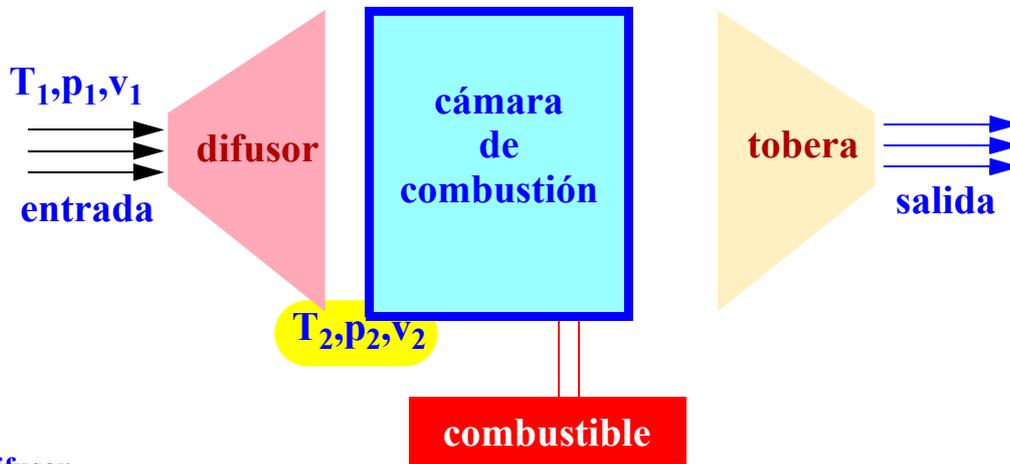
Esencialmente es idéntico al de turbina de gas del ciclo Brayton. Difieren en que el gas en la turbina solo se expande parcialmente produciendo un trabajo que se emplea en accionar el compresor. La expansión final se produce en la tobera hasta la presión ambiente y salen del avión a alta velocidad.

Componentes básicos de un motor de turbochorro



Análisis termodinámico en los motores de propulsión a chorro

Estatoreactor



difusor

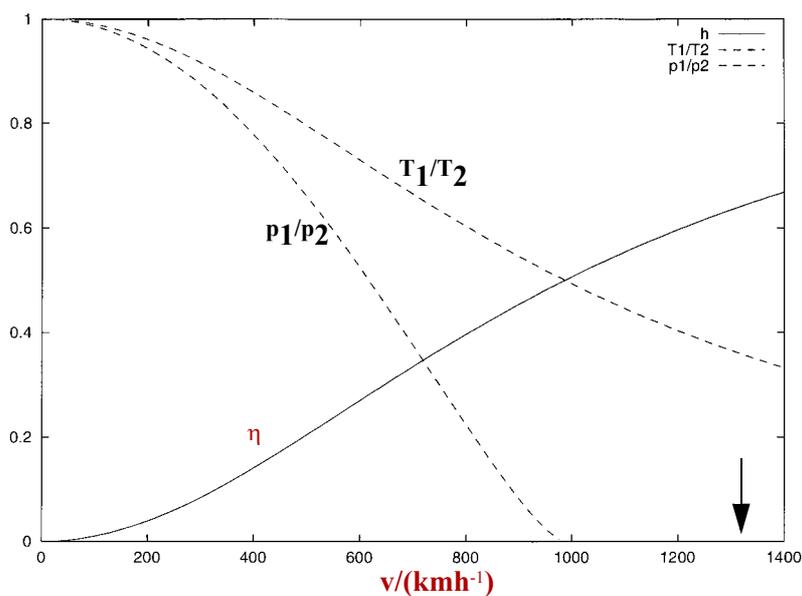
$$(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) = 0$$

ciclo

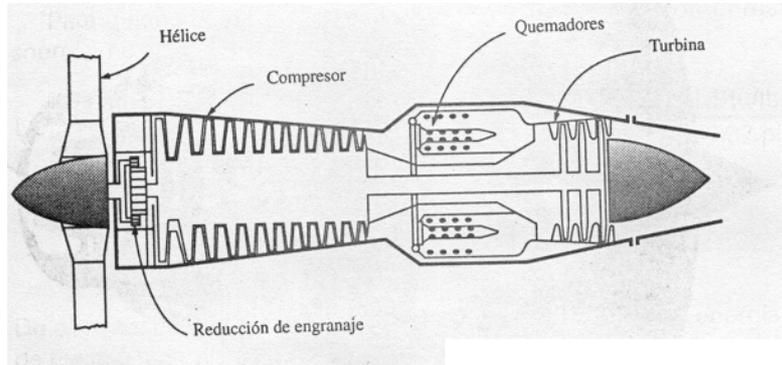
$$\eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$v_1 \gg v_2$

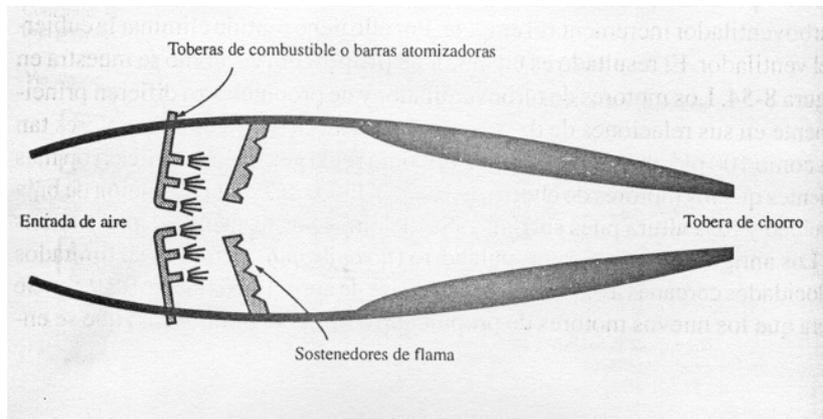
$$\eta = \left(1 + \frac{2c_p T_1}{v_1^2}\right)^{-1}$$



