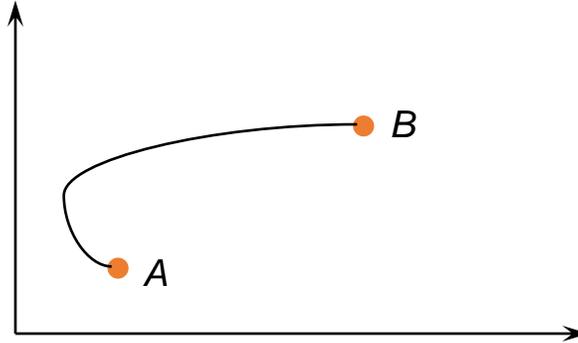


Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica

Dado un proceso cualquiera entre los estados A y B :



la **primera ley** de la Termodinámica establece que durante el proceso el sistema y los alrededores pueden intercambiar **energía** en distintas formas, pero su **valor total (en el universo)** permanece **constante (universo = sistema + alrededores)** ya que la energía no se crea ni se destruye.

Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica

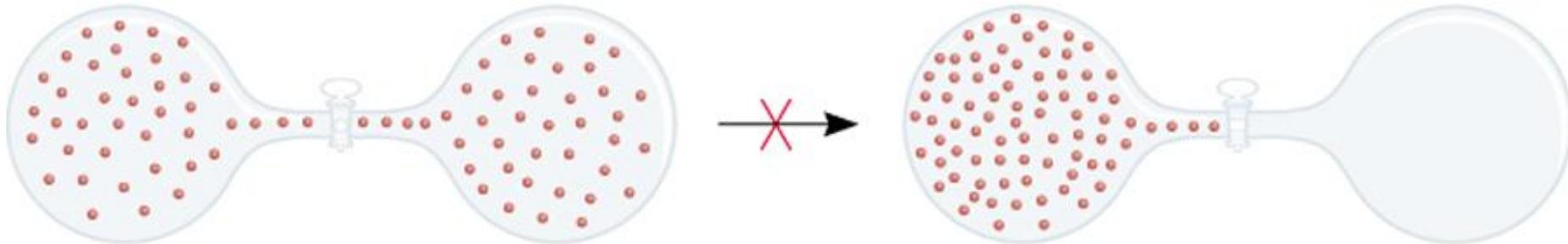
La primera ley no establece nada respecto de la "dirección" del proceso.

No es posible deducir del enunciado de la primera ley si es factible que el proceso ocurra naturalmente en el sentido $A \rightarrow B$ o en el sentido contrario $B \rightarrow A$

Proceso Espontáneo (es factible)



Proceso No Espontáneo (no es factible)



El sentido / dirección de los procesos naturales es analizada por la Segunda Ley de la Termodinámica.

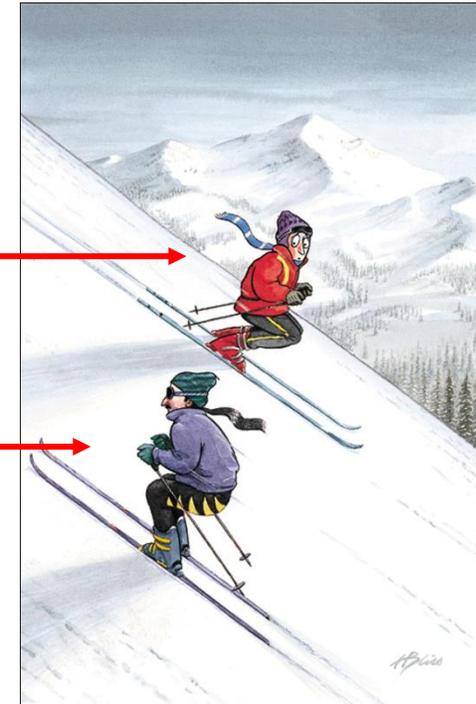
Evidencias experimentales

- Una cascada corre cuesta abajo
- Un terrón de azúcar se disuelve en una taza de café
- El calor fluye de un objeto más caliente a un objeto más frío
- Un gas se expande en una bombilla al vacío
- El hierro expuesto al oxígeno y agua forma herrumbre

espontáneo



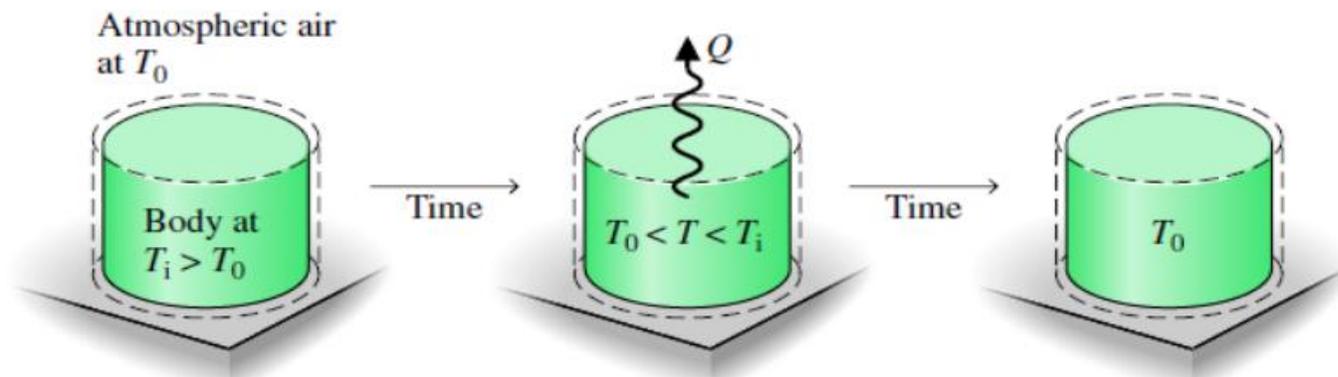
no espontáneo



Evidencias experimentales

Un cuerpo/recipiente que se encuentra a una temperatura T distinta de la ambiente T_0 ($T - T_0 \neq 0$) se calentará o enfriará hasta anular la diferencia de temperatura con el medio ($T - T_0 = 0$).

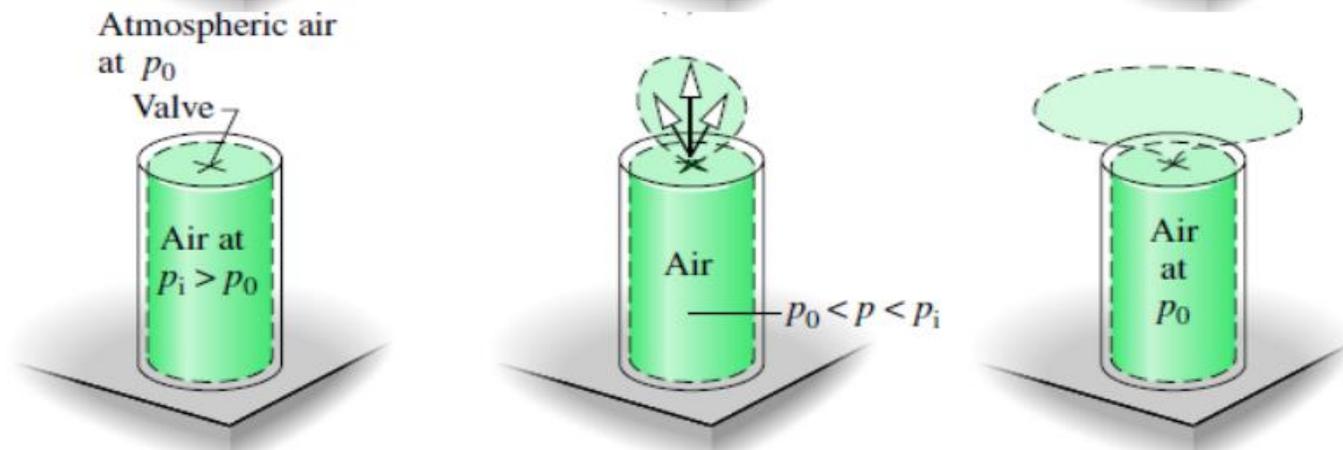
El proceso inverso no se producirá en forma natural (proceso no factible).



Evidencias experimentales

Si se abre la válvula de un cilindro que contiene un gas a presión $P > P_0$, el gas expandirá espontáneamente hasta alcanzar la presión atmosférica ($P = P_0$), dispersando su energía al medio circundante.

Nuevamente el proceso inverso no se producirá (proceso no factible), a menos que se consuma energía para comprimir al gas.



Evidencias experimentales

Si se agregan a un recipiente cantidades iguales de una solución acuosa de NaCl al 2% y otra al 4%, se obtendrá una solución uniforme al 3%.

El proceso inverso de separación de la solución uniforme en dos de distinta concentración no se producirá por sí sólo (proceso no factible).

Los procesos naturales se producen en la dirección que disminuye la diferenciación (y aumenta el desorden), anulando gradientes o fuerzas impulsoras.

El universo tiende a distribuir la energía uniformemente.

No todo proceso que cumpla con la primera Ley puede ocurrir espontáneamente

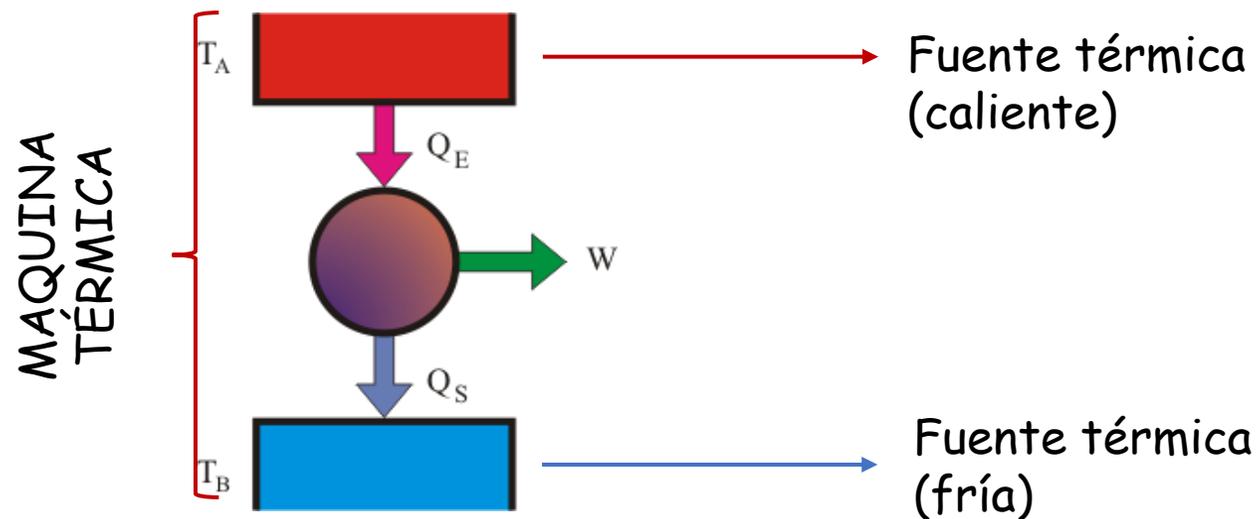


2° Ley de la Termodinámica

Algunas definiciones

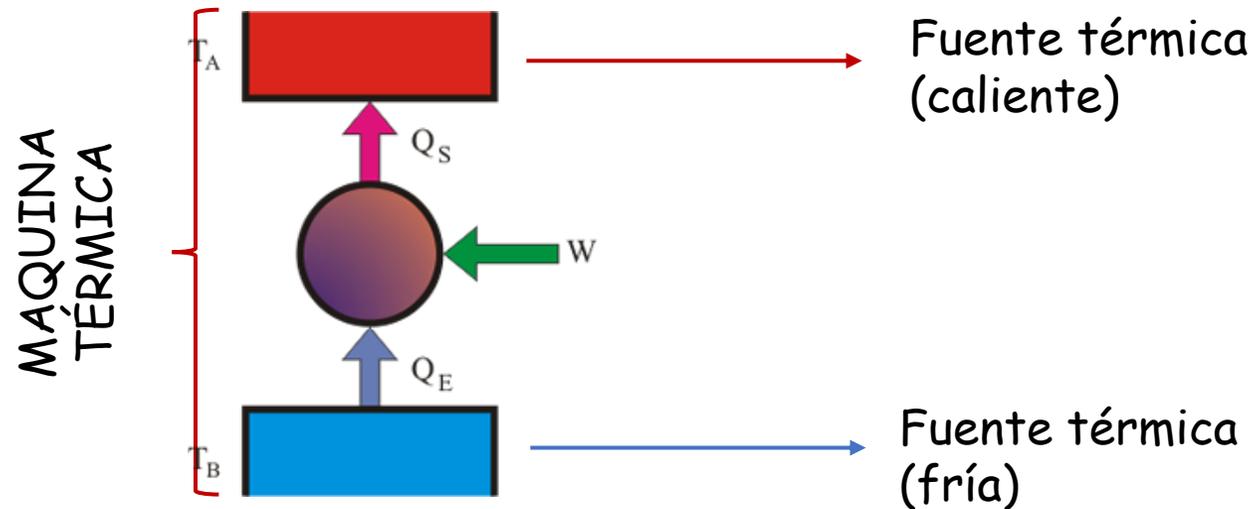
FUENTE TÉRMICA: Es una fuente o sumidero de calor de donde se puede extraer o a donde se puede ceder calor sin que su temperatura varíe. Podemos considerar que la fuente térmica tiene una capacidad calorífica grande (masa grande) respecto de la cantidad de calor cedida o recibida, de manera que su temperatura puede permanecer constante aunque intercambie calor.

MÁQUINA TÉRMICA: Dispositivo que tiene por objetivo transformar calor en trabajo mecánico. El calor proviene en general de la combustión de un material combustible. Dicho calor es absorbido por un fluido que cumple un proceso cíclico, entregando parte de la energía recibida como trabajo mecánico.



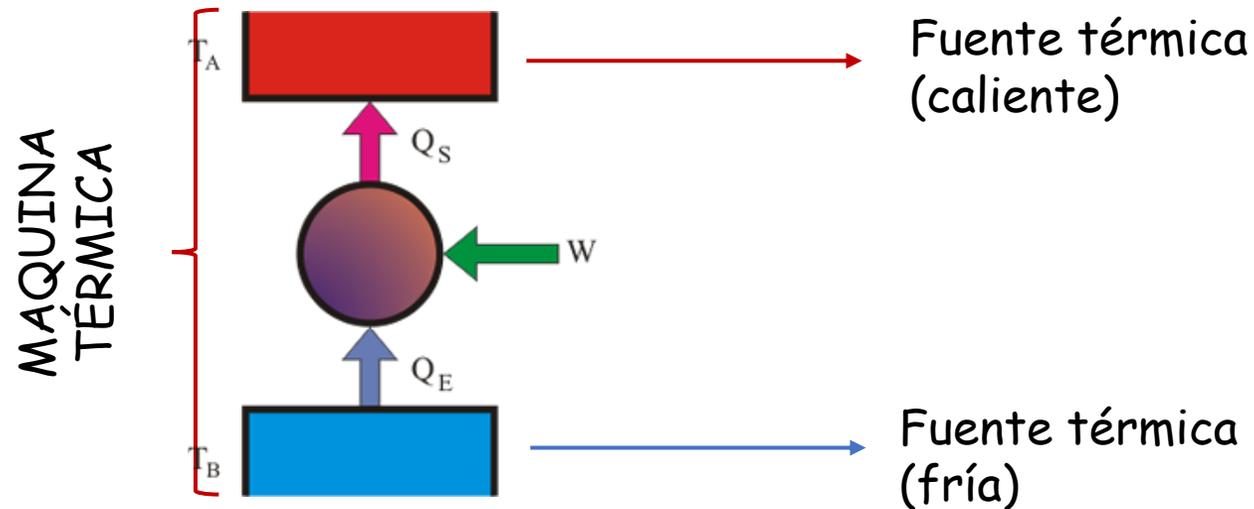
Algunas definiciones

MÁQUINA FRIGORÍFICA: Dispositivo que tiene por objetivo mantener un recinto a una temperatura menor que la exterior, utilizando energía mecánica para quitar calor del recinto que quiere mantenerse a baja temperatura.



Algunas definiciones

BOMBA DE CALOR: Dispositivo que tiene por objetivo mantener un recinto a una temperatura mayor que la de su entorno, utilizando energía mecánica para quitar calor del exterior e inyectándolo en el interior del recinto. Similar a la máquina frigorífica

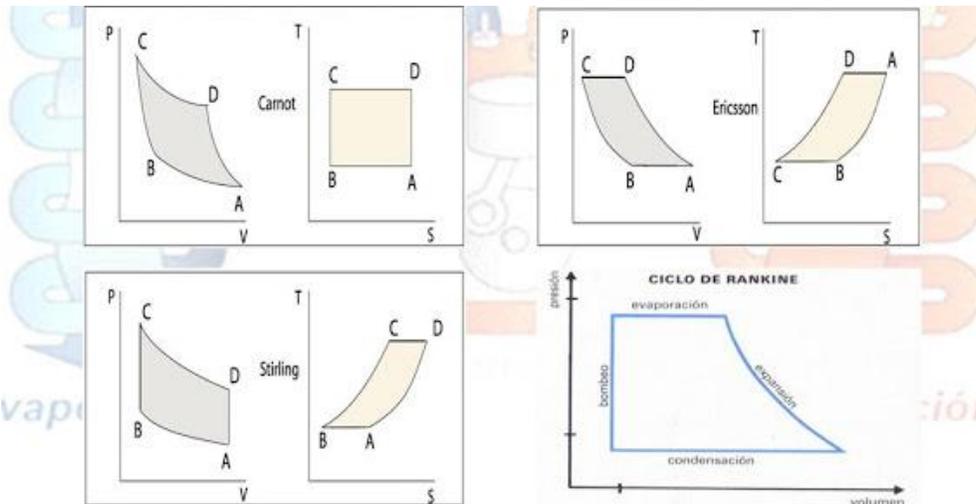


DEFINICIÓN IMPORTANTE

TODA MÁQUINA TÉRMICA (O FRIGORÍFICA O BOMBA DE CALOR) OPERA DE FORMA CÍCLICA, ES DECIR QUE SUFRE UNA SERIE DE PROCESOS TERMODINÁMICOS TALES QUE, AL FINAL DE ELLOS, EL SISTEMA REGRESA A SU ESTADO INICIAL



LA VARIACIÓN DE TODAS LAS FUNCIONES DE ESTADO A LO LARGO DEL CICLO DEBE SER IGUAL A CERO



$$\Delta U_{ciclo} = 0$$

$$\Delta P_{ciclo} = 0$$

$$\Delta V_{ciclo} = 0$$

$$\Delta T_{ciclo} = 0$$

$$\Delta H_{ciclo} = 0$$

Observaciones de Carnot

Nicolás Sadi Carnot (1796 - 1832)

- En 1824 publica "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego".
- Estudia los motores de vapor ingleses y descubre que la eficiencia del motor aumenta mientras mayor es la diferencia de temperaturas entre el vapor caliente y la temperatura ambiente
- Para que una máquina térmica produjera trabajo mecánico continuo es necesario que intercambie calor entre dos fuentes.
- Descubre que la eficiencia no depende del fluido utilizado sino de la diferencia de temperaturas entre la fuente caliente y la fría



$$\eta_{ciclo} = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}$$

Rudolph Clausius (1822-1888)

- Clausius publicó su libro *Sobre la fuerza motriz del calor*.
- En que estableció otro de los principios de la termodinámica.
- El calor no puede fluir espontáneamente de un cuerpo frío a uno caliente. O...