Motor de Turbopropulsión



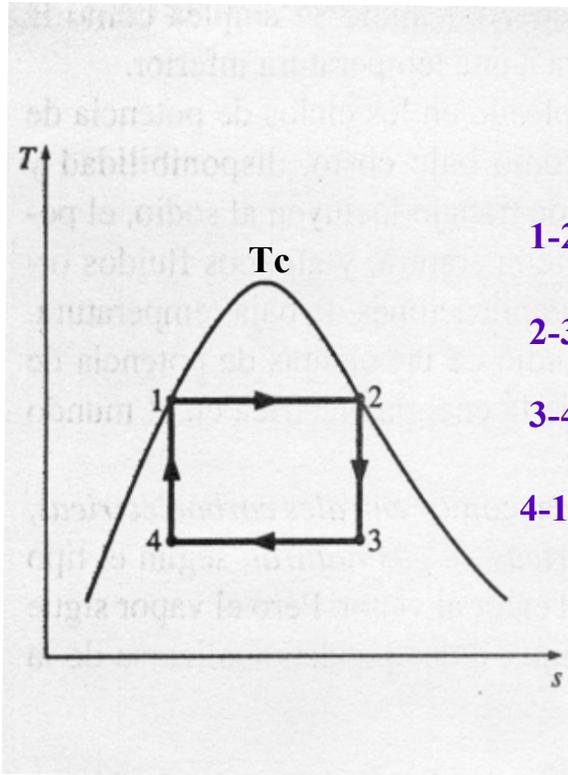
Motor de Estatorreactor



CICLOS DE POTENCIA DE VAPOR

Combustión externa. Flujo Permanente

Diagrama T-s del ciclo de Carnot de vapor



VENTAJAS:

Isotermas coinciden con isóbaras

1-2 Agua vaporiza a P y T ctes en la caldera

2-3 Expansión isoentrópica en la turbina

3-4 Condensación a P y T ctes en el condensador. Licua parte del vapor

4-1 Compresión isoentrópica en el compresor

Dificultades Prácticas:

La Temperatura máxima está limitada por la Tc del agua.

Desgaste de la turbina debido a la cantidad del líquido que aparece durante la expansión

Dificultad de controlar durante la compresión el estado final

No es práctico diseñar compresores que manejen dos fases

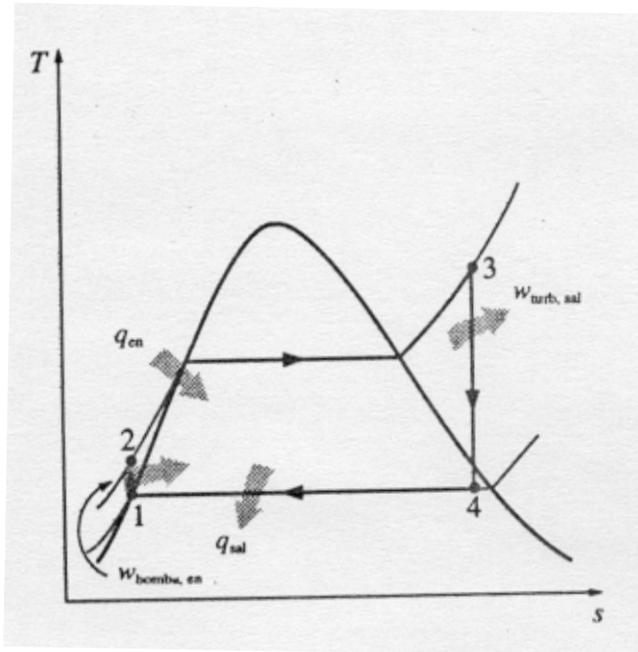
El fluido más usado es el agua

Barato

Poco contaminante

Buenas propiedades Termodinámicas

EL CICLO IDEAL RANKINE SIMPLE



1-2 Compresión isentrópica en una bomba

2-3 Adición de calor a $p=cte$ en una caldera

3-4 Expansión isentrópica en una turbina

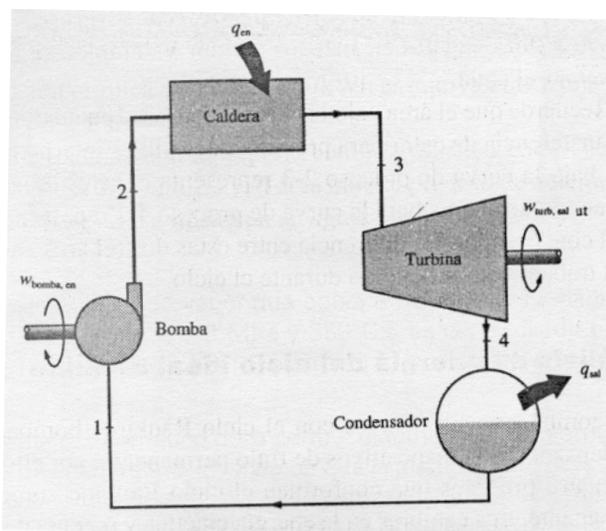
4-1 Cesión de calor a $p=cte$ en un condensador

Basado en el ciclo de Carnot de vapor con las siguientes DIFERENCIAS

➡ El vapor saturado se sigue calentando en la caldera a $p=cte$ hasta el estado 3, con ello en la expansión adiabática el vapor tiene mayor calidad (calidad=fracción molar)

➡ El vapor se licua completamente en el proceso 4-1.

➡ La bomba sólo comprime ya agua líquida, hasta la presión de entrada en la caldera



A la caldera se le denomina generador de vapor.

En la turbina se produce el trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico

El condensador es un intercambiador de calor que cede calor a un medio como un lago, un río o la atmósfera

ANÁLISIS ENERGÉTICO

Ecuaciones de flujo permanente

Se desprecian las variaciones de energía cinética y potencial

$q - w = h_f - h_i$

Por unidad de masa de vapor

Bomba ($q=0$)

$w_{bomba} = h_2 - h_1$

Caldera ($w=0$)

$q_{absorbido} = h_3 - h_2$

Turbina ($q=0$)

$w_{turbina} = h_3 - h_4$

Condensador ($w=0$)

$q_{cedido} = h_4 - h_1$

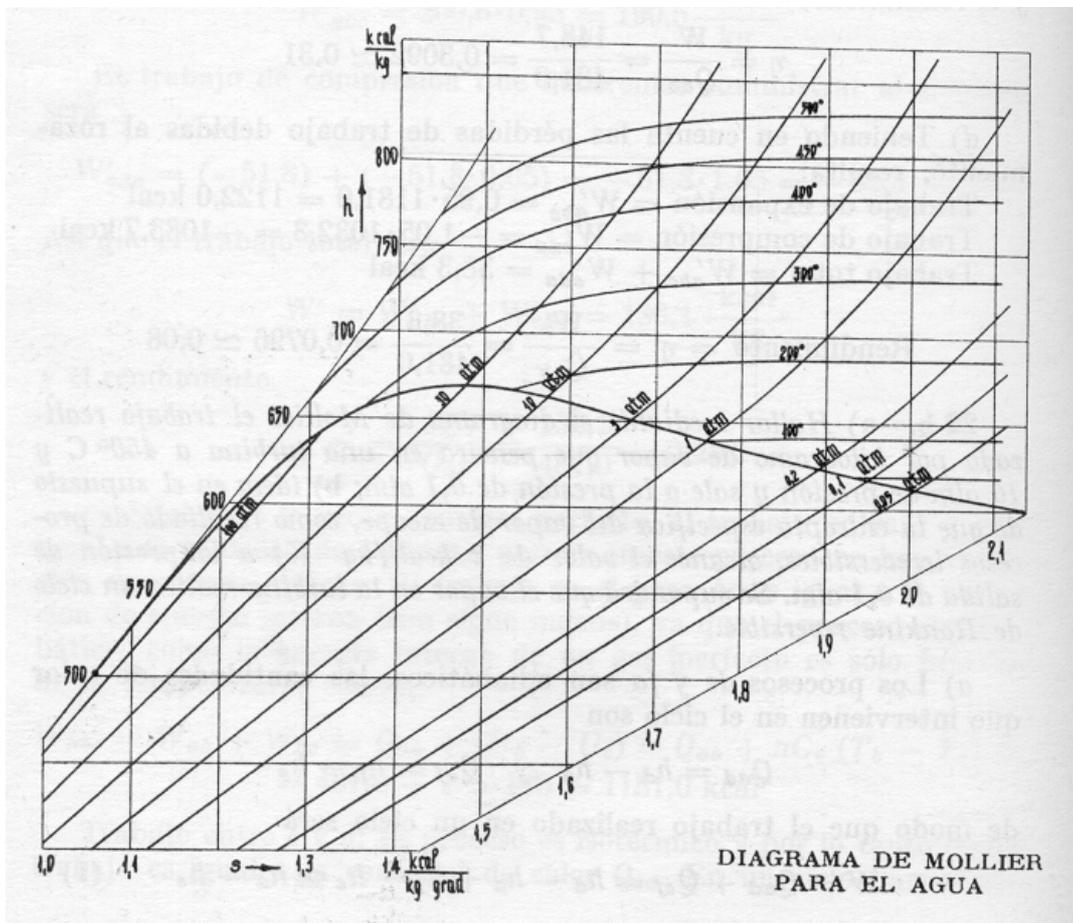
$w_{neto} = q_{abs} - q_{ced} = w_{turb} - w_{bomba}$