“No hay ninguna transformación termodinámica cuyo único efecto sea transferir calor de un foco frío a otro caliente.”



... y las heladeras?

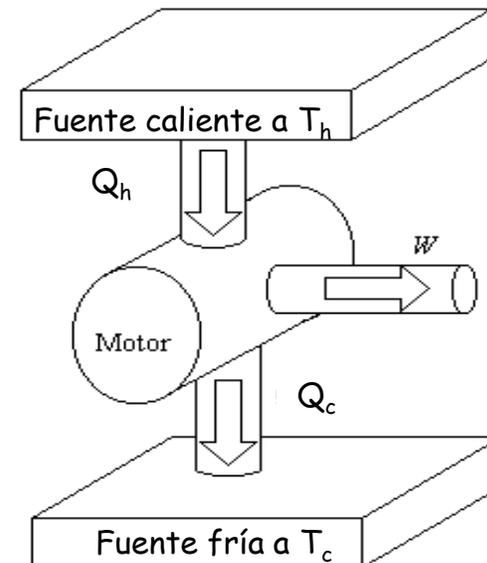


William Thomson o Lord Kelvin (1824-1907)

Una máquina térmica produce trabajo a partir del calor en un **proceso cíclico** durante el cual:

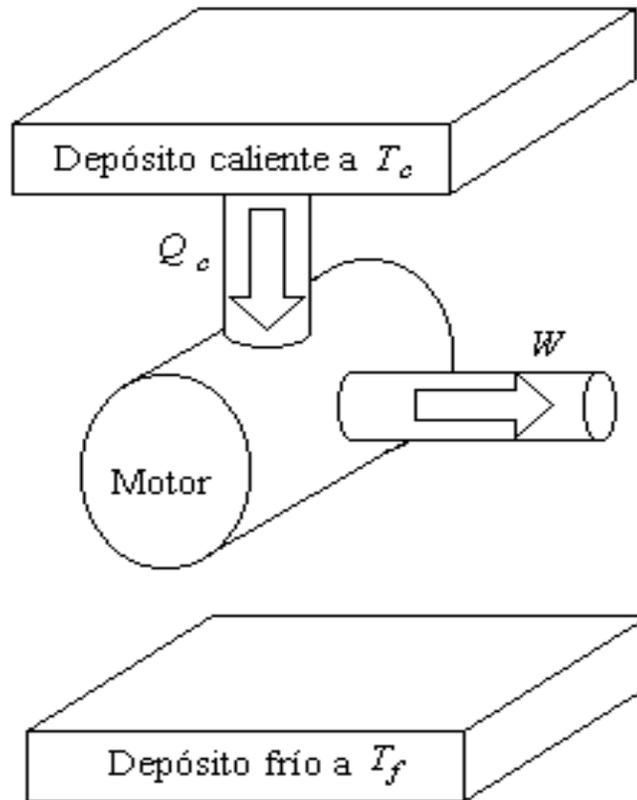
1. la energía térmica se absorbe de una fuente a alta temperatura,
2. la máquina realiza trabajo, y
3. la máquina expulsa energía térmica a una fuente de menor temperatura.

No hay ninguna transformación termodinámica cuyo único efecto sea extraer calor de un foco y convertirlo totalmente en trabajo.



Enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica

Es imposible construir una máquina térmica que, operando en un ciclo, no produzca otro efecto que la absorción de energía térmica de un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo.

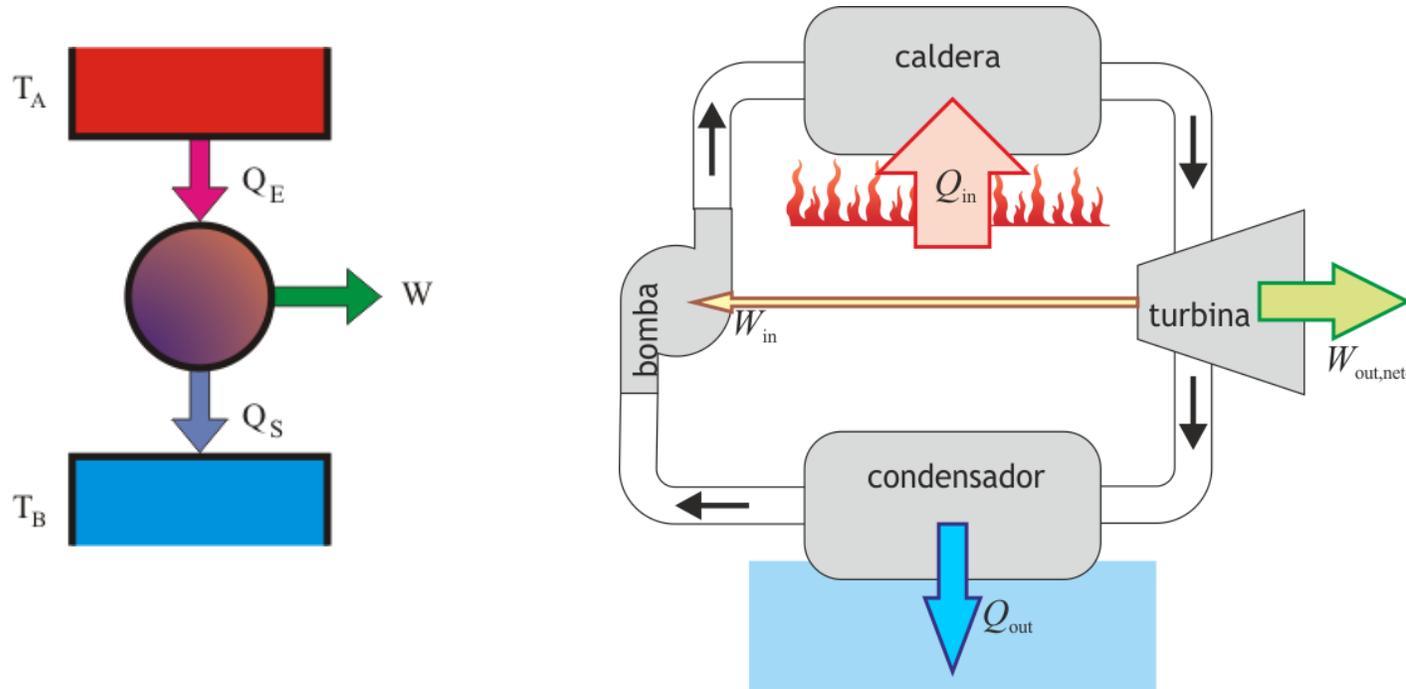


Max Planck (1858-1947)



$$\eta_{ciclo} = \frac{W}{Q_{hot}} < 1$$

Máquina térmica



$$\Delta U_{ciclo} = Q + W = 0$$

$$Q = -W$$

$$|Q| = |W|$$

$$|W| = |Q_H| - |Q_C|$$

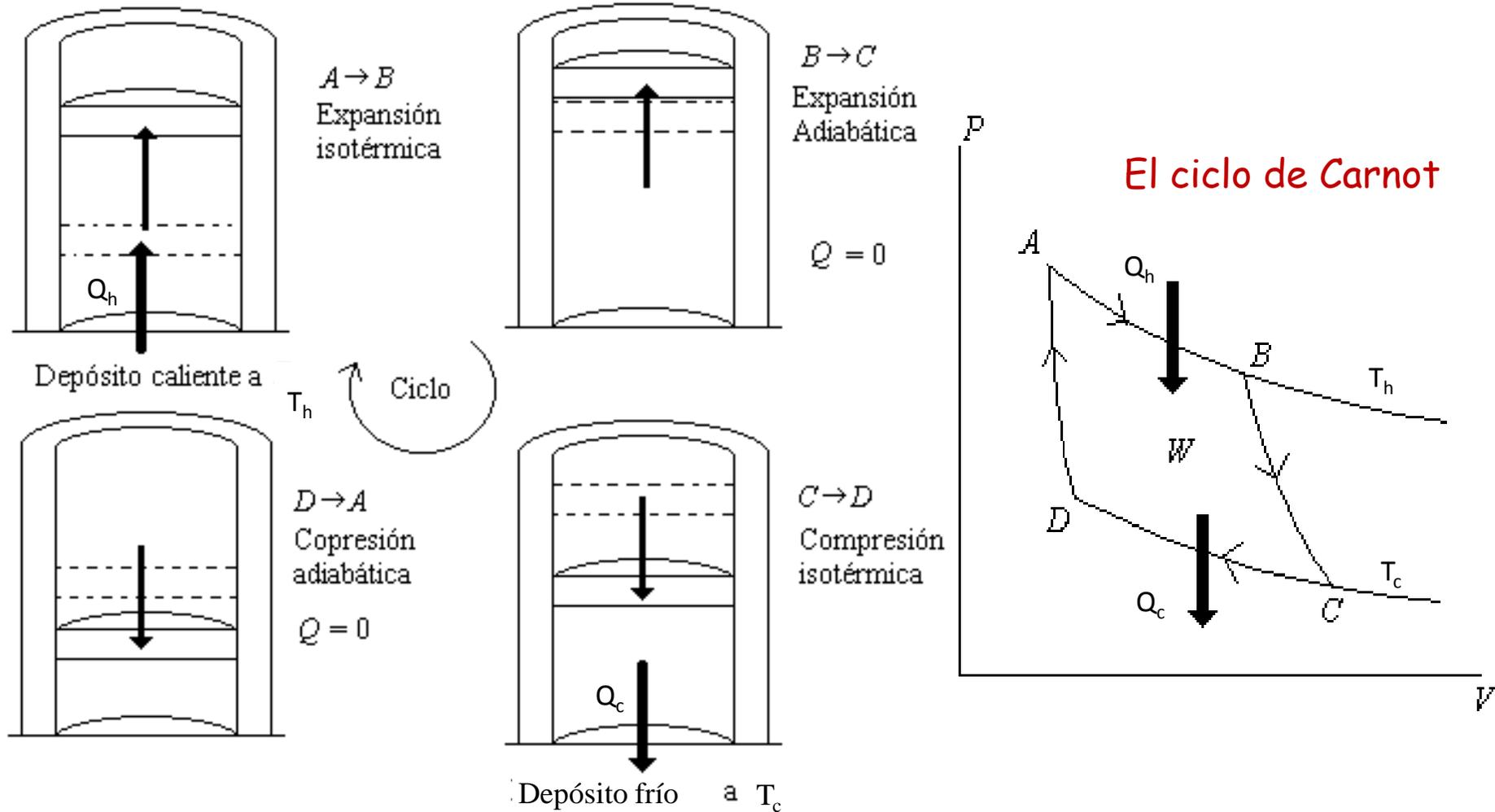
$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|}$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

$$\eta = \frac{|Q_H| - |Q_C|}{|Q_H|}$$

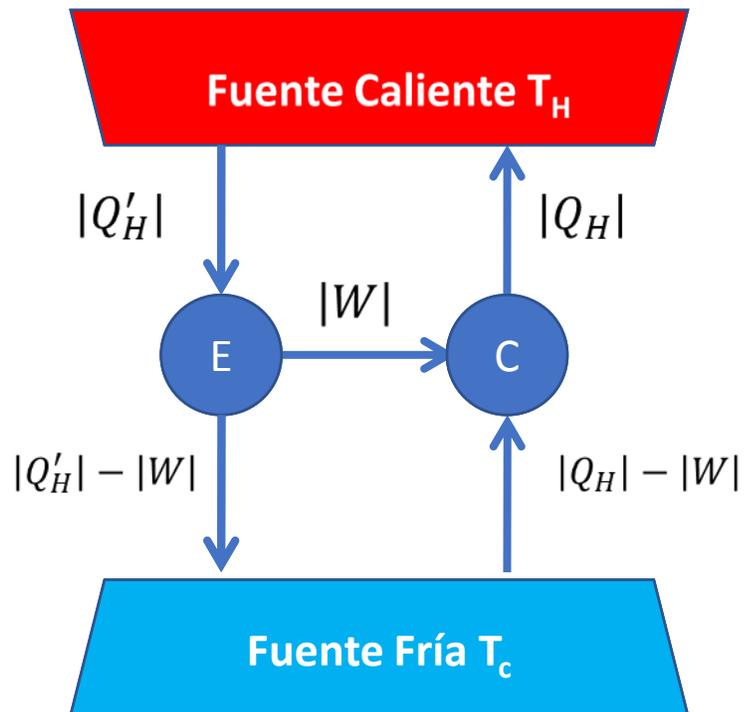
1. Caldera: intercambiador de calor a presión constante, normalmente lleva un líquido a un vapor sobrecalentado
2. Turbina: equipo donde se produce una expansión súbita que genera trabajo
3. Condensador: intercambiador de calor a presión constante, normalmente convierte un vapor saturado o una mezcla LV en líquido
4. Bomba: equipo donde se comprime líquido consumiendo trabajo

La máquina de Carnot



La máquina de Carnot

Ninguna máquina térmica real que opera entre dos depósitos térmicos puede ser más eficiente que una máquina de Carnot operando entre los mismos dos depósitos.



$$\frac{|W|}{|Q'_H|} > \frac{|W|}{|Q_H|}$$

$$|Q'_H| < |Q_H|$$

Calor extraído de fuente fría

$$|Q_H| - |W| - (|Q'_H| - |W|) = |Q_H| - |Q'_H|$$

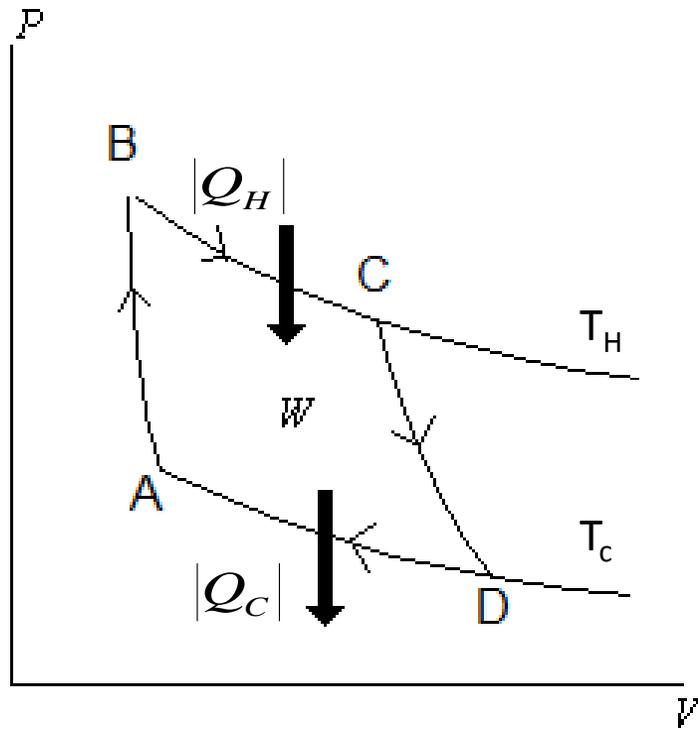
Calor absorbido por la fuente caliente

$$|Q_H| - |Q'_H|$$

Si hubiese una máquina térmica más eficiente que la máquina de Carnot acoplada, habría una acumulación neta de calor en la fuente caliente

El ciclo de Carnot

Cálculos con gases ideales



Isotérmicas

$$Q = RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

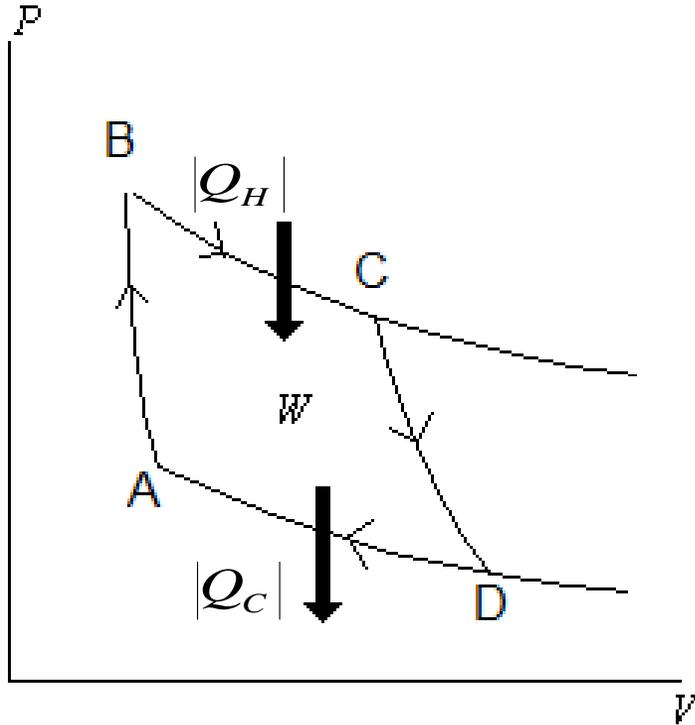
$$|Q_H| = RT_H \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$$

$$|Q_C| = RT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)$$

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{RT_H \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)}{RT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)}$$

El ciclo de Carnot

Cálculos con gases ideales



Adiabáticas

$$C_v dT = dQ + dW$$

$$C_v dT = -\frac{RT}{V} dV$$

$$\int \frac{C_v}{R} \frac{dT}{T} = \int -\frac{dV}{V}$$

$$A \rightarrow B \quad \int_{T_C}^{T_H} \frac{C_v}{R} \frac{dT}{T} = -\ln \frac{V_b}{V_a} = \ln \frac{V_a}{V_b}$$

$$C \rightarrow D \quad \int_{T_H}^{T_C} \frac{C_v}{R} \frac{dT}{T} = -\ln \frac{V_d}{V_c} \quad \int_{T_C}^{T_H} \frac{C_v}{R} \frac{dT}{T} = \ln \frac{V_d}{V_c}$$

$$\ln \frac{V_a}{V_b} = \ln \frac{V_d}{V_c} \quad \frac{V_a}{V_b} = \frac{V_d}{V_c} \quad \frac{V_c}{V_b} = \frac{V_d}{V_a}$$