DIAGRAMA MOLLIER h-s

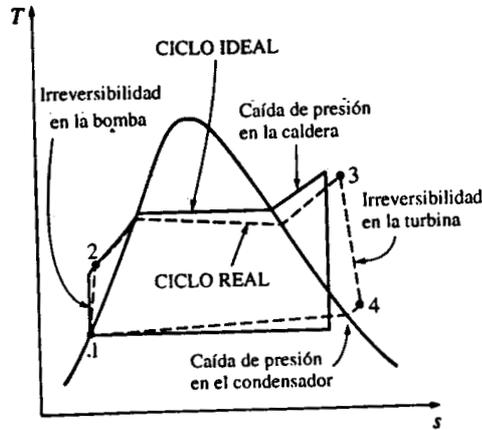
En procesos a $p=cte$ $Q = \Delta h$

En procesos a $s=cte$ $w = \Delta h$

Dentro de la curva de coexistencia coinciden las líneas $p=cte$ y $T=cte$



Desviación del ciclo real de potencia de vapor del ciclo ideal Rankine



Irreversibilidades

Fricción del fluido



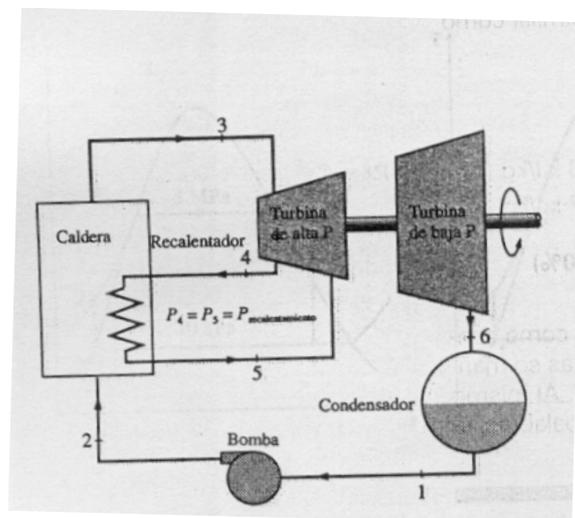
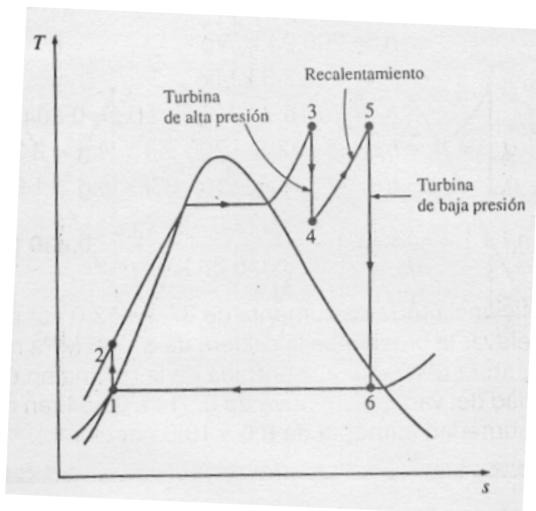
Provoca caídas de presión

Pérdidas de calor indeseadas



Hay que aumentar el calor suministrado en la caldera

El ciclo ideal de Rankine con recalentamiento



Proceso de expansión sucede en dos etapas, ello mejora la calidad del vapor al final del proceso de expansión sin tener que aumentar la temperatura máxima de la caldera.



Hay menos problemas de humedad en la turbina

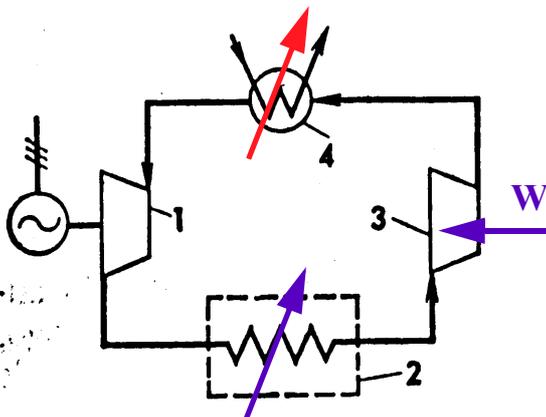
Mejora el rendimiento entre un 4 y un 5%

REFRIGERACIÓN

En general los estudios realizados sobre máquinas térmicas que absorben calor para obtener trabajo pueden trasladarse a las máquinas frigoríficas que absorben trabajo para extraer calor y enfriar un recinto.

Los ciclos frigoríficos pueden trabajar con gases o con una sustancia en equilibrio líquido vapor. La compresión de la sustancia puede ser realizarse de forma alternativa o rotativa.

CICLOS DE REFRIGERACIÓN DE GASES

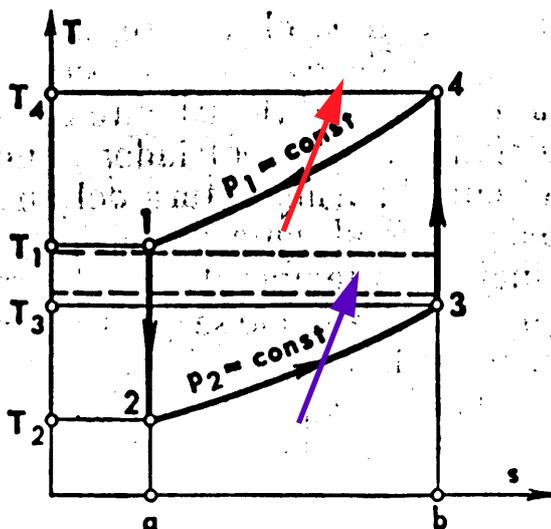


El aire se comprime adiabáticamente en un compresor (3) que puede ser alternativo o rotativo.

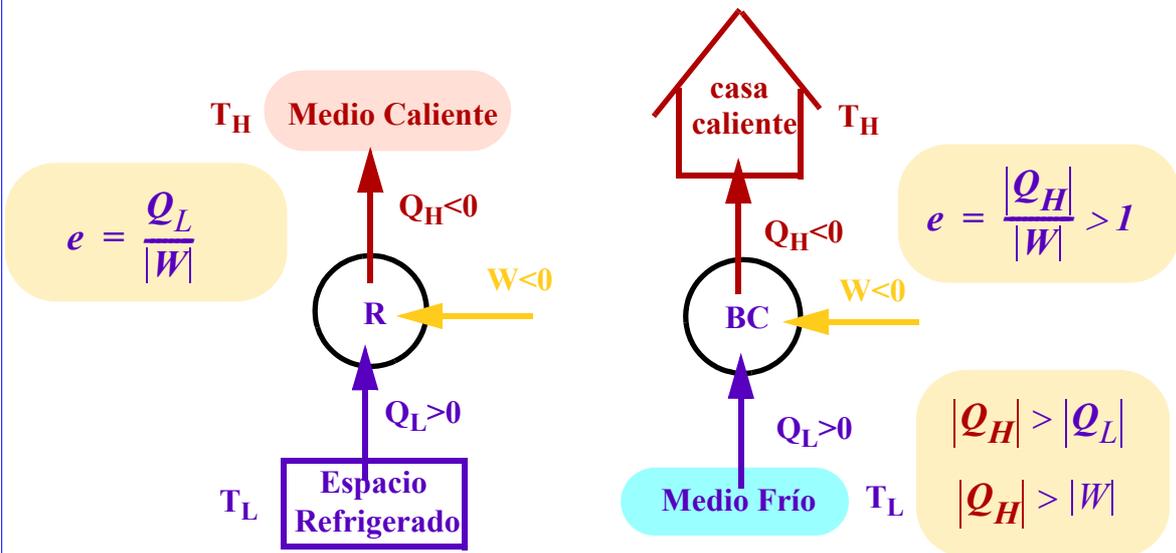
El aire entra en un refrigerador (4) y se enfría.

Posteriormente pasa al expansor (1) donde realiza un trabajo sobre el medio externo. Este trabajo se aprovecha en el turbocompresor para reducir su consumo.

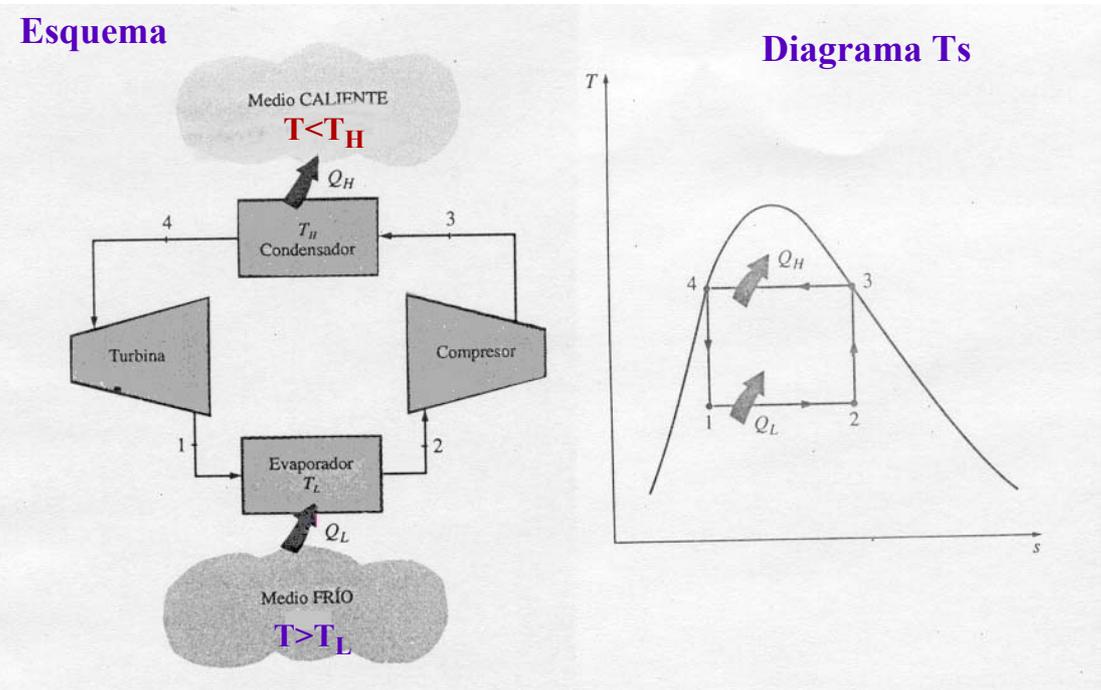
Finalmente pasa al intercambiador (2) donde se calienta y enfría el volumen (2)



CICLOS DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR
Refrigeradores y Bombas de Calor