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{RT_H \ln \left(\frac{V_C}{V_B} \right)}{RT_C \ln \left(\frac{V_D}{V_A} \right)}$$

$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C}$$

El ciclo de Carnot

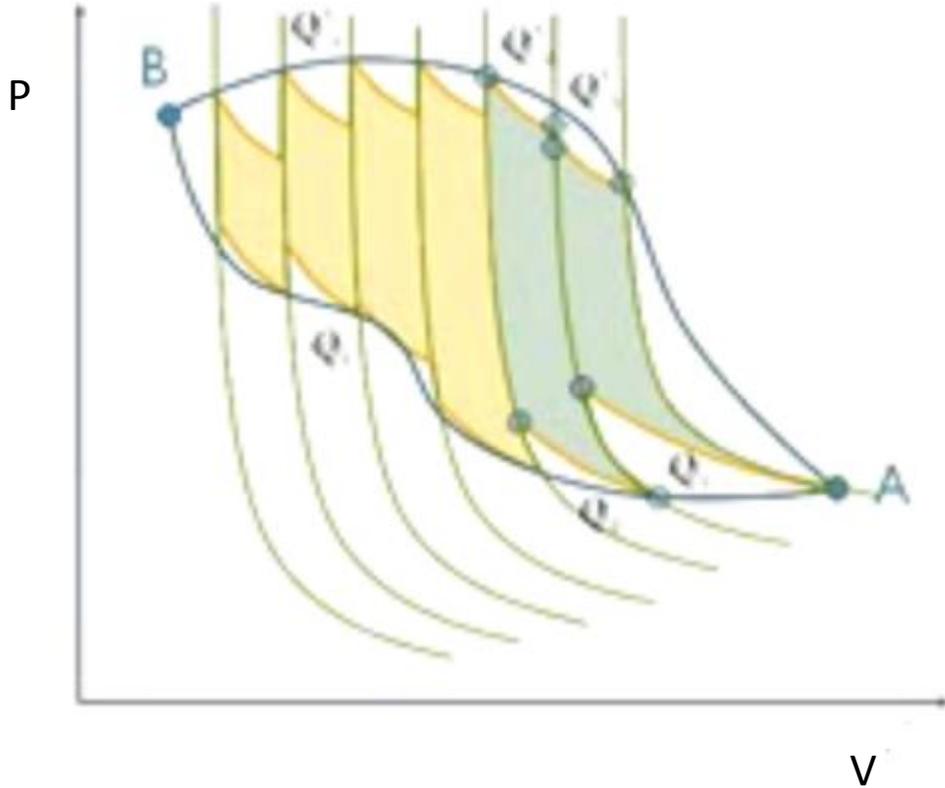
Cálculos con gases ideales

$$\eta \equiv 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

**Eficiencia del
ciclo de Carnot**

$$\eta \equiv 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Definición de Entropía



$$\frac{|Q_H|}{|Q_C|} = \frac{T_H}{T_C}$$

$$\frac{Q_H}{T_H} = -\frac{Q_C}{T_C}$$

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$$

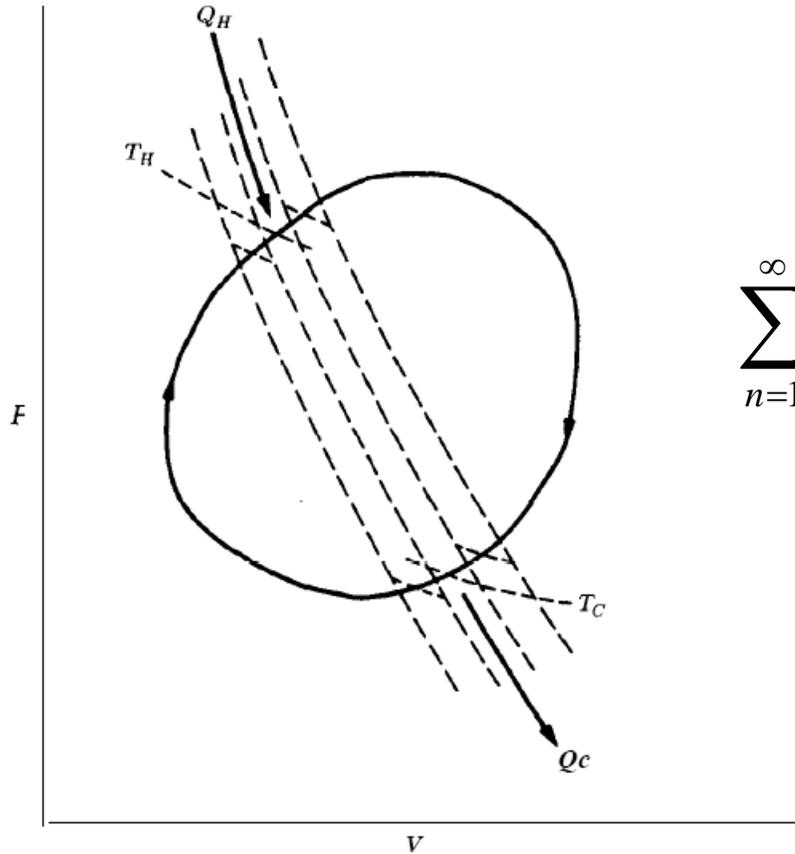
$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$$

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$$

$$\sum_{n=1}^n \left(\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} \right) = 0$$

Cualquier ciclo termodinámico puede ser considerado como la suma de infinitos ciclos de Carnot superpuestos

Definición de Entropía



$$\frac{dQ_H}{T_H} + \frac{dQ_C}{T_C} = 0$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{dQ_H}{T_H} + \frac{dQ_C}{T_C} \right) = 0$$

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0$$

$$dS^t = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

ENTROPÍA



Función de estado

Si $dQ_{rev} = 0$,
entonces $dS = 0$

Proceso isoentrópico

Definición de Entropía

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$$

Analogía de la entropía como un estornudo (Atkins)

El agregado de calor puede ser entendido como un estornudo y la temperatura de la fuente donde se lo deposita difiere

Un estornudo en una calle ruidosa casi no se percibe

$$\frac{Q_H}{T_H} = \Delta S_H$$

El impacto del flujo de calor es mayor en una fuente fría que en una fuente caliente

Un estornudo en una biblioteca produce mucha perturbación

$$\frac{Q_C}{T_C} = \Delta S_C$$

Definición de Entropía

$$dS^t = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{dQ_H}{T_H} + \frac{dQ_C}{T_C} \right) = 0 \quad \oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0$$

$$\Delta S = \int_1^2 dS^t = \int_1^2 \frac{dQ_{rev}}{T}$$

Sistema cerrado
Proceso reversible

Hemos logrado expresar la
Primera Ley como combinación
de funciones de estado!

$$dU = dQ_{rev} + dW_{rev} = TdS - PdV$$

Cálculo de diferencias de Entropía

1. **Proceso cíclico.** Como S es una función de estado, $\Delta S = 0$ en todo proceso cíclico.
2. **Proceso adiabático reversible.** En este caso, $dq_{\text{rev}} = 0$; por tanto,

$$\underline{\Delta S = 0} \quad \text{proceso adiabático reversible} \quad (3.23)$$

Dos de las cuatro etapas de un ciclo de Carnot son procesos adiabáticos reversibles.

3. **Cambio de fase reversible a T y P constantes.** A T constante, (3.21) da lo siguiente:

$$\underline{\Delta S = \int_1^2 \frac{dq_{\text{rev}}}{T} = \frac{1}{T} \int_1^2 dq_{\text{rev}} = \frac{q_{\text{rev}}}{T}} \quad (3.24)$$

q_{rev} es el calor latente de la transición. Al ser P constante, $q_{\text{rev}} = q_p = \Delta H$ [Ec. (2.46)]; por consiguiente,

$$\underline{\Delta S = \frac{\Delta H}{T}} \quad \text{cambio de fase reversible a } T \text{ y } P \text{ constante} \quad (3.25)$$

Cálculo de diferencias de Entropía

4. **Proceso isotérmico reversible.** T es constante y $\Delta S = \int_1^2 T^{-1} dq_{\text{rev}} = T^{-1} \int_1^2 dq_{\text{rev}} = q_{\text{rev}}/T$. Por tanto,

$$\underline{\Delta S = q_{\text{rev}}/T \quad \text{proceso isotérmico reversible} \quad (3.27)}$$

Los ejemplos incluyen un cambio de fase reversible (caso 3 en esta lista) y dos de las cuatro etapas del ciclo de Carnot.

Cálculo de diferencias de Entropía

5. **Cambio de estado reversible de un gas ideal.** De la primera ley y la Sección 2.8, tenemos para un proceso reversible en un gas perfecto:

$$dq_{\text{rev}} = dU - dw_{\text{rev}} = C_V dT + P dV = C_V dT + nRT dV/V \quad (3.28)$$

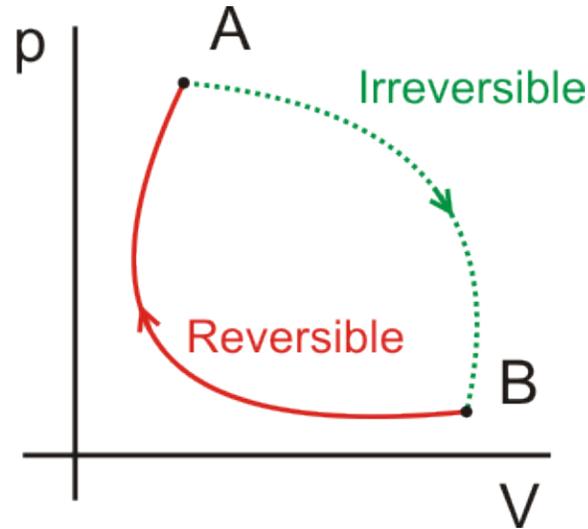
$$dS = dq_{\text{rev}}/T = C_V dT/T + nR dV/V$$

$$\Delta S = \int_1^2 C_V(T) \frac{dT}{T} + nR \int_1^2 \frac{dV}{V}$$

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_V(T)}{T} dT + nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{gas ideal} \quad (3.29)$$

$$\frac{\Delta S}{R} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p^{gi}(T)}{R} \frac{dT}{T} - \ln \frac{P_2}{P_1} \quad \text{gas ideal}$$

Entropía, reversibilidad e irreversibilidad



En un proceso reversible, la entropía no aumenta ni disminuye

Imaginemos un proceso reversible

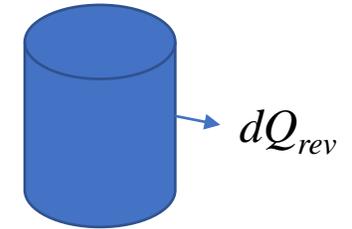
$$\Delta S_{univ} = \Delta S_{sist} + \Delta S_{ent}$$

$$dS_{univ} = dS_{sist} + dS_{ent}$$

$$dS_{univ} = \frac{dQ_{rev}}{T_{sist}} + \frac{-dQ_{rev}}{T_{ent}}$$

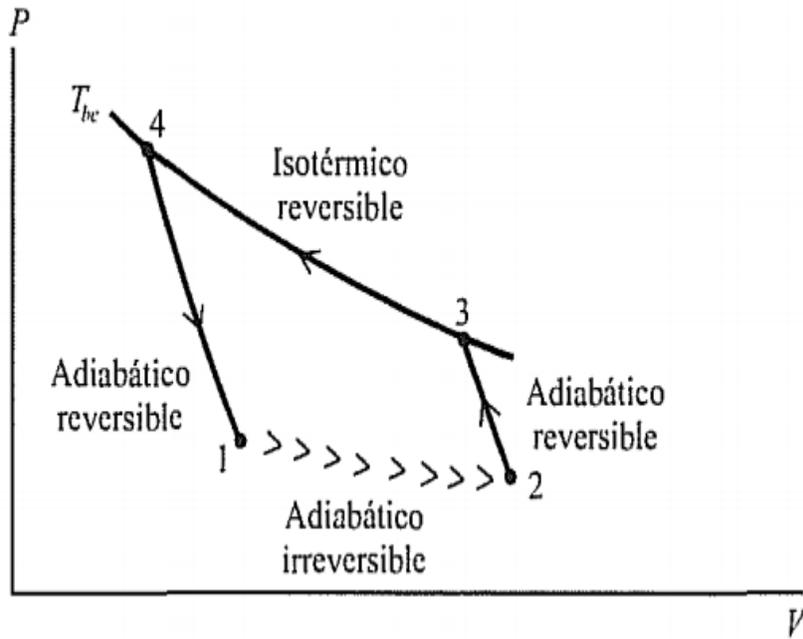
$$dS_{univ} = \frac{dQ_{rev}}{T_{sist}} + \frac{-dQ_{rev}}{T_{sist}} = 0$$

$$\Delta S_{univ} = 0$$



Entropía, reversibilidad e irreversibilidad

Imaginemos ahora un proceso irreversible



Para evaluar la variación de entropía entre el punto 1 y el punto 2, se pueden conectar ambos puntos por medio de un camino reversible:

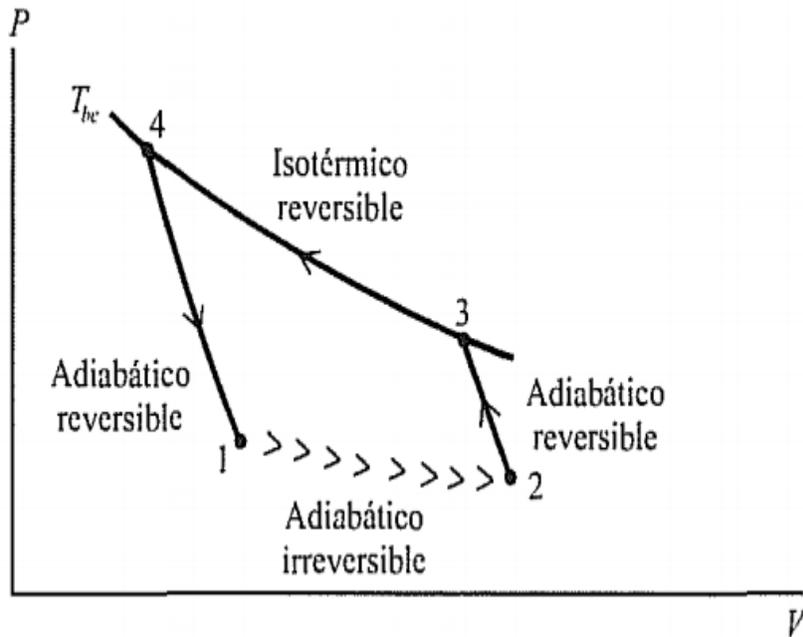
1. Un proceso adiabático de aumento de T reversible 2-3
2. Un proceso isotérmico de aumento de P reversible 3-4
3. Un proceso adiabático de descenso de T reversible 4-1

$$\oint dS_{sist} = (S_2 - S_1) + (S_3 - S_2) + (S_4 - S_3) + (S_1 - S_4) = 0$$

$$\oint dS_{sist} = 0 = (S_2 - S_1) + 0 + (S_4 - S_3) + 0$$

$$(S_2 - S_1) = (S_4 - S_3)$$

Entropía, reversibilidad e irreversibilidad



Y la variación $(S_4 - S_3)$ es una variación de entropía reversible que ya sabemos calcular:

$$(S_4 - S_3) = \int_3^4 \frac{dQ_{rev}}{T} = \frac{1}{T_{3-4}} \int_3^4 dQ_{rev} = \frac{Q_{rev}}{T_{3-4}}$$

$$(S_2 - S_1) = -\frac{Q_{rev}}{T_{3-4}}$$

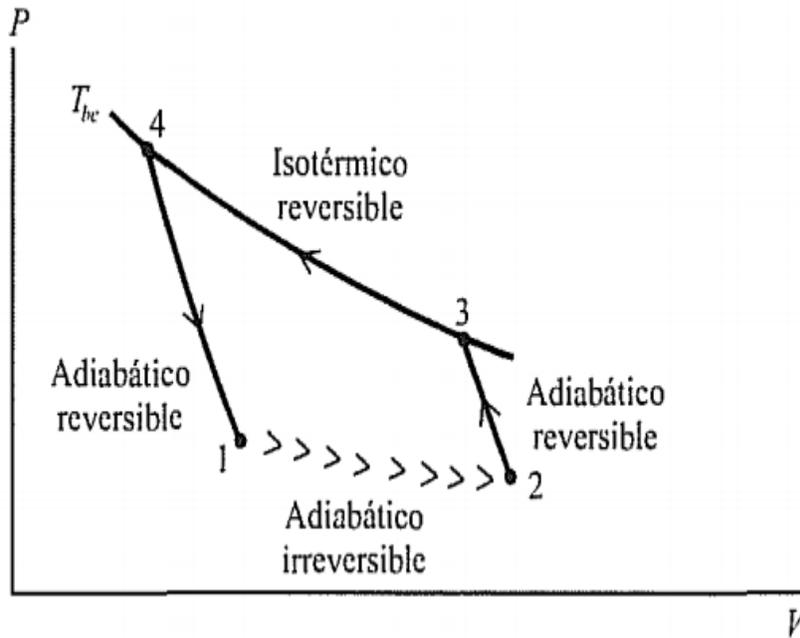
A su vez se cumple que para el ciclo:

$$\oint dU_{sist} = 0 = \oint (dQ + dW) = Q_{3-4} + W$$

Esto implicaría que todo el calor se convierte en trabajo, por lo que se está violando la 2da Ley de la Termodinámica

Entropía, reversibilidad e irreversibilidad

Imaginemos ahora un proceso irreversible



$$(S_2 - S_1) = -\frac{Q_{rev}}{T_{3-4}} \geq 0$$

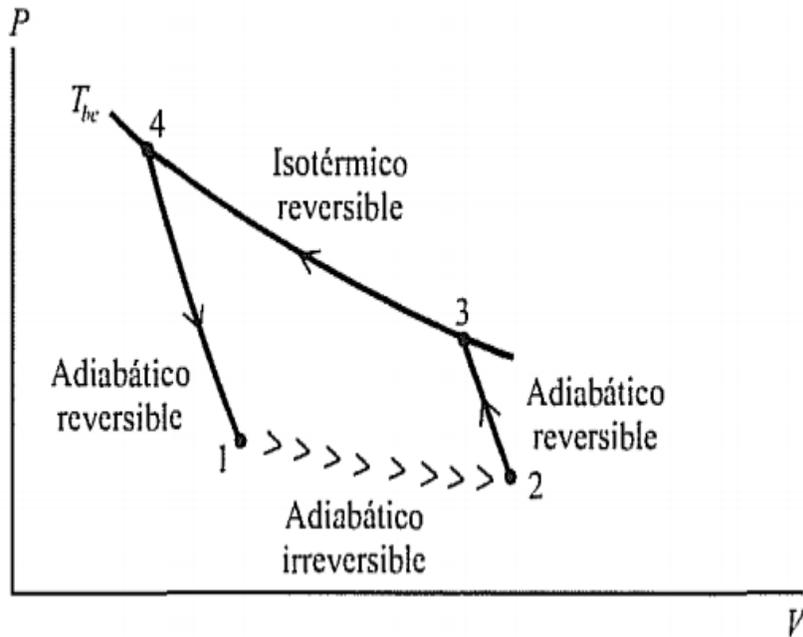
$$\Delta S_{sist} > 0$$

$$\Delta S_{univ} > 0$$

Procesos irreversibles

Desigualdad de Clausius

En un ciclo irreversible



$$W_{irrev} > W_{rev}$$

$$\Delta U_{sist} = Q_{irrev} + W_{irrev} = Q_{rev} + W_{rev}$$

Como la energía interna es una función de estado, es igual así el ciclo sea reversible o irreversible, por lo tanto:

$$Q_{irrev} < Q_{rev}$$

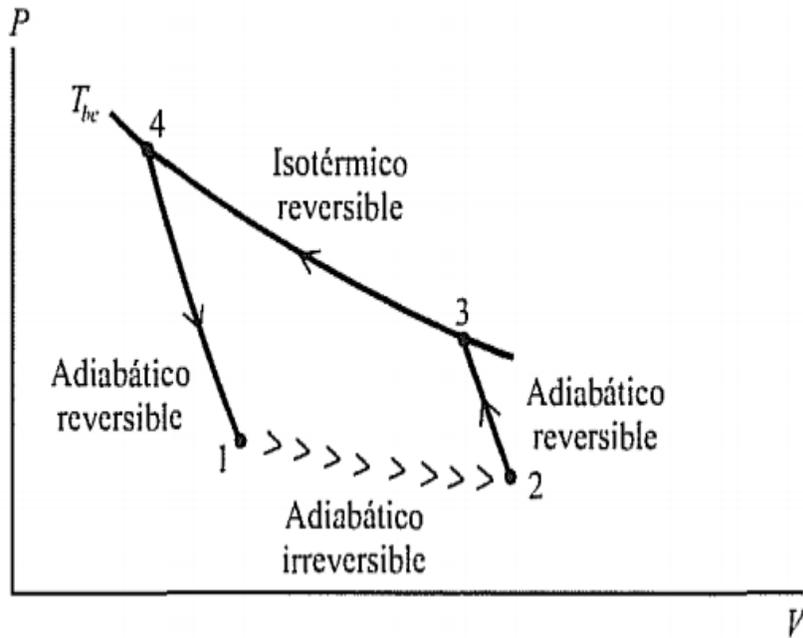
Una expansión isotérmica irreversible requiere menos calor que una expansión isotérmica reversible

$$\eta_{irrev} = 1 + \frac{Q_{3-4}(rev)}{Q_{1-2}(irrev)} < 1 + \frac{Q_{3-4}(rev)}{Q_{1-2}(rev)}$$

$$\eta_{irrev} < \eta_{rev}$$

Desigualdad de Clausius

En un ciclo irreversible



El hecho que una expansión isotérmica irreversible requiere menos calor que una expansión isotérmica reversible:

$$\frac{dQ_{3-4}(irrev)}{T} < \frac{dQ_{3-4}(rev)}{T}$$

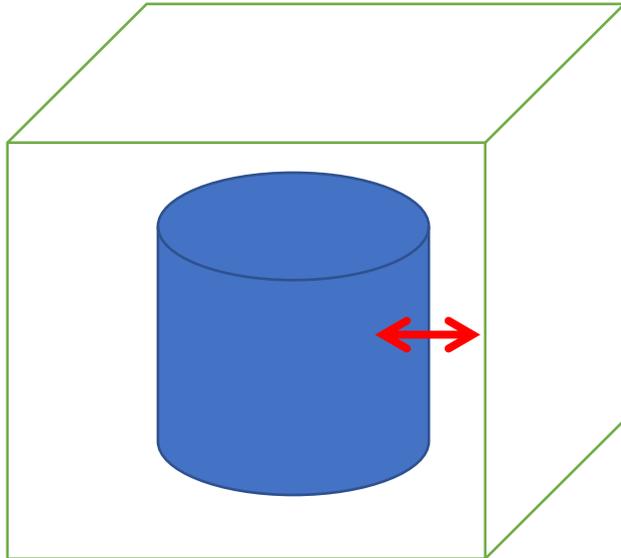
Implica que:

$$\oint \frac{dQ (irrev)}{T} < \oint \frac{dQ (rev)}{T} = 0$$

Desigualdad de Clausius

$\Delta S_{\text{sist}} > 0$ proceso adiabático irreversible, sistema cerrado

$\Delta S_{\text{sist}} > 0$ proceso irreversible, sistema aislado



$$\Delta S_{\text{sist+ent}} \equiv \Delta S_{\text{univ}} > 0$$

$\Delta S_{\text{univ}} > 0$ proceso irreversible

Desigualdad de Clausius

$$\Delta S_{total} \geq 0$$

- Para un sistema aislado que sufre un proceso irreversible la entropía siempre es menor que cero
- Para el universo la entropía siempre crece

El aumento de la entropía es la punta de la flecha del tiempo
(A. Eddington)

$$\underline{\Delta S_{\text{univ}} > 0 \quad \text{proceso irreversible}}$$

Esta condición se expresa matemáticamente como:

$$\boxed{dS^t = \frac{dQ}{T} + S_{\text{gen}}}$$

donde Q representa el calor intercambiado en el proceso irreversible y S_{gen} es la entropía generada por la irreversibilidad del proceso.

En un proceso reversible $S_{\text{gen}} = 0$ En un proceso irreversible $S_{\text{gen}} > 0$

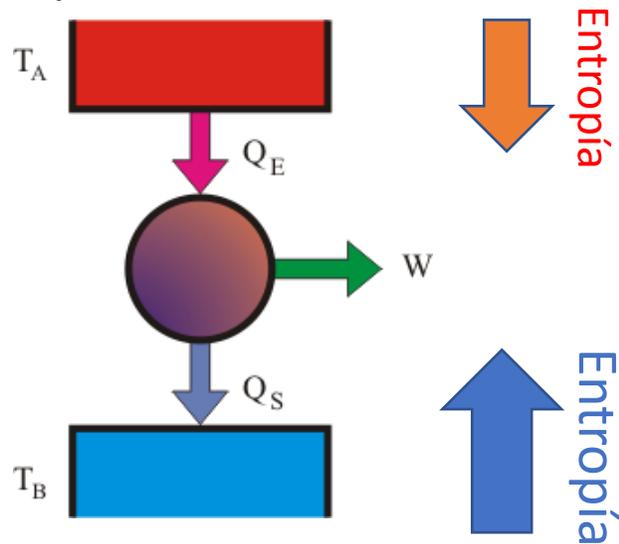
Si un sistema intercambia materia con los alrededores (sistema abierto), su entropía puede incrementar o disminuir por efecto de la entropía contenida en las corrientes materiales que ingresan o salen del sistema.

El balance general de entropía de un sistema abierto debe incluir, entonces, la entropía de c/u de las \dot{m}_i corrientes materiales que ingresan ($\dot{m}_i > 0$) o salen ($\dot{m}_i < 0$) del sistema:

$$\frac{dS^t}{dt} = \sum_i \dot{m}_i S_i + \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\text{gen}}$$

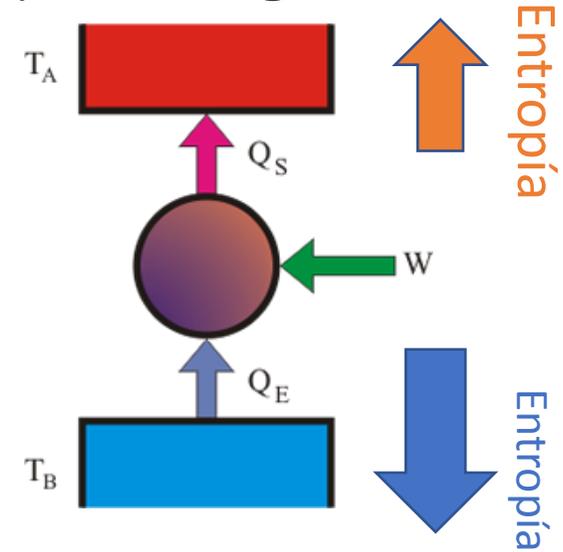
Las máquinas térmicas y la entropía

Máquina térmica



La entropía de la fuente fría aumenta más que lo que se reduce la de la fuente caliente, por lo tanto el proceso es espontáneo

Máquina frigorífica



La entropía de la fuente caliente aumenta menos que lo que se reduce la de la fuente fría, por lo tanto el proceso no es espontáneo y requiere trabajo

Interpretación microscópica de la entropía

La entropía tiene una definición según la **Termodinámica Estadística**. Una de las ecuaciones fundamentales de la Termodinámica Estadística es la de Boltzmann:

$$S = k_B \ln \Omega$$

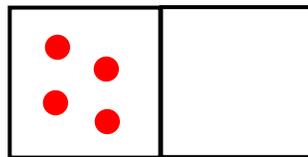
Entropía del sistema

Número de microestados igualmente probables

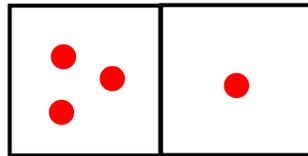
Interpretación microscópica de la entropía

El cálculo de los microestados igualmente probables se puede ejemplificar de la siguiente manera:

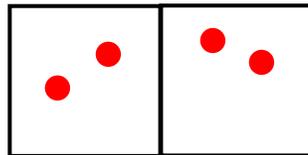
Suponga que tiene una caja con dos compartimentos (uno a la derecha y otro a la izquierda) y además tiene 4 bolitas para repartirlas en ambos compartimentos.



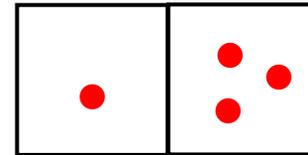
1 forma de acomodarlos



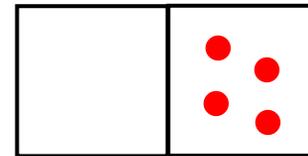
4 formas equivalentes de acomodarlos



6 formas equivalentes de acomodarlos



4 formas equivalentes de acomodarlos



1 forma de acomodarlos

Interpretación microscópica de la entropía

Como Ω indica el número de microestados igualmente probables, en el caso de cuatro partículas en dos compartimentos, vemos que la mayor entropía S se dará para el caso de que las pelotitas estén igualmente distribuidas. Los casos extremos **no son IMPOSIBLES, son IMPROBABLES.**

Generalizando, el cálculo de Ω se realiza de la siguiente forma:

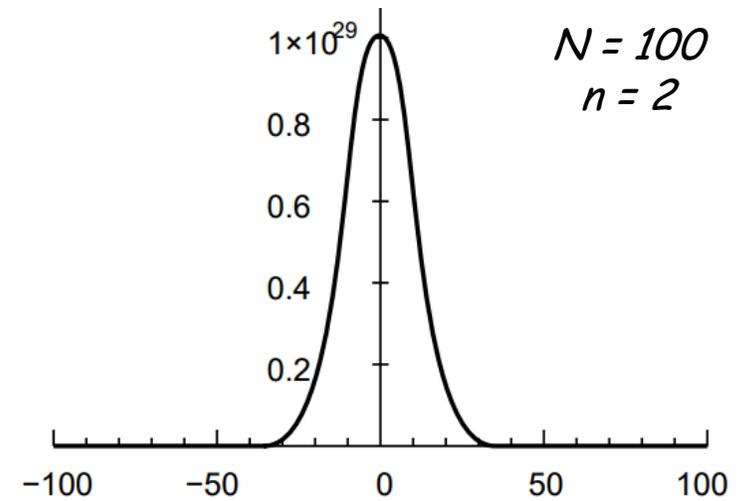
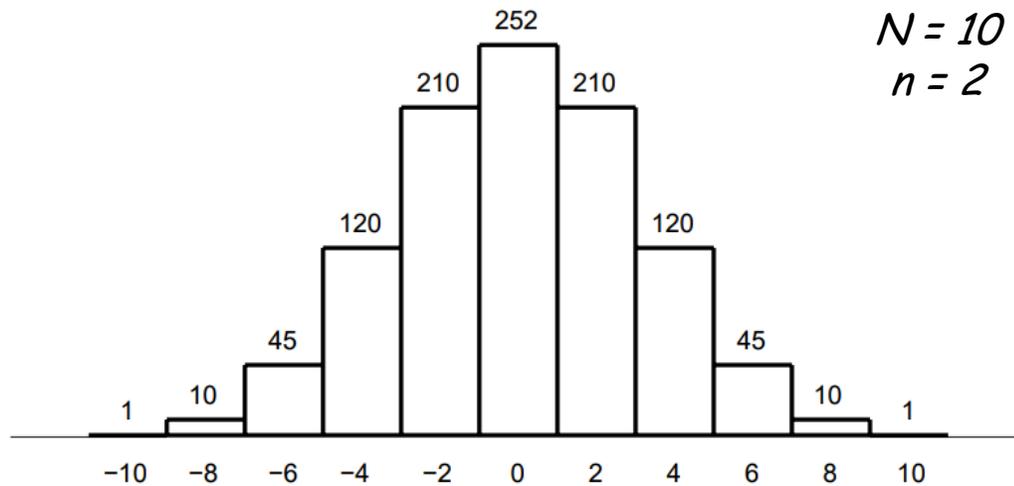
$$\Omega = \frac{N!}{\prod_{i=1}^n N_i!}$$

Donde $N!$ cuantifica las formas de acomodar N elementos, y $\prod_{i=1}^n N_i!$ corrige la cantidad de veces que se cuantifican acomodamientos idénticos.

60 partículas en una caja sin divisiones	$\Omega = \frac{60!}{60!} = 1$
10 partículas en 2 compartimentos 6 a la izquierda y 4 a la derecha	$\Omega = \frac{10!}{6!4!} = 210$
10 partículas en 3 compartimentos 5 izquierda, 3 centro, 2 derecha	$\Omega = \frac{10!}{5!3!2!} = 2520$
100 partículas en 10 compartimentos 10 en cada cual	$\Omega = \frac{100!}{(10!)^{10}} = 2.36 \times 10^{92}$

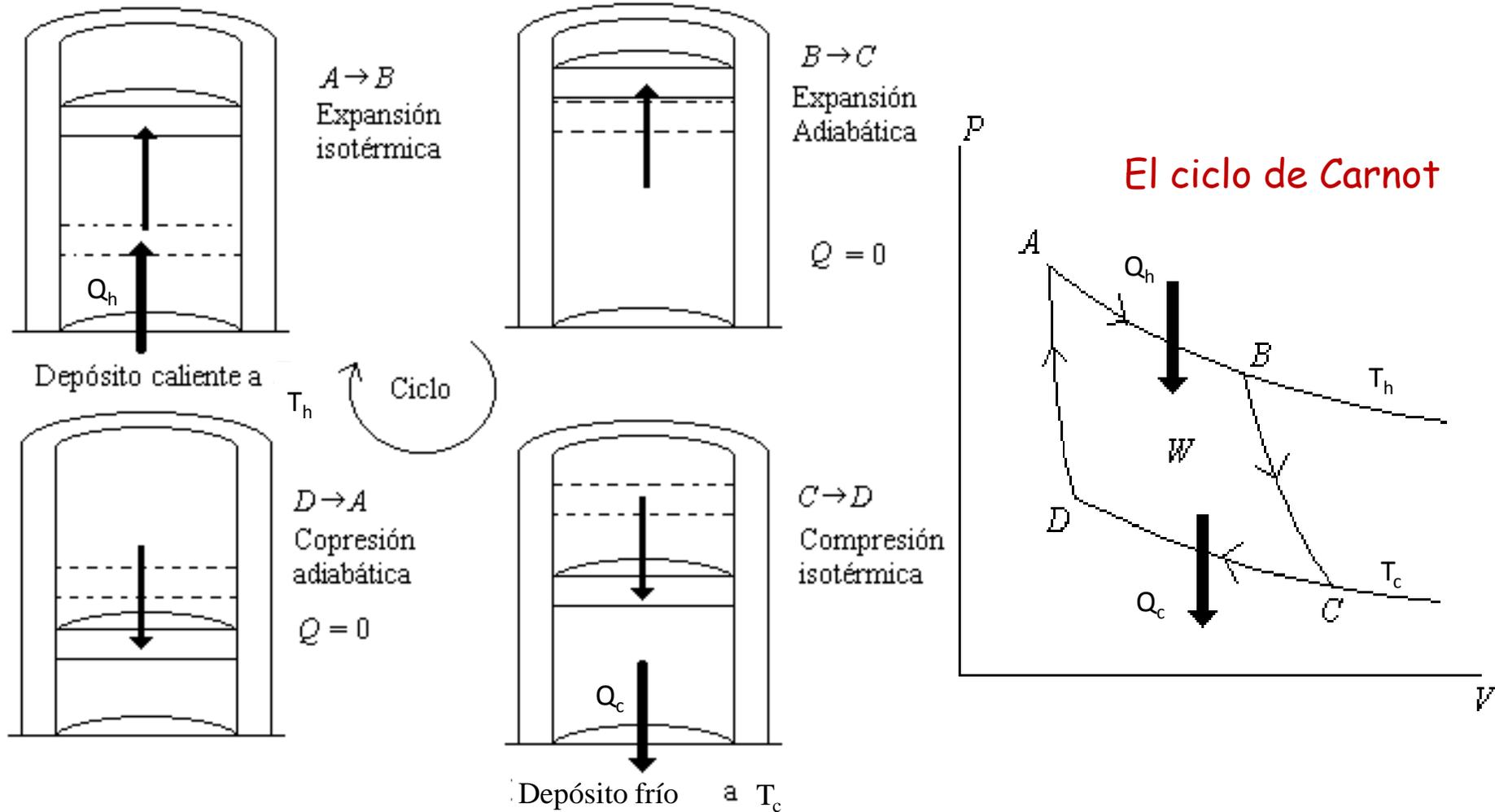
Interpretación microscópica de la entropía