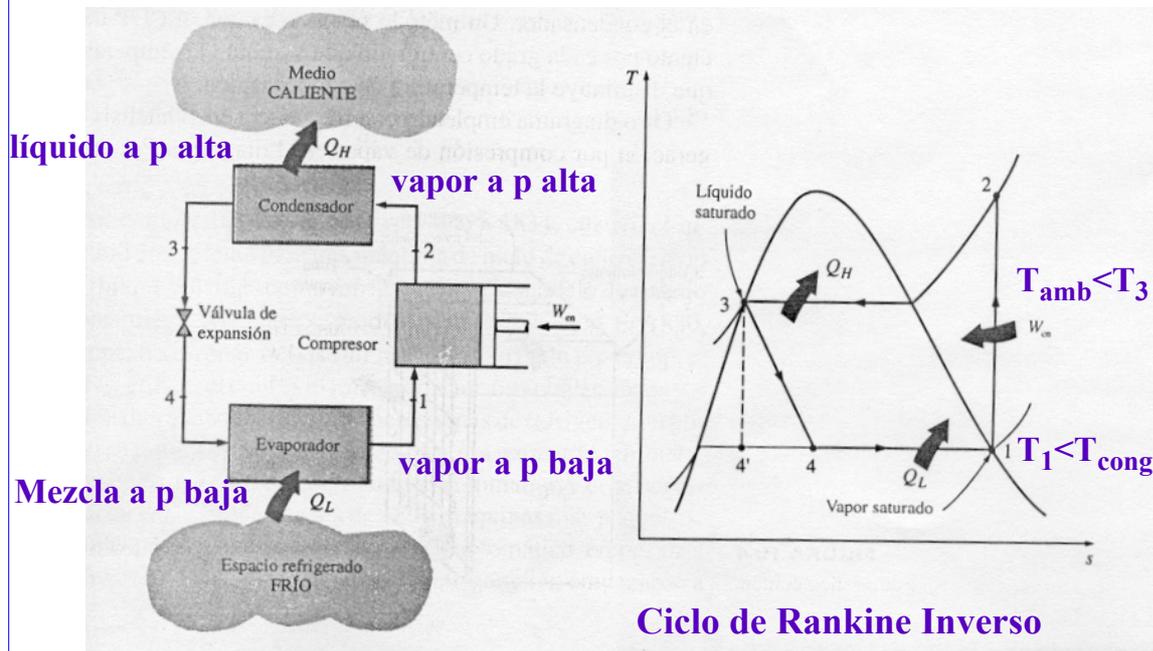


Ciclo inverso de Carnot
Ciclo de refrigeración por compresión de vapor



<p>Refrigerador</p> $e = \frac{ Q_L }{ Q_H - Q_L } = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$	<p>Bomba calor</p> $e = \frac{ Q_H }{ Q_H - Q_L } = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$
<p>Los rendimientos aumentan cuando disminuye la diferencia de T</p>	

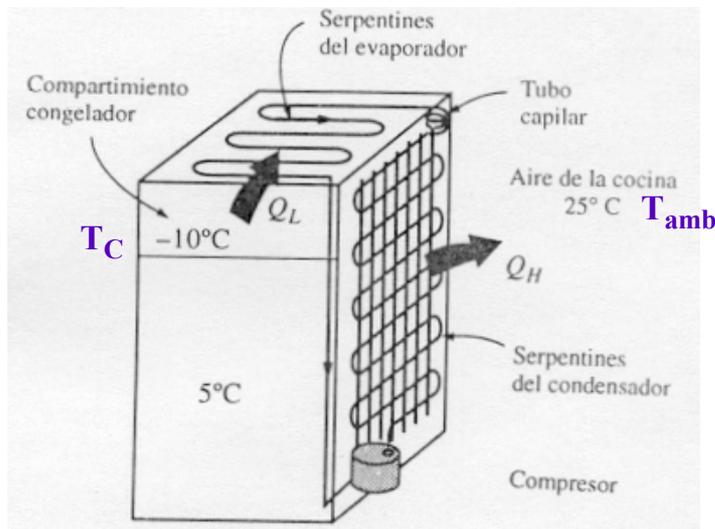
CICLO IDEAL DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR



- 1-2 Compresión isoentrópica del vapor
- 2-3 Cesión de calor por licuación del refrigerante a $p=cte$ en el condensador
- 3-4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión hasta la presión del evaporador proceso irreversible
- 4-1 Absorción de calor a $p=cte$ por evaporación del líquido

$$e = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

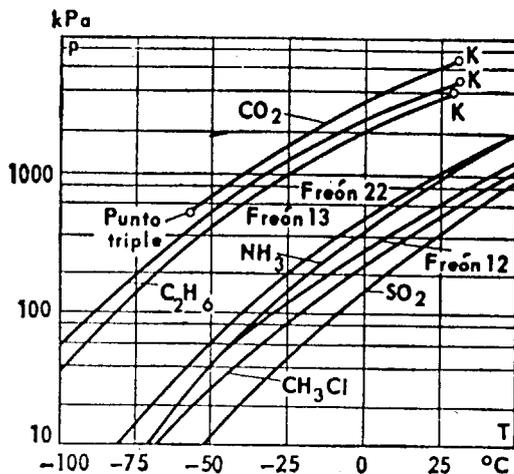
Refrigerador doméstico común



SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE ADECUADO

- ➡ Alta entalpía de vaporización
- ➡ T_v a P baja debe ser inferior a la temperatura del congelador
 T_v a P alta debe ser superior a la temperatura del ambiente
 Pero la relación de presiones no debe ser excesivamente alta para no hacer demasiado trabajo en el compresor
- ➡ P alta debe ser superior al ambiente para que no se filtre aire
- ➡ No tóxico, no corrosivo, no inflamable.
- ➡ Bajo costo
- ➡ Detectabilidad en caso de fuga
- ➡ No dañar la capa de ozono