Para números de partículas muy grandes, usualmente se asigna la entropía del sistema al valor más probable de estados

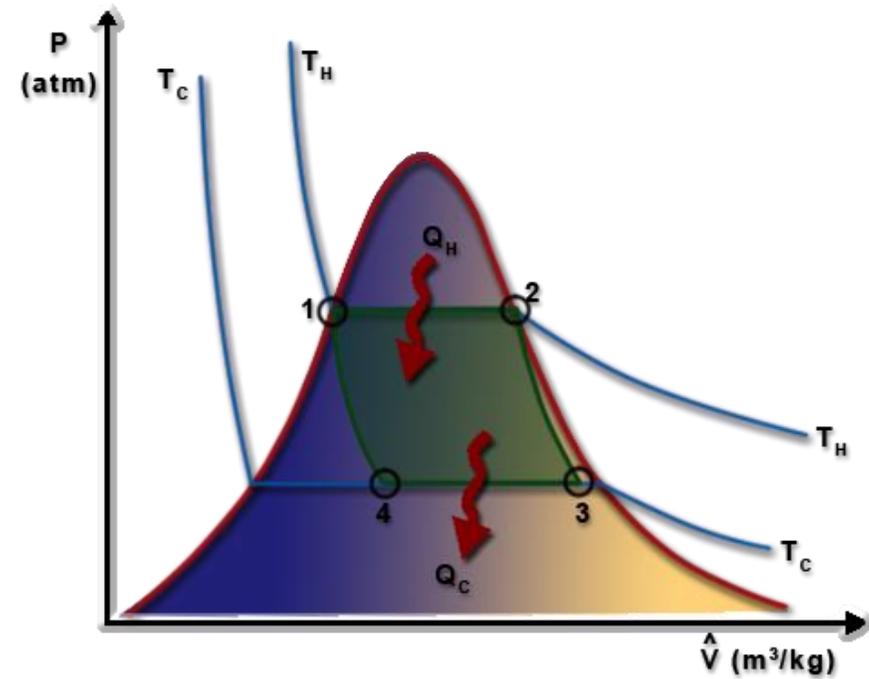
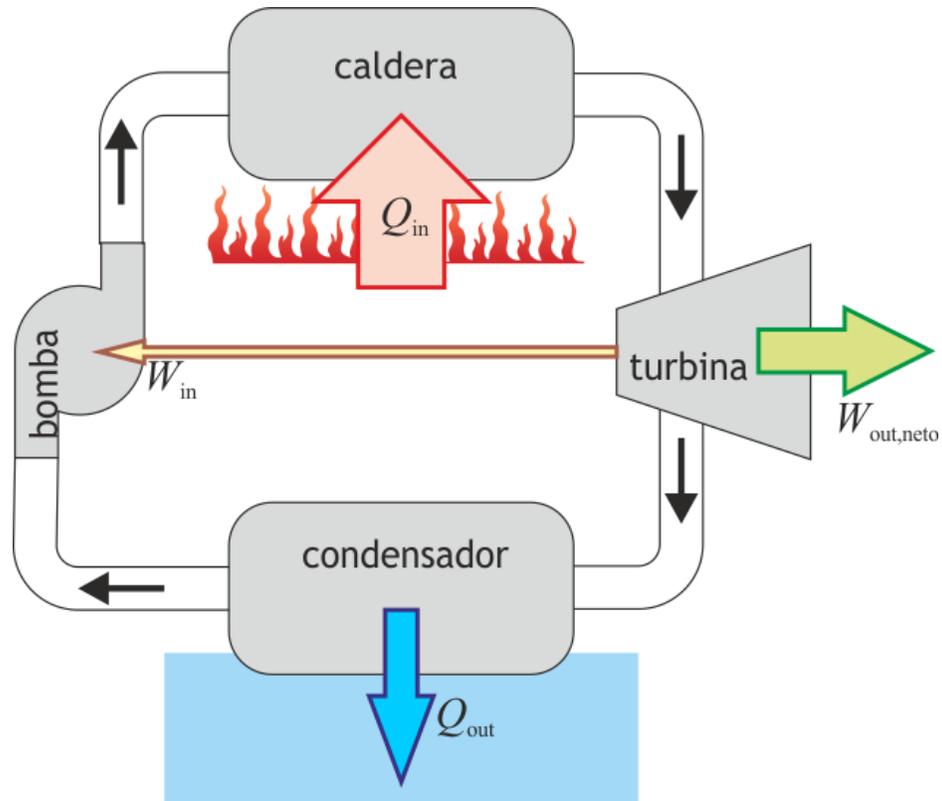


Distribución Normal

Ciclo de Carnot con cambio de fase



Ciclo de Carnot con cambio de fase



$$\eta \equiv 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

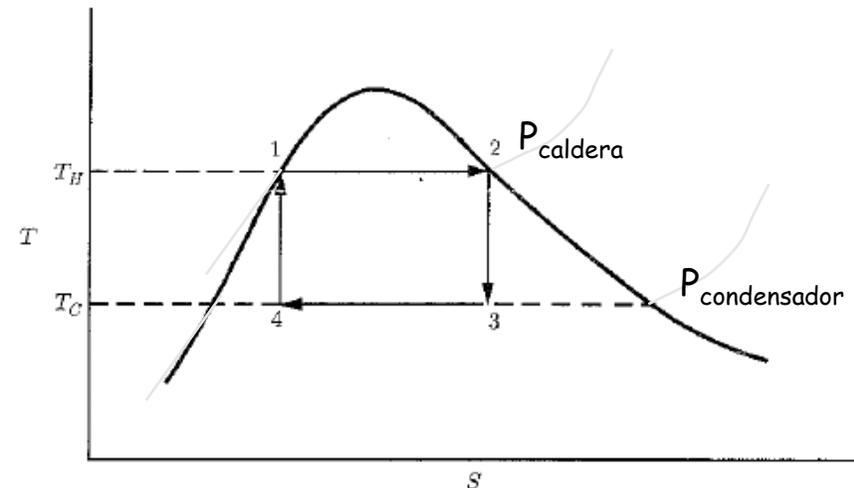
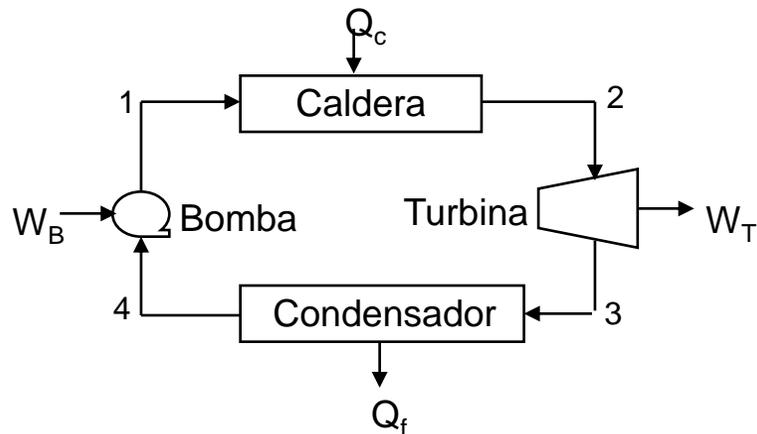
$$\eta \equiv 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Ciclo de Carnot con cambio de fase

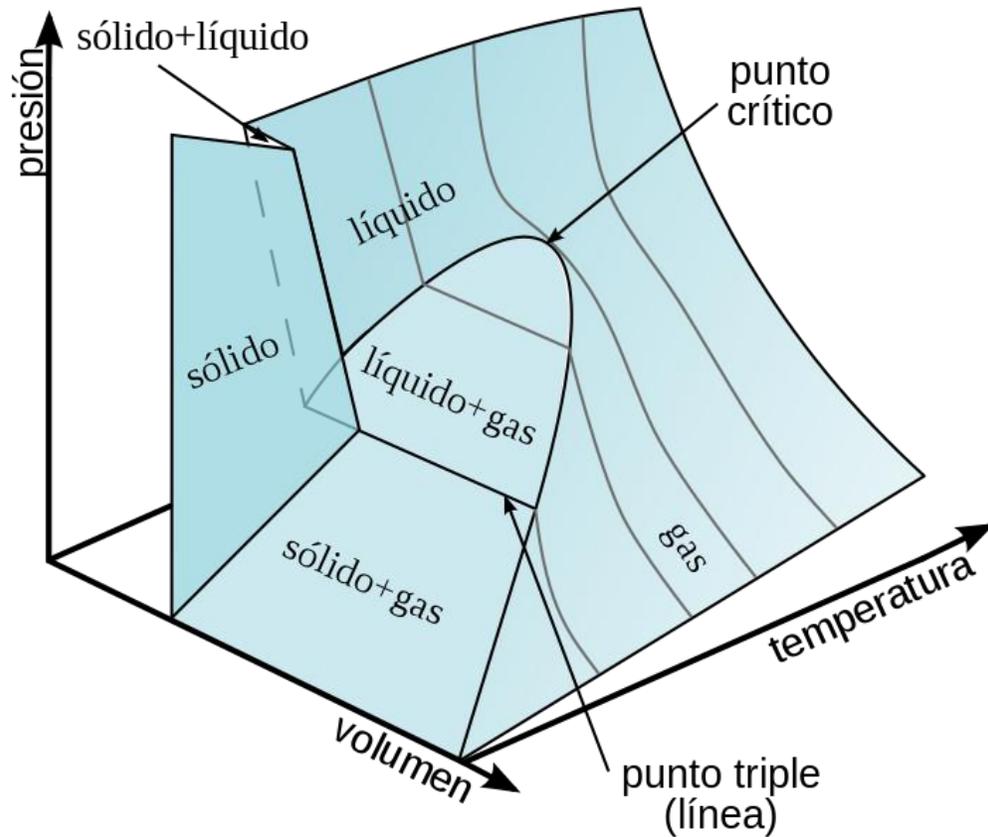
Una forma de efectuar las etapas isotérmicas del ciclo de Carnot es haciendo que el fluido que cumple el ciclo sufra cambios de fase: se evapore en la etapa que toma calor y condense en la etapa que entrega calor

En una **Máquina Térmica** el fluido recibe calor Q_c evaporándose en una **caldera** y entrega calor Q_f condensando en un **condensador**.

El ciclo se completa con una **expansión adiabática** en una **turbina**, entregando trabajo de eje W_s , y una **compresión**, también **adiabática**, en una **bomba**.



Tablas de vapor



Condensan toda la información PVT y de otras funciones de estado de un fluido puro específico: **el agua**

Son de utilidad para analizar distintos tipos de ciclos de potencia o de refrigeración que utilizan como fluido al agua.

Hay dos tipos de tablas para extraer información:

- **Tabla de vapor de agua saturado**
- **Tabla de vapor de agua sobrecalentado**

Calor latentes

Se liberan o consumen durante un **cambio de fase**. El calor liberado o consumido **no** va acompañado de un **cambio de temperatura**.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta H^{\text{vaporización}} = H^{\text{vapor}} - H^{\text{líquido}} \\ \Delta H^{\text{fusión}} = H^{\text{líquido}} - H^{\text{sólido}} \\ \Delta H^{\text{sublimación}} = H^{\text{vapor}} - H^{\text{sólido}} \end{array} \right\} \Delta H > 0 \quad (\text{calor consumido})$$

En las **transformaciones opuestas**
(condensación y solidificación) $\Delta H < 0$ (calor liberado)

Calor sensible

El calor absorbido o liberado produce **cambios de temperatura**, cuya magnitud depende de la sustancia y de su estado físico.

$$c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p$$

Estado de Referencia

- Reactivos y productos a igual temperatura y presión. **Temperatura y presión de referencia:**

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$P = 1 \text{ bar}$$

- Reactivos y productos son compuestos puros en una dada condición física {sólido (s), líquido (l), gas (g)}. Esta condición física debe especificarse en la reacción

Calor de reacción **estándar**

$$\Delta H_{298}^{\circ} = \sum_i \nu_i H_{i,298}^{\circ}$$

En el **estado de referencia**, los **gases** que intervienen en una reacción química se consideran **gases ideales**.

Los calores ΔH_{298}° de cualquier reacción química se calculan a **partir** de los calores de las llamadas **reacciones de formación**.

Tablas de vapor de agua saturado

Table F.1: Saturated Steam, SI units

V = SPECIFIC VOLUME $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 U = SPECIFIC INTERNAL ENERGY kJ kg^{-1}
 H = SPECIFIC ENTHALPY kJ kg^{-1}
 S = SPECIFIC ENTROPY $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

t °C	T K	P kPa	SPECIFIC VOLUME V			INTERNAL ENERGY U			ENTHALPY H			ENTROPY S		
			sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.
0	273.15	0.611	1.000	206300.	206300.	-0.04	2375.7	2375.6	-0.04	2501.7	2501.6	0.0000	9.1578	9.1578
0.01	273.16	0.611	1.000	206200.	206200.	0.00	2375.6	2375.6	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1	274.15	0.657	1.000	192600.	192600.	4.17	2372.7	2376.9	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2	275.15	0.705	1.000	179900.	179900.	8.39	2369.9	2378.3	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3	276.15	0.757	1.000	168200.	168200.	12.60	2367.1	2379.7	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4	277.15	0.813	1.000	157300.	157300.	16.80	2364.3	2381.1	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5	278.15	0.872	1.000	147200.	147200.	21.01	2361.4	2382.4	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6	279.15	0.935	1.000	137800.	137800.	25.21	2358.6	2383.8	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0014
7	280.15	1.001	1.000	129100.	129100.	29.41	2355.8	2385.2	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8	281.15	1.072	1.000	121000.	121000.	33.60	2353.0	2386.6	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9	282.15	1.147	1.000	113400.	113400.	37.80	2350.1	2387.9	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10	283.15	1.227	1.000	106400.	106400.	41.99	2347.3	2389.3	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
11	284.15	1.312	1.000	99910.	99910.	46.18	2344.5	2390.7	46.19	2475.5	2521.7	0.1658	8.7119	8.8776
12	285.15	1.401	1.000	93830.	93830.	50.38	2341.7	2392.1	50.38	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536
13	286.15	1.497	1.001	88180.	88180.	54.56	2338.9	2393.4	54.57	2470.8	2525.4	0.1952	8.6345	8.8297
14	287.15	1.597	1.001	82900.	82900.	58.75	2336.1	2394.8	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060
15	288.15	1.704	1.001	77980.	77980.	62.94	2333.2	2396.2	62.94	2466.1	2529.1	0.2243	8.5582	8.7826
16	289.15	1.817	1.001	73380.	73380.	67.12	2330.4	2397.6	67.13	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593
17	290.15	1.936	1.001	69090.	69090.	71.31	2327.6	2398.9	71.31	2461.4	2532.7	0.2533	8.4830	8.7363
18	291.15	2.062	1.001	65090.	65090.	75.49	2324.8	2400.3	75.50	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135
19	292.15	2.196	1.002	61340.	61340.	79.68	2322.0	2401.7	79.68	2456.7	2536.4	0.2820	8.4088	8.6908
20	293.15	2.337	1.002	57840.	57840.	83.86	2319.2	2403.0	83.86	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6684
21	294.15	2.485	1.002	54560.	54560.	88.04	2316.4	2404.4	88.04	2452.0	2540.0	0.3105	8.3356	8.6462
22	295.15	2.642	1.002	51490.	51490.	92.22	2313.6	2405.8	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
23	296.15	2.808	1.002	48620.	48620.	96.40	2310.7	2407.1	96.41	2447.2	2543.6	0.3389	8.2634	8.6023
24	297.15	2.982	1.003	45920.	45930.	100.6	2307.9	2408.5	100.6	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
25	298.15	3.166	1.003	43400.	43400.	104.8	2305.1	2409.9	104.8	2442.5	2547.3	0.3670	8.1922	8.5592
26	299.15	3.360	1.003	41030.	41030.	108.9	2302.3	2411.2	108.9	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
27	300.15	3.564	1.003	38810.	38810.	113.1	2299.5	2412.6	113.1	2437.8	2550.9	0.3949	8.1218	8.5168
28	301.15	3.778	1.004	36730.	36730.	117.3	2296.7	2414.0	117.3	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
29	302.15	4.004	1.004	34770.	34770.	121.5	2293.8	2415.3	121.5	2433.1	2554.5	0.4227	8.0524	8.4751
...
100	373.15	101.33	1.044	1672.0	1673.0	419.0	2087.5	2506.5	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554

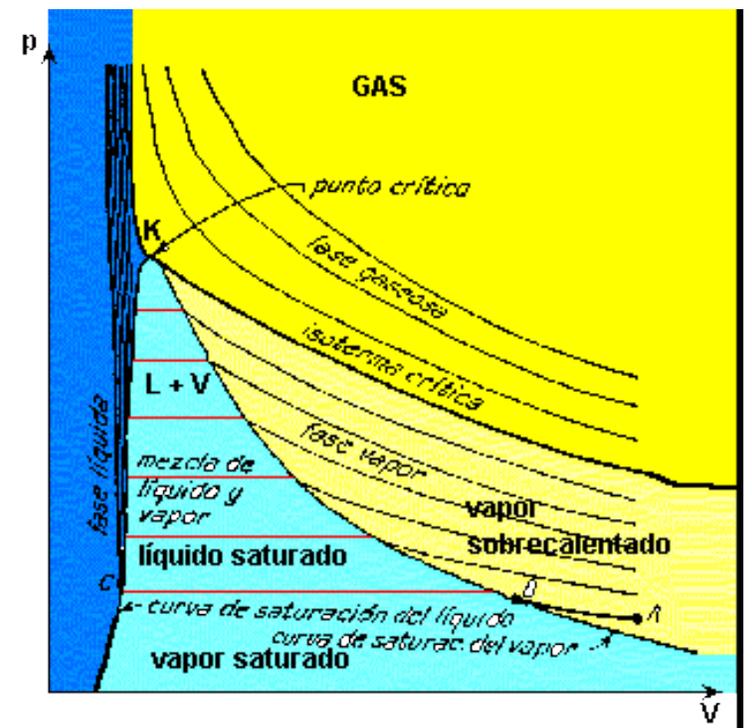


Table F.1: Saturated Steam, SI units

V = SPECIFIC VOLUME $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$

U = SPECIFIC INTERNAL ENERGY kJ kg^{-1}

H = SPECIFIC ENTHALPY kJ kg^{-1}

S = SPECIFIC ENTROPY $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

t $^{\circ}\text{C}$	T K	P kPa	SPECIFIC VOLUME V			INTERNAL ENERGY U			ENTHALPY H			ENTROPY S		
			sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.
0	273.15	0.611	1.000	206300.	206300.	-0.04	2375.7	2375.6	-0.04	2501.7	2501.6	0.0000	9.1578	9.1578
0.01	273.16	0.611	1.000	206200.	206200.	0.00	2375.6	2375.6	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1	274.15	0.657	1.000	192600.	192600.	4.17	2372.7	2376.9	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2	275.15	0.705	1.000	179900.	179900.	8.39	2369.9	2378.3	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3	276.15	0.757	1.000	168200.	168200.	12.60	2367.1	2379.7	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4	277.15	0.813	1.000	157300.	157300.	16.80	2364.3	2381.1	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5	278.15	0.872	1.000	147200.	147200.	21.01	2361.4	2382.4	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6	279.15	0.935	1.000	137800.	137800.	25.21	2358.6	2383.8	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0014
7	280.15	1.001	1.000	129100.	129100.	29.41	2355.8	2385.2	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8	281.15	1.072	1.000	121000.	121000.	33.60	2353.0	2386.6	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9	282.15	1.147	1.000	113400.	113400.	37.80	2350.1	2387.9	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10	283.15	1.227	1.000	106400.	106400.	41.99	2347.3	2389.3	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
11	284.15	1.310	1.000	100000.	100000.	46.17	2344.4	2390.6	46.17	2475.5	2521.6	0.1658	8.7120	8.8775

Table F.1: Saturated Steam, SI units

V = SPECIFIC VOLUME $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 U = SPECIFIC INTERNAL ENERGY kJ kg^{-1}
 H = SPECIFIC ENTHALPY kJ kg^{-1}
 S = SPECIFIC ENTROPY $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

t $^{\circ}\text{C}$	T K	P kPa	SPECIFIC VOLUME V			INTERNAL ENERGY U			ENTHALPY H			ENTROPY S		
			sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.	sat. liq.	evap.	sat. vap.
0	273.15	0.611	1.000	206300.	206300.	-0.04	2375.7	2375.6	-0.04	2501.7	2501.6	0.0000	9.1578	9.1578
0.01	273.16	0.611	1.000	206200.	206200.	0.00	2375.6	2375.6	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1	274.15	0.657	1.000	192600.	192600.	4.17	2372.7	2376.9	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2	275.15	0.705	1.000	179900.	179900.	8.39	2369.9	2378.3	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3	276.15	0.757	1.000	168200.	168200.	12.60	2367.1	2379.7	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4	277.15	0.813	1.000	157300.	157300.	16.80	2364.3	2381.1	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5	278.15	0.872	1.000	147200.	147200.	21.01	2361.4	2382.4	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6	279.15	0.935	1.000	137800.	137800.	25.21	2358.6	2383.8	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0014
7	280.15	1.001	1.000	129100.	129100.	29.41	2355.8	2385.2	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8	281.15	1.072	1.000	121000.	121000.	33.60	2353.0	2386.6	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9	282.15	1.147	1.000	113400.	113400.	37.80	2350.1	2387.9	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10	283.15	1.227	1.000	106400.	106400.	41.99	2347.3	2389.3	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
11	284.15	1.310	1.000	100000.	100000.	46.17	2344.4	2390.6	46.17	2475.6	2521.7	0.1657	8.7121	8.8778
12	285.15	1.397	1.000	94200.	94200.	50.34	2341.5	2391.8	50.34	2473.3	2523.4	0.1803	8.6736	8.8538
13	286.15	1.488	1.000	89000.	89000.	54.50	2338.5	2392.9	54.50	2471.0	2525.1	0.1948	8.6354	8.8300
14	287.15	1.583	1.000	84400.	84400.	58.65	2335.5	2393.9	58.65	2468.7	2526.7	0.2092	8.5974	8.8065
15	288.15	1.682	1.000	80400.	80400.	62.79	2332.4	2394.8	62.79	2466.4	2528.3	0.2235	8.5596	8.7833
16	289.15	1.785	1.000	77000.	77000.	66.92	2329.3	2395.6	66.92	2464.1	2529.8	0.2377	8.5219	8.7603
17	290.15	1.892	1.000	74200.	74200.	71.04	2326.1	2396.3	71.04	2461.8	2531.3	0.2518	8.4843	8.7375
18	291.15	2.003	1.000	71900.	71900.	75.15	2322.9	2396.9	75.15	2459.5	2532.7	0.2658	8.4468	8.7148
19	292.15	2.118	1.000	70100.	70100.	79.25	2319.6	2397.4	79.25	2457.2	2534.1	0.2797	8.4094	8.6923
20	293.15	2.237	1.002	57840.	57840.	83.36	2316.4	2403.0	83.36	2454.9	2535.4	0.2935	8.3721	8.6698
21	294.15	2.360	1.002	54560.	54560.	88.04	2313.2	2404.4	88.04	2452.6	2536.7	0.3072	8.3356	8.6462
22	295.15	2.485	1.002	51490.	51490.	92.22	2310.0	2405.8	92.22	2449.9	2538.0	0.3208	8.2994	8.6241
23	296.15	2.642	1.002	48620.	48620.	96.40	2306.8	2407.1	96.40	2447.2	2539.3	0.3343	8.2634	8.6023
24	297.15	2.808	1.003	45920.	45930.	100.6	2303.6	2408.5	100.6	2444.5	2540.6	0.3477	8.2277	8.5806
25	298.15	2.982	1.003	43400.	43400.	104.8	2300.4	2409.9	104.8	2441.8	2541.9	0.3610	8.1922	8.5592
26	299.15	3.166	1.003	41030.	41030.	108.9	2297.2	2411.2	108.9	2439.1	2543.2	0.3742	8.1569	8.5379
27	299.15	3.360	1.003	41030.	41030.	108.9	2297.2	2411.2	108.9	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
27	300.15	3.564	1.003	38810.	38810.	113.1	2295.5	2412.6	113.1	2437.8	2550.9	0.3949	8.1218	8.5168
28	301.15	3.778	1.004	36730.	36730.	117.3	2295.7	2414.0	117.3	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
29	302.15	4.004	1.004	34770.	34770.	121.5	2293.8	2415.3	121.5	2433.1	2554.5	0.4227	8.0524	8.4751
...
100	373.15	101.33	1.044	1672.0	1673.0	419.0	2087.5	2506.5	419.1	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554

$V =$ SPECIFIC VOLUME $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 $U =$ SPECIFIC INTERNAL ENERGY kJ kg^{-1}
 $H =$ SPECIFIC ENTHALPY kJ kg^{-1}
 $S =$ SPECIFIC ENTROPY $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

OBSERVACIÓN:

Las tablas de vapor saturado también podrían ser llamadas:
tablas de líquido saturado, o bien
tablas de equilibrio líquido-vapor

Tablas de vapor de agua **sobrecalentado**

Table F.2: Superheated Steam, SI units

TEMPERATURE: t °C
(TEMPERATURE: T kelvins)

P /kPa (t^{sat} /°C)	sat.		75 (348.15)	100 (373.15)	125 (398.15)	150 (423.15)	175 (448.15)	200 (473.15)	225 (498.15)	250 (523.15)	
	liq.	vap.									
1 (6.98)	V	1.000	129200.	60640.	172180.	183720.	195270.	206810.	218350.	229890.	241430.
	U	29.334	2385.2	2480.8	2516.4	2552.3	2588.5	2624.9	2661.7	2698.8	2736.3
	H	29.335	2514.4	2641.5	2588.6	2736.0	2783.7	2831.7	2880.1	2928.7	2977.7
	S	0.1060	8.9767	9.3828	9.5136	9.6365	9.7527	9.8629	9.9679	10.0681	10.1641
10 (45.83)	V	1.010	14670.	16030.	17190.	18350.	19510.	20660.	21820.	22980.	24130.
	U	191.822	2438.0	2479.7	2515.6	2551.6	2588.0	2624.5	2661.4	2698.6	2736.1
	H	191.832	2584.8	2640.0	2687.5	2735.2	2783.1	2831.2	2879.6	2928.4	2977.4
	S	0.6493	8.1511	8.3168	8.4486	8.5722	8.6888	8.7994	8.9045	9.0049	9.1010
20 (60.09)	V	1.017	7649.8	8000.0	8584.7	9167.1	9748.0	10320.	10900.	11480.	12060.
	U	251.432	2456.9	2478.4	2514.6	2550.9	2587.4	2624.1	2661.0	2698.3	2735.8
	H	251.453	2609.9	2638.4	2686.3	2734.2	2782.3	2830.6	2879.2	2928.0	2977.1
	S	0.8321	7.9094	7.9933	8.1261	8.2504	8.3676	8.4785	8.5839	8.6844	8.7806
30 (69.12)	V	1.022	5229.3	5322.0	5714.4	6104.6	6493.2	6880.8	7267.5	7653.8	8039.7
	U	289.271	2468.6	2477.1	2513.6	2550.2	2586.8	2623.6	2660.7	2698.0	2735.6
	H	289.302	2625.4	2636.8	2685.1	2733.3	2781.6	2830.0	2878.7	2927.6	2976.8
	S	0.9441	7.7695	7.8024	7.9363	8.0614	8.1791	8.2903	8.3960	8.4967	8.5930
40 (75.89)	V	1.027	3993.4	.....	4279.2	4573.3	4865.8	5157.2	5447.8	5738.0	6027.7
	U	317.609	2477.1	.....	2512.6	2549.4	2586.2	2623.2	2660.3	2697.7	2735.4
	H	317.650	2636.9	.....	2683.8	2732.3	2780.9	2829.5	2878.2	2927.2	2976.5
	S	1.0261	7.6709	.....	7.8009	7.9268	8.0450	8.1566	8.2624	8.3633	8.4598
50 (81.35)	V	1.030	3240.2	.....	3418.1	3654.5	3889.3	4123.0	4356.0	4588.5	4820.5
	U	340.513	2484.0	.....	2511.7	2548.6	2585.6	2622.7	2659.9	2697.4	2735.1
	H	340.564	2646.0	.....	2682.6	2731.4	2780.1	2828.9	2877.7	2926.8	2976.1
	S	1.0912	7.5947	.....	7.6953	7.8219	7.9406	8.0526	8.1587	8.2598	8.3564
75 (91.79)	V	1.037	2216.9	.....	2269.8	2429.4	2587.3	2744.2	2900.2	3055.8	3210.9
	U	384.374	2496.7	.....	2509.2	2546.7	2584.2	2621.6	2659.0	2696.7	2734.5
	H	384.451	2663.0	.....	2679.4	2728.9	2778.2	2827.4	2876.6	2925.8	2975.3
	S	1.2131	7.4570	.....	7.5014	7.6300	7.7500	7.8629	7.9697	8.0712	8.1681
100 (99.63)	V	1.043	1693.7	.....	1695.5	1816.7	1936.3	2054.7	2172.3	2289.4	2406.1
	U	417.406	2506.1	.....	2506.6	2544.8	2582.7	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9
	H	417.511	2675.4	.....	2676.2	2726.5	2776.3	2825.9	2875.4	2924.9	2974.5
	S	1.3027	7.3598	.....	7.3618	7.4923	7.6137	7.7275	7.8349	7.9369	8.0342

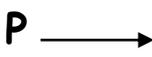
$V = \text{SPECIFIC VOLUME } \text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 $U = \text{SPECIFIC INTERNAL ENERGY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $H = \text{SPECIFIC ENTHALPY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $S = \text{SPECIFIC ENTROPY } \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Superheated Steam, SI units

TEMPERATURE: t °C
 (TEMPERATURE: T kelvins)



P/kPa ($t^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	75 (348.15)	100 (373.15)	125 (398.15)	150 (423.15)	175 (448.15)	200 (473.15)	225 (498.15)	250 (523.15)
1 (6.98)	V	1.000	129200.	60640.	172180.	83720.	195270.	206810.	218350.	229890.	241430.
	U	29.334	2385.2	2480.8	2516.4	2552.3	2588.5	2624.9	2661.7	2698.8	2736.3
	H	29.335	2514.4	2641.5	2588.6	2736.0	2783.7	2831.7	2880.1	2928.7	2977.7
	S	0.1060	8.9767	9.3828	9.5136	9.6365	9.7527	9.8629	9.9679	10.0681	10.1641
10 (45.83)	V	1.010	14670.	16030.	17190.	18350.	19510.	20660.	21820.	22980.	24130.
	U	191.822	2438.0	2479.7	2515.6	2551.6	2588.0	2624.5	2661.4	2698.6	2736.1
	H	191.832	2584.8	2640.0	2687.5	2735.2	2783.1	2831.2	2879.6	2928.4	2977.4
	S	0.6493	8.1511	8.3168	8.4486	8.5722	8.6888	8.7994	8.9045	9.0049	9.1010
20 (60.09)	V	1.017	7649.8	8000.0	8584.7	9167.1	9748.0	10320.	10900.	11480.	12060.
	U	251.432	2456.9	2478.4	2514.6	2550.9	2587.4	2624.1	2661.0	2698.3	2735.8
	H	251.453	2609.9	2638.4	2686.3	2734.2	2782.3	2830.6	2879.2	2928.0	2977.1
	S	0.8321	7.9094	7.9933	8.1261	8.2504	8.3676	8.4785	8.5839	8.6844	8.7806
30 (69.12)	V	1.022	5229.3	5322.0	5714.4	6104.6	6493.2	6880.8	7267.5	7653.8	8039.7
	U	289.271	2468.6	2477.1	2513.6	2550.2	2586.8	2623.6	2660.7	2698.0	2735.6
	H	289.302	2625.4	2636.8	2685.1	2733.3	2781.6	2830.0	2878.7	2927.6	2976.8
	S	0.9441	7.7695	7.8024	7.9363	8.0614	8.1791	8.2903	8.3960	8.4967	8.5930
40 (75.89)	V	1.027	3993.4	.....	4279.2	4573.3	4865.8	5157.2	5447.8	5738.0	6027.7
	U	317.609	2477.1	.....	2512.6	2549.4	2586.2	2623.2	2660.3	2697.7	2735.4
	H	317.650	2636.9	.....	2683.8	2732.3	2780.9	2829.5	2878.2	2927.2	2976.5
	S	1.0261	7.6709	.....	7.8009	7.9268	8.0450	8.1566	8.2624	8.3633	8.4598
50 (81.35)	V	1.030	3240.2	.....	3418.1	3654.5	3889.3	4123.0	4356.0	4588.5	4820.5
	U	340.513	2484.0	.....	2511.7	2548.6	2585.6	2622.7	2659.9	2697.4	2735.1
	H	340.564	2646.0	.....	2682.6	2731.4	2780.1	2828.9	2877.7	2926.8	2976.1
	S	1.0912	7.5947	.....	7.6953	7.8219	7.9406	8.0526	8.1587	8.2598	8.3564
75 (91.79)	V	1.037	2216.9	.....	2269.8	2429.4	2587.3	2744.2	2900.2	3055.8	3210.9
	U	384.374	2496.7	.....	2509.2	2546.7	2584.2	2621.6	2659.0	2696.7	2734.5
	H	384.451	2663.0	.....	2679.4	2728.9	2778.2	2827.4	2876.6	2925.8	2975.3
	S	1.2131	7.4570	.....	7.5014	7.6300	7.7500	7.8629	7.9697	8.0712	8.1681
100 (99.63)	V	1.043	1693.7	.....	1695.5	1816.7	1936.3	2054.7	2172.3	2289.4	2406.1
	U	417.406	2506.1	.....	2506.6	2544.8	2582.7	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9
	H	417.511	2675.4	.....	2676.2	2726.5	2776.3	2825.9	2875.4	2924.9	2974.5
	S	1.3027	7.3598	.....	7.3618	7.4923	7.6137	7.7275	7.8349	7.9369	8.0342



$V = \text{SPECIFIC VOLUME } \text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 $U = \text{SPECIFIC INTERNAL ENERGY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $H = \text{SPECIFIC ENTHALPY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $S = \text{SPECIFIC ENTROPY } \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Superheated Steam, SI units

TEMPERATURE: t °C
 (TEMPERATURE: T kelvins)