Curva de vaporización



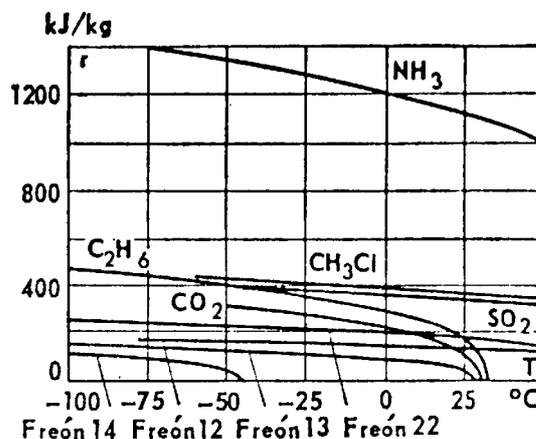
Dióxido de azufre
 Cloruro de metilo
 Cloruro de etilo



Altamente tóxicos

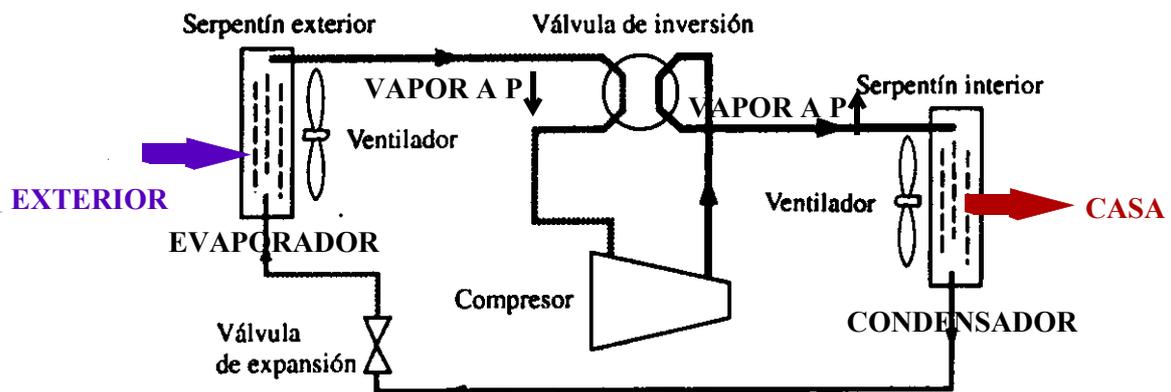
Calor latente

El amoniaco se ha usado durante mucho tiempo

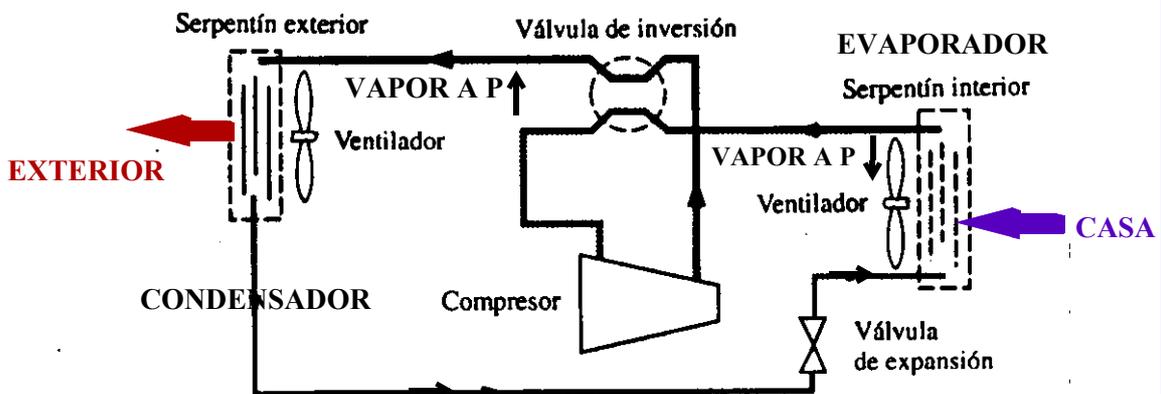


BOMBA DE CALOR. DOBLE FUNCIÓN

OPERACIÓN DE LA BOMBA DE CALOR - MODO DE CALENTAMIENTO



OPERACIÓN DE LA BOMBA DE CALOR - AIRE ACONDICIONADO

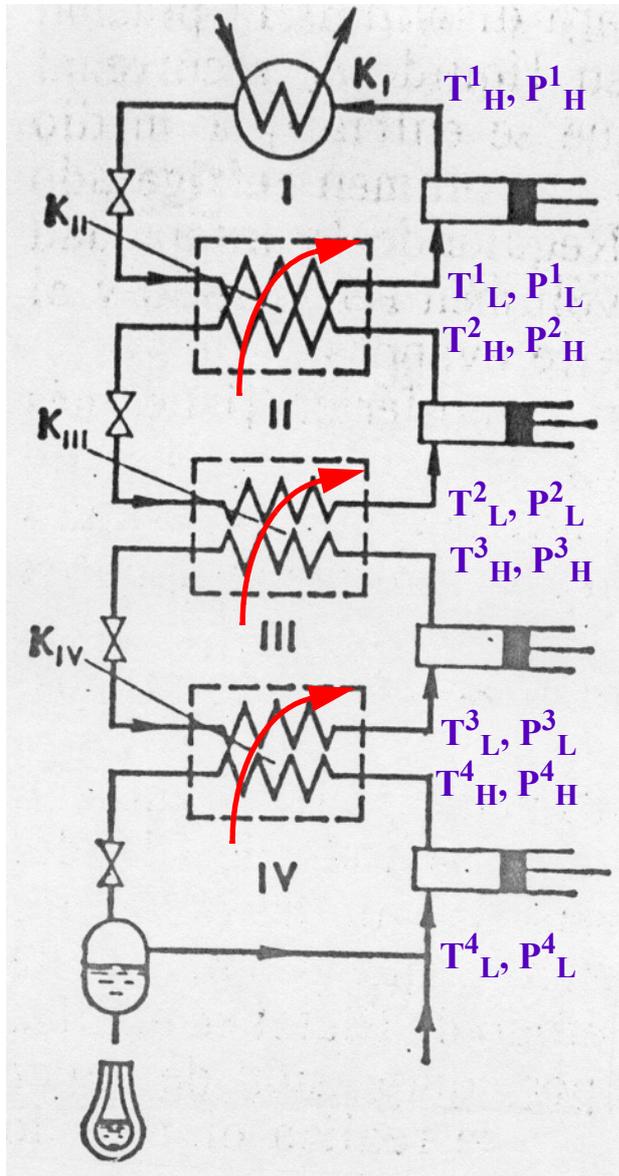


➡ La válvula de inversión invierte el sentido de la circulación, el condensador pasa a ser el evaporador en verano.

➡ Son útiles en lugares en los que la temperatura exterior en invierno no sea excesivamente baja.

LICUACIÓN DE GAS EN CASCADA. MÉTODO PICTET (1887)

Es una combinación de varios ciclos frigoríficos por compresión de vapor



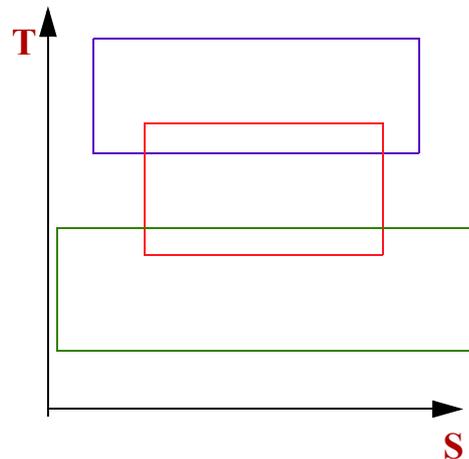
Los distintos agentes frigoríficos en cada ciclo tienen cada vez una temperatura de ebullición menor para la misma presión.

$$T^2_L < T^1_L \quad T^3_L < T^2_L$$