P/kPa ($t^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	75 °C	100 °C	125 °C	150 °C	175 °C	200 °C	225 °C	250 °C
				(348.15) K	(373.15) K	(398.15) K	(423.15) K	(448.15) K	(473.15) K	(498.15) K	(523.15) K
kPa 1 (6.98) °C	V	1.000	129200.	60640.	172180.	83720.	195270.	206810.	218350.	229890.	241430.
	U	29.334	2385.2	2480.8	2516.4	2552.3	2588.5	2624.9	2661.7	2698.8	2736.3
	H	29.335	2514.4	2641.5	2588.6	2736.0	2783.7	2831.7	2880.1	2928.7	2977.7
	S	0.1060	8.9767	9.3828	9.5136	9.6365	9.7527	9.8629	9.9679	10.0681	10.1641
kPa 10 (45.83) °C	V	1.010	14670.	16030.	17190.	18350.	19510.	20660.	21820.	22980.	24130.
	U	191.822	2438.0	2479.7	2515.6	2551.6	2588.0	2624.5	2661.4	2698.6	2736.1
	H	191.832	2584.8	2640.0	2687.5	2735.2	2783.1	2831.2	2879.6	2928.4	2977.4
	S	0.6493	8.1511	8.3168	8.4486	8.5722	8.6888	8.7994	8.9045	9.0049	9.1010
kPa 20 (60.09) °C	V	1.017	7649.8	8000.0	8584.7	9167.1	9748.0	10320.	10900.	11480.	12060.
	U	251.432	2456.9	2478.4	2514.6	2550.9	2587.4	2624.1	2661.0	2698.3	2735.8
	H	251.453	2609.9	2638.4	2686.3	2734.2	2782.3	2830.6	2879.2	2928.0	2977.1
	S	0.8321	7.9094	7.9933	8.1261	8.2504	8.3676	8.4785	8.5839	8.6844	8.7806
kPa 30 (69.12) °C	V	1.022	5229.3	5322.0	5714.4	6104.6	6493.2	6880.8	7267.5	7653.8	8039.7
	U	289.271	2468.6	2477.1	2513.6	2550.2	2586.8	2623.6	2660.7	2698.0	2735.6
	H	289.302	2625.4	2636.8	2685.1	2733.3	2781.6	2830.0	2878.7	2927.6	2976.8
	S	0.9441	7.7695	7.8024	7.9363	8.0614	8.1791	8.2903	8.3960	8.4967	8.5930
kPa 40 (75.89) °C	V	1.027	3993.4	.....	4279.2	4573.3	4865.8	5157.2	5447.8	5738.0	6027.7
	U	317.609	2477.1	.....	2512.6	2549.4	2586.2	2623.2	2660.3	2697.7	2735.4
	H	317.650	2636.9	.....	2683.8	2732.3	2780.9	2829.5	2878.2	2927.2	2976.5
	S	1.0261	7.6709	.....	7.8009	7.9268	8.0450	8.1566	8.2624	8.3633	8.4598
kPa 50 (81.35) °C	V	1.030	3240.2	.....	3418.1	3654.5	3889.3	4123.0	4356.0	4588.5	4820.5
	U	340.513	2484.0	.....	2511.7	2548.6	2585.6	2622.7	2659.9	2697.4	2735.1
	H	340.564	2646.0	.....	2682.6	2731.4	2780.1	2828.9	2877.7	2926.8	2976.1
	S	1.0912	7.5947	.....	7.6953	7.8219	7.9406	8.0526	8.1587	8.2598	8.3564
kPa 75 (91.79) °C	V	1.037	2216.9	.....	2269.8	2429.4	2587.3	2744.2	2900.2	3055.8	3210.9
	U	384.374	2496.7	.....	2509.2	2546.7	2584.2	2621.6	2659.0	2696.7	2734.5
	H	384.451	2663.0	.....	2679.4	2728.9	2778.2	2827.4	2876.6	2925.8	2975.3
	S	1.2131	7.4570	.....	7.5014	7.6300	7.7500	7.8629	7.9697	8.0712	8.1681
kPa 100 (99.63) °C	V	1.043	1693.7	.....	1695.5	1816.7	1936.3	2054.7	2172.3	2289.4	2406.1
	U	417.406	2506.1	.....	2506.6	2544.8	2582.7	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9
	H	417.511	2675.4	.....	2676.2	2726.5	2776.3	2825.9	2875.4	2924.9	2974.5
	S	1.3027	7.3598	.....	7.3618	7.4923	7.6137	7.7275	7.8349	7.9369	8.0342

P

$V = \text{SPECIFIC VOLUME } \text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
 $U = \text{SPECIFIC INTERNAL ENERGY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $H = \text{SPECIFIC ENTHALPY } \text{kJ kg}^{-1}$
 $S = \text{SPECIFIC ENTROPY } \text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Superheated Steam, SI units

TEMPERATURE: t °C
 (TEMPERATURE: T kelvins)



P/kPa ($t^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)	sat. liq.	sat. vap.	75 °C (348.15) K	100 °C (373.15) K	125 °C (398.15) K	150 °C (423.15) K	175 °C (448.15) K	200 °C (473.15) K	225 °C (498.15) K	250 °C (523.15) K
1 kPa (6.98) °C	V 1.000 U 29.334 H 29.335 S 0.1060	129200. 2385.2 2514.4 8.9767	<p>En una línea horizontal la presión es constante y la temperatura varía (el vapor sobrecalentado tiene dos grados de libertad)</p>							
10 kPa (45.83) °C	V 1.010 U 191.822 H 191.832 S 0.6493	14670. 2438.0 2584.8 8.1511								
20 kPa (60.09) °C	V 1.017 U 251.432 H 251.453 S 0.8321	7649.8 2456.9 2609.9 7.9094								
30 kPa (69.12) °C	V 1.022 U 289.271 H 289.302 S 0.9441	5229.3 2468.6 2625.4 7.7695								
40 kPa (75.89) °C	V 1.027 U 317.609 H 317.650 S 1.0261	3993.4 2477.1 2636.9 7.6709								
50 kPa (81.35) °C	V 1.030 U 340.513 H 340.564 S 1.0912	3240.2 2484.0 2646.0 7.5947								
75 kPa (91.79) °C	V 1.037 U 384.374 H 384.451 S 1.2131	2216.9 2496.7 2663.0 7.4570								
100 kPa (99.63) °C	V 1.043 U 417.406 H 417.511 S 1.3027	1693.7 2506.1 2675.4 7.3598								

P

En estado de saturación la temperatura y presión NO son independientes entre sí (un grado de libertad)

g^{-1}
 $GY \text{ kJ kg}^{-1}$
 kg^{-1}
 $g^{-1} K^{-1}$

Superheated Steam, SI units

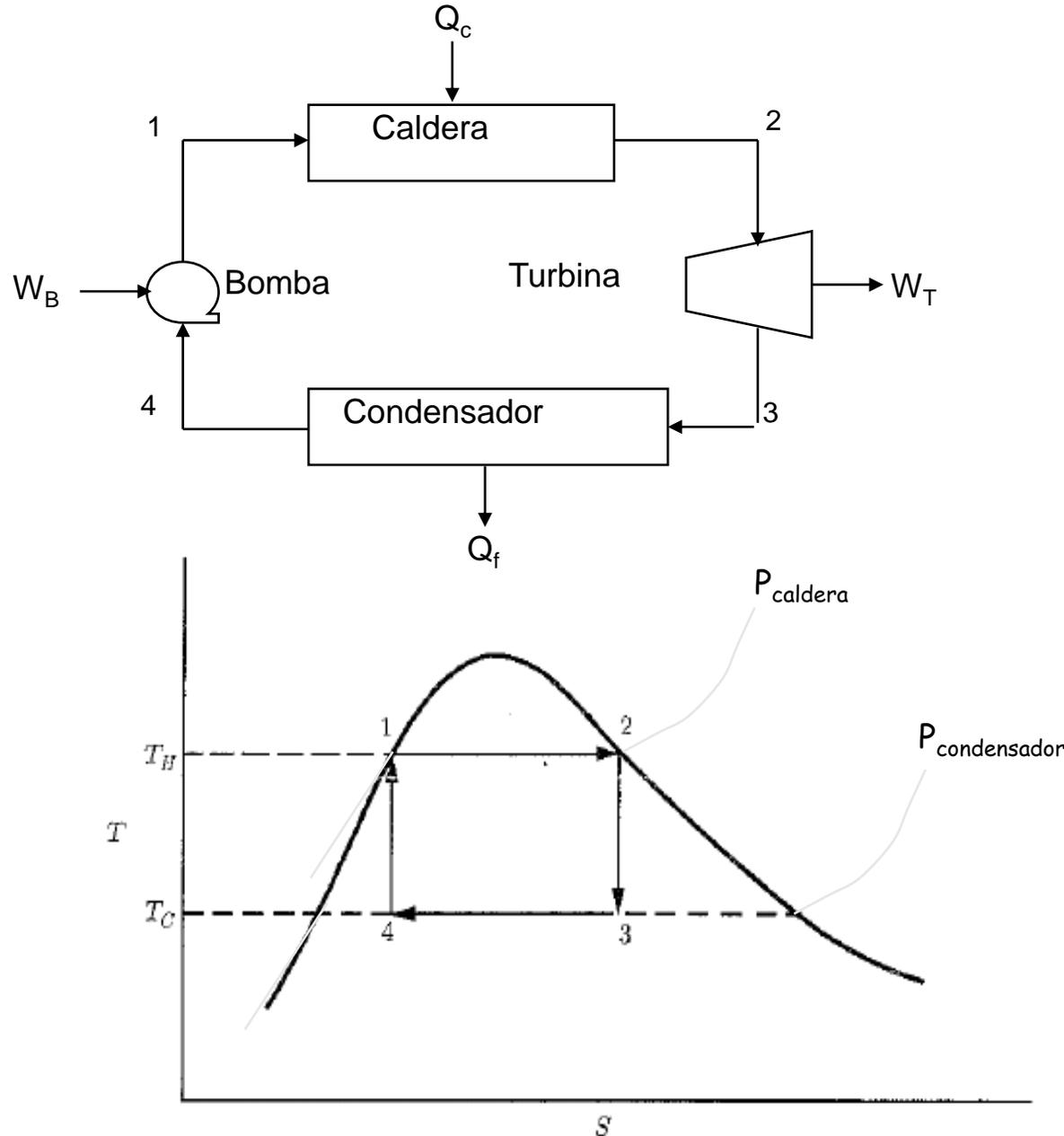
TEMPERATURE: $t \text{ } ^\circ\text{C}$
 (TEMPERATURE: T kelvins)



P/kPa ($t^{\text{sat}}/^\circ\text{C}$)		sat. liq.	sat. vap.	75 $^\circ\text{C}$ (348.15) K	100 $^\circ\text{C}$ (373.15) K	125 $^\circ\text{C}$ (398.15) K	150 $^\circ\text{C}$ (423.15) K	175 $^\circ\text{C}$ (448.15) K	200 $^\circ\text{C}$ (473.15) K	225 $^\circ\text{C}$ (498.15) K	250 $^\circ\text{C}$ (523.15) K
1 (6.98) $^\circ\text{C}$	V	1.000	129200.	60640.	172180.	83720.	195270.	206810.	218350.	229890.	241430.
	U	29.334	2385.2	2480.8	2516.4	2552.3	2588.5	2624.9	2661.7	2698.8	2736.3
	H	29.335	2514.4	2641.5	2588.6	2736.0	2783.7	2831.7	2880.1	2928.7	2977.7
	S	0.1060	8.9767	9.3828	9.5136	9.6365	9.7527	9.8629	9.9679	10.0681	10.1641
10 (45.83) $^\circ\text{C}$	V	1.010	14670.	16030.	17190.	18350.	19510.	20660.	21820.	22980.	24130.
	U	191.822	2438.0	2479.7	2515.6	2551.6	2588.0	2624.5	2661.4	2698.6	2736.1
	H	191.832	2584.8	2640.0	2687.5	2735.2	2783.1	2831.2	2879.6	2928.4	2977.4
	S	0.6493	8.1511	8.3168	8.4486	8.5722	8.6888	8.7994	8.9045	9.0049	9.1010
20 (60.09) $^\circ\text{C}$	V	1.017	7649.8	8000.0	8584.7	9167.1	9748.0	10320.	10900.	11480.	12060.
	U	251.432	2456.9	2478.4	2514.6	2550.9	2587.4	2624.1	2661.0	2698.3	2735.8
	H	251.453	2609.9	2638.4	2686.3	2734.2	2782.3	2830.6	2879.2	2928.0	2977.1
	S	0.8321	7.9094	7.9933	8.1261	8.2504	8.3676	8.4785	8.5839	8.6844	8.7806
30 (69.12) $^\circ\text{C}$	V	1.022	5229.3	5322.0	5714.4	6104.6	6493.2	6880.8	7267.5	7653.8	8039.7
	U	289.271	2468.6	2477.1	2513.6	2550.2	2586.8	2623.6	2660.7	2698.0	2735.6
	H	289.302	2625.4	2636.8	2685.1	2733.3	2781.6	2830.0	2878.7	2927.6	2976.8
	S	0.9441	7.7695	7.8024	7.9363	8.0614	8.1791	8.2903	8.3960	8.4967	8.5930
40 (75.89) $^\circ\text{C}$	V	1.027	3993.4	.....	4279.2	4573.3	4865.8	5157.2	5447.8	5738.0	6027.7
	U	317.609	2477.1	.....	2512.6	2549.4	2586.2	2623.2	2660.3	2697.7	2735.4
	H	317.650	2636.9	.....	2683.8	2732.3	2780.9	2829.5	2878.2	2927.2	2976.5
	S	1.0261	7.6709	.....	7.8009	7.9268	8.0450	8.1566	8.2624	8.3633	8.4598
50 (81.35) $^\circ\text{C}$	V	1.030	3240.2	.....	3418.1	3654.5	3889.3	4123.0	4356.0	4588.5	4820.5
	U	340.513	2484.0	.....	2511.7	2548.6	2585.6	2622.7	2659.9	2697.4	2735.1
	H	340.564	2646.0	.....	2682.6	2731.4	2780.1	2828.9	2877.7	2926.8	2976.1
	S	1.0912	7.5947	.....	7.6953	7.8219	7.9406	8.0526	8.1587	8.2598	8.3564
75 (91.79) $^\circ\text{C}$	V	1.037	2216.9	.....	2269.8	2429.4	2587.3	2744.2	2900.2	3055.8	3210.9
	U	384.374	2496.7	.....	2509.2	2546.7	2584.2	2621.6	2659.0	2696.7	2734.5
	H	384.451	2663.0	.....	2679.4	2728.9	2778.2	2827.4	2876.6	2925.8	2975.3
	S	1.2131	7.4570	.....	7.5014	7.6300	7.7500	7.8629	7.9697	8.0712	8.1681
100 (99.63) $^\circ\text{C}$	V	1.043	1693.7	.....	1695.5	1816.7	1936.3	2054.7	2172.3	2289.4	2406.1
	U	417.406	2506.1	.....	2506.6	2544.8	2582.7	2620.4	2658.1	2695.9	2733.9
	H	417.511	2675.4	.....	2676.2	2726.5	2776.3	2825.9	2875.4	2924.9	2974.5
	S	1.3027	7.3598	.....	7.3618	7.4923	7.6137	7.7275	7.8349	7.9369	8.0342

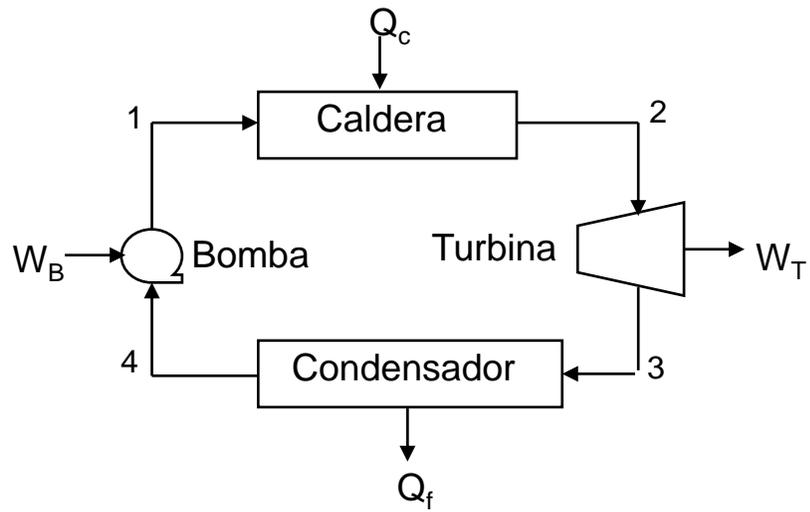
P

Ciclo de Carnot con cambios de fase



Este ciclo tiene dos inconvenientes principales:

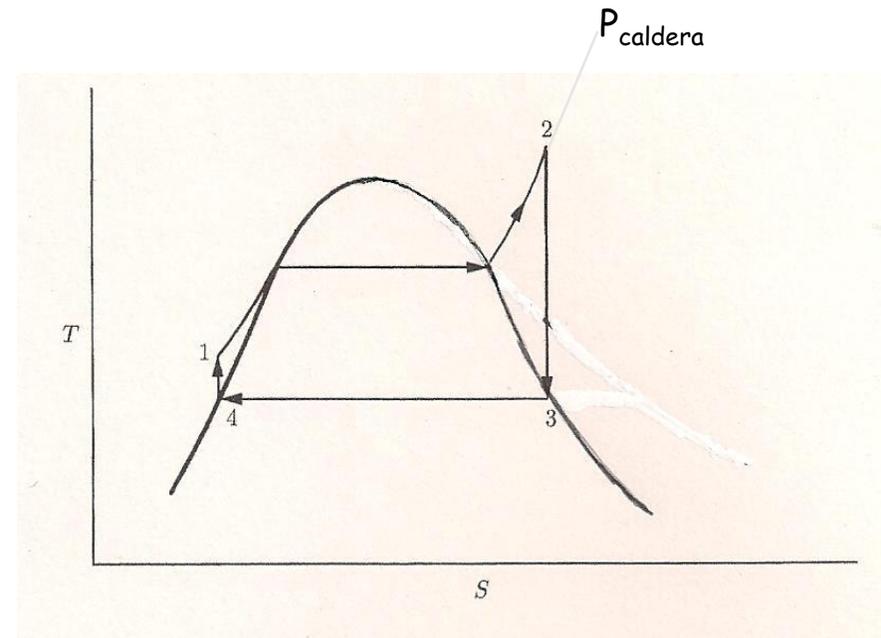
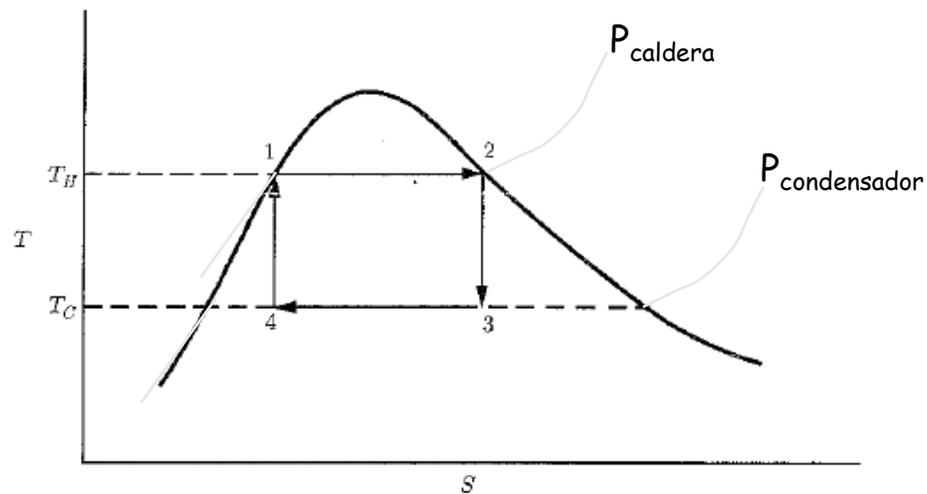
1. Corrosión de los álabes de la turbina por la presencia de cantidades importantes de líquido.
2. Cavitación de la bomba por la presencia de burbujas de vapor.