A alta presión la temperatura de ebullición del siguiente tiene que ser superior a la de ebullición del anterior a presión baja.

$$T^1_L < T^2_H \quad T^2_L < T^3_H$$

El número de ciclos depende del gas que se desea licuar

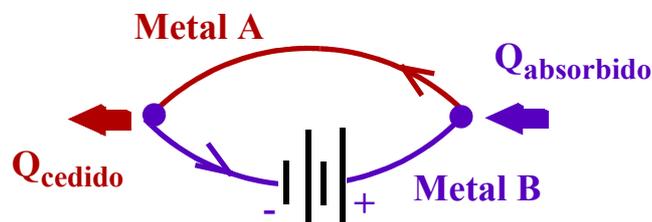


Sustancia	Amoníaco	Etileno	Oxígeno	Aire	Nitrógeno	Hidrógeno	Helio
T_v (K)	239.6	169.25	90.2	80	75	20	4

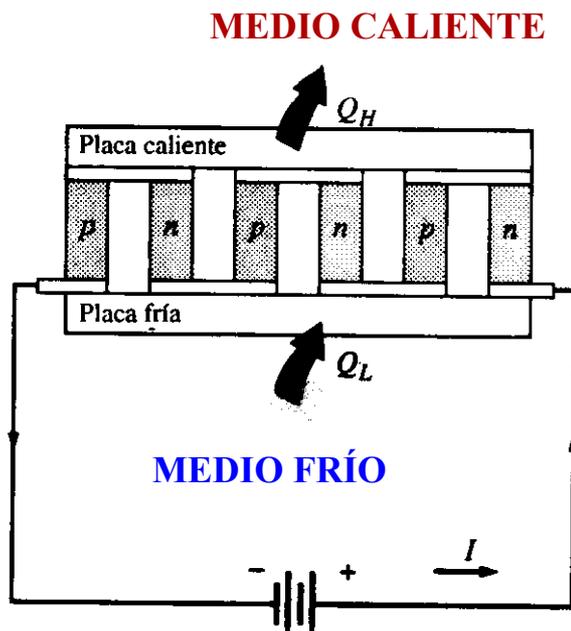
REFRIGERADOR TERMOELÉCTRICO

Si dos alambres de diferentes metales se unen en ambos extremos (soldaduras) formando un circuito cerrado y se hace pasar una corriente a través de dicho circuito, aparece una diferencia de temperatura entre las soldaduras. Efecto Peltier.

Es el efecto inverso al conocido efecto Seebeck: Cuando existe una diferencia de temperatura entre las uniones de dos materiales diferentes, una corriente fluye por el circuito creando una diferencia de potencial entre dichas soldaduras



REFRIGERADOR TERMOELÉCTRICO DE SEMICONDUCTOR



No tienen una eficiencia térmica grande

Se usan para enfriar zonas pequeñas