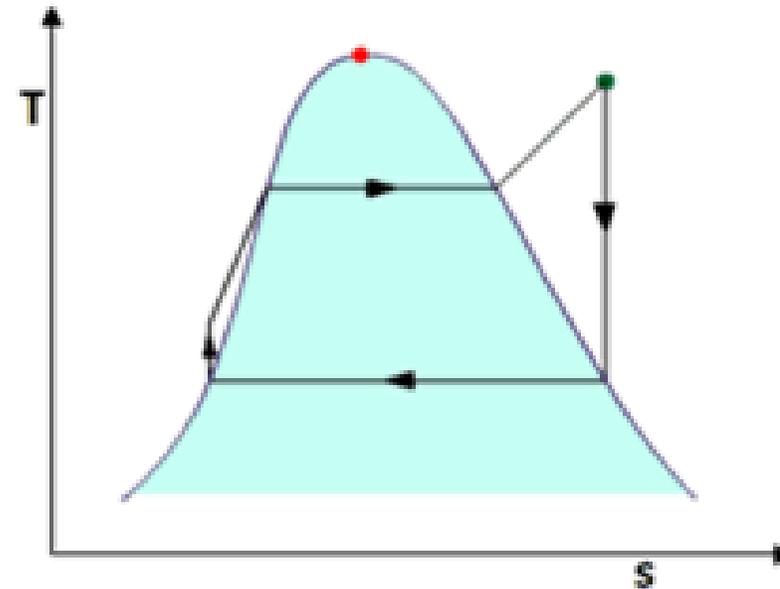
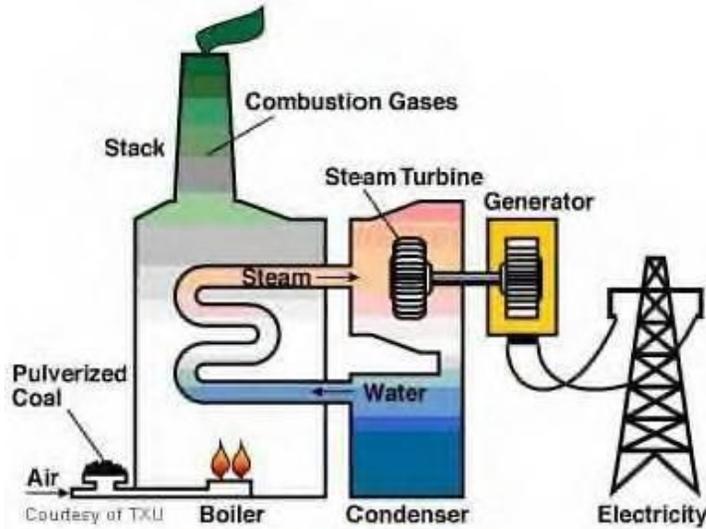
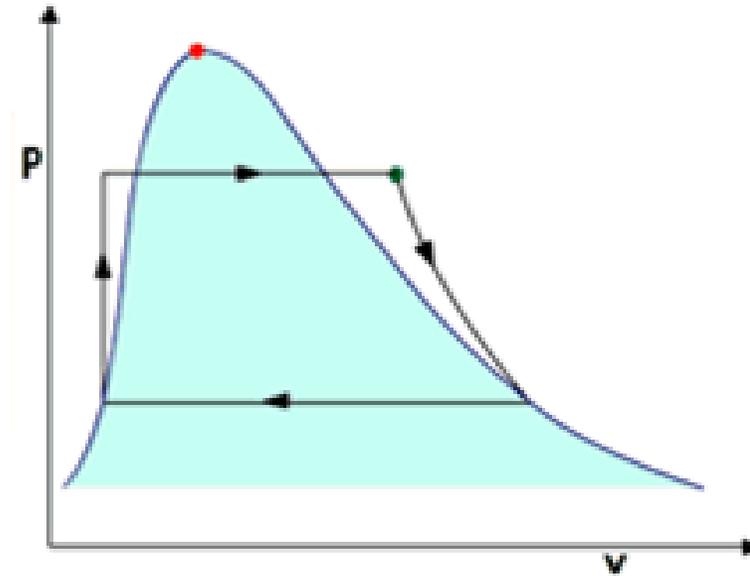
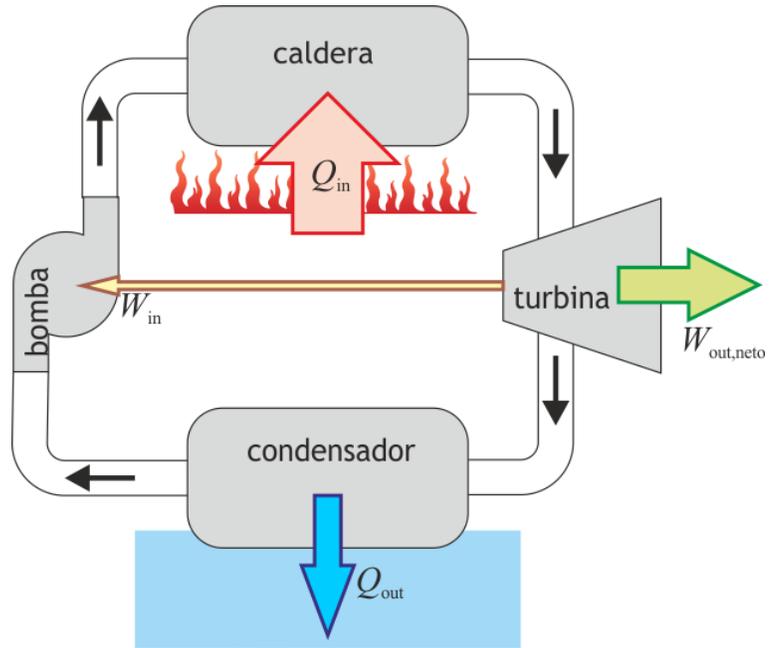
Ciclo Rankine

Se busca operar la MT de manera que la etapa 3-4 se cumpla, en lo posible, entre condiciones de vapor saturado y líquido saturado. Esto comporta una operación no isotérmica en la caldera.

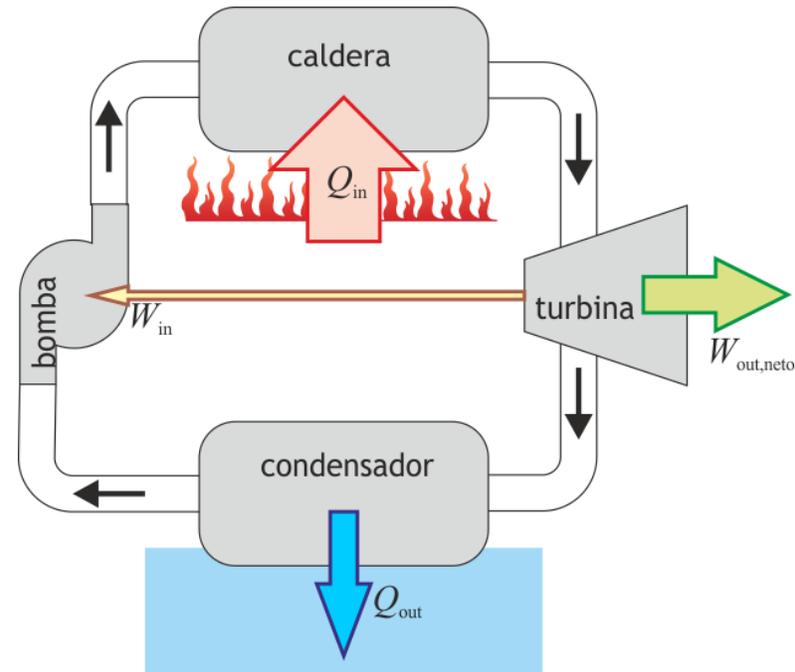
Ciclo de Carnot con cambios de fase



Ciclo Rankine



Ciclo Rankine



$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

$$|W| = |W_{turbina} + W_{bomba}|$$

$$|W| = |W_{turbina}| - |W_{bomba}|$$

$$W_{turbina} = \Delta H_{turbina}$$

$$Q_C = \Delta H_{condensador}$$

$$W_{bomba} = \Delta H_{bomba}$$

$$Q_H = \Delta H_{caldera}$$

Ciclo Rankine

En general el trabajo consumido al bombear un líquido resulta despreciable frente al trabajo entregado por la turbina.

$$dH = d(U + PV) = \underline{dU} + PdV + VdP = \underline{TdS} + VdP$$

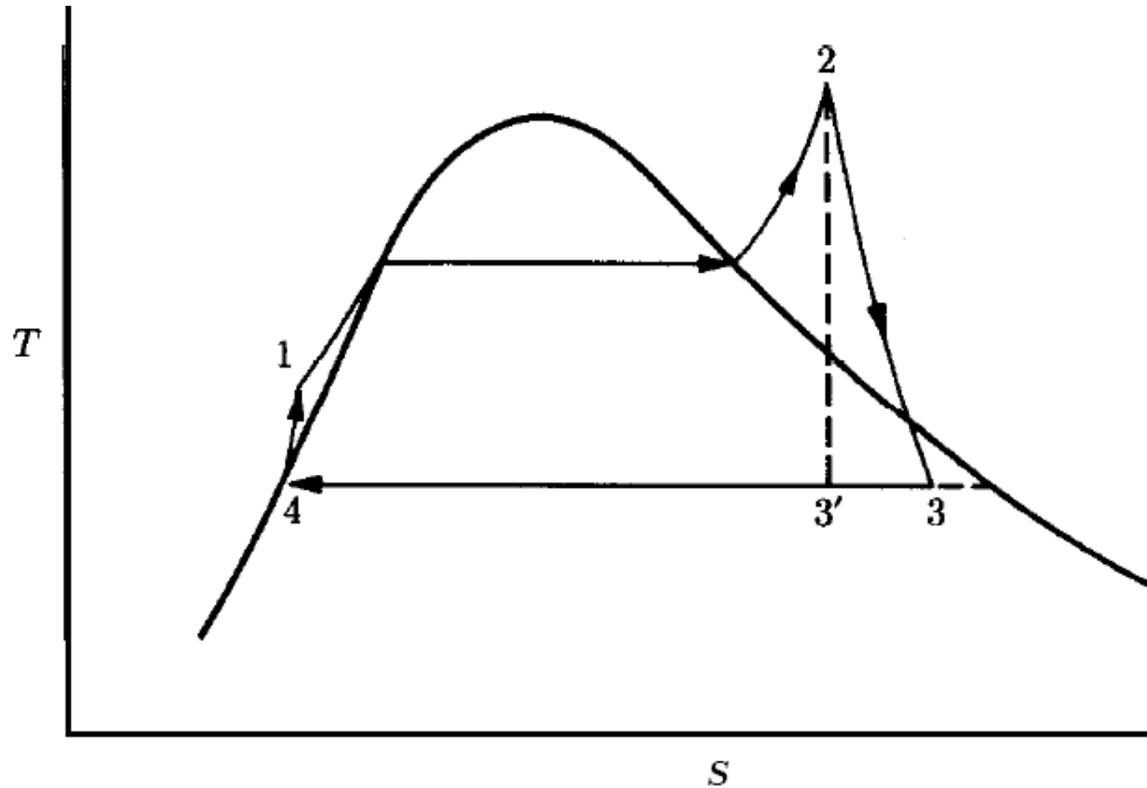
Para un proceso adiabático, reversible (isoentrópico): $\boxed{dH = VdP}$

Para la bomba $\boxed{\Delta H = W_B = V\Delta P}$ donde V es el volumen molar del líquido (surge del balance de energía, y de integrar la ecuación previa, suponiendo que el volumen del líquido es independiente de la presión).

Como el volumen líquido es pequeño, $W_B \lll W_T$

Rendimiento: $\boxed{\eta_{MT} = \left| \frac{W_T - W_B}{Q_c} \right| \cong \left| \frac{W_T}{Q_c} \right|}$

Ciclo Rankine

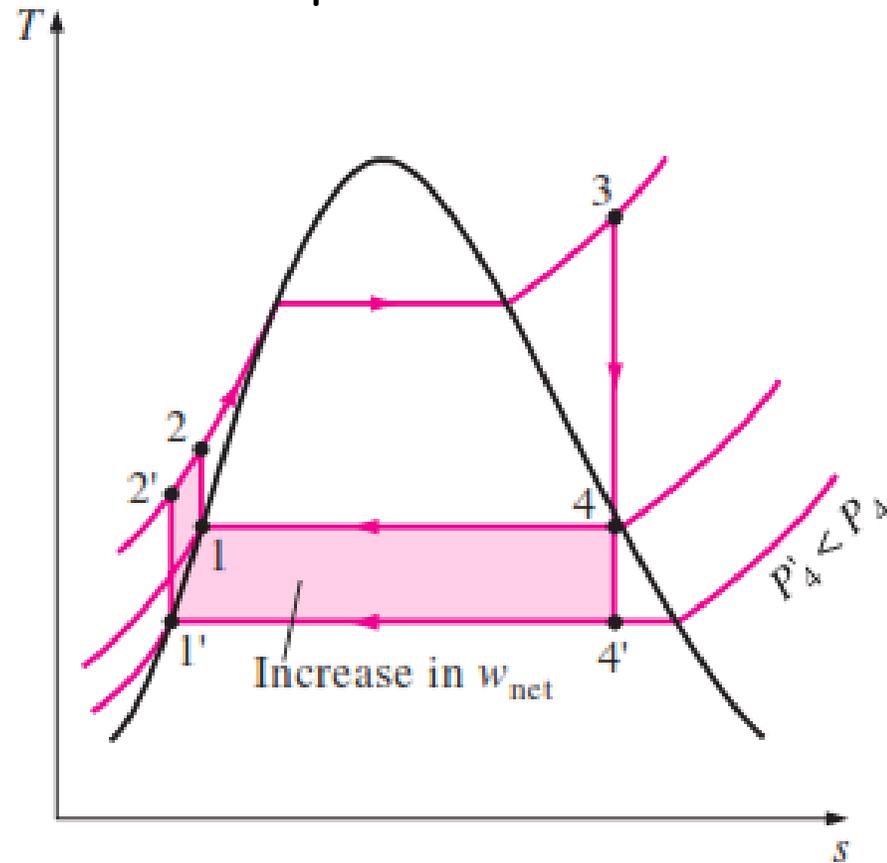


La turbina puede funcionar mediante un proceso irreversible, haciendo que **no sea estrictamente isoentrópica**

$$\eta_T = \left| \frac{W_{Real}}{W_{isoS}} \right|$$

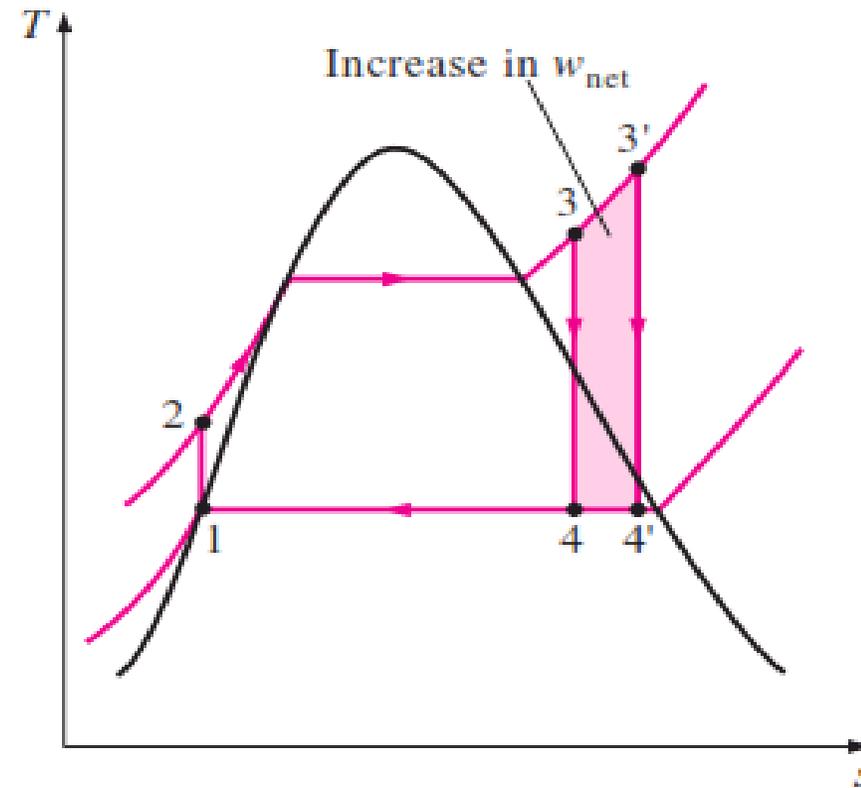
Mejoras del ciclo Rankine

Reducir la presión del condensador



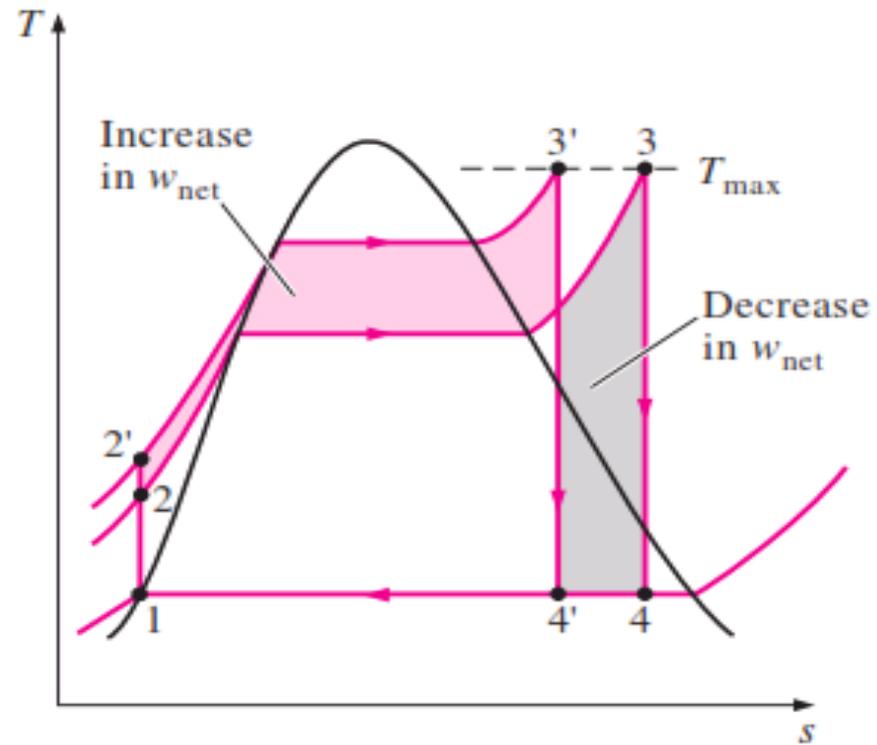
Mejoras del ciclo Rankine

Aumentar la temperatura de sobrecalentamiento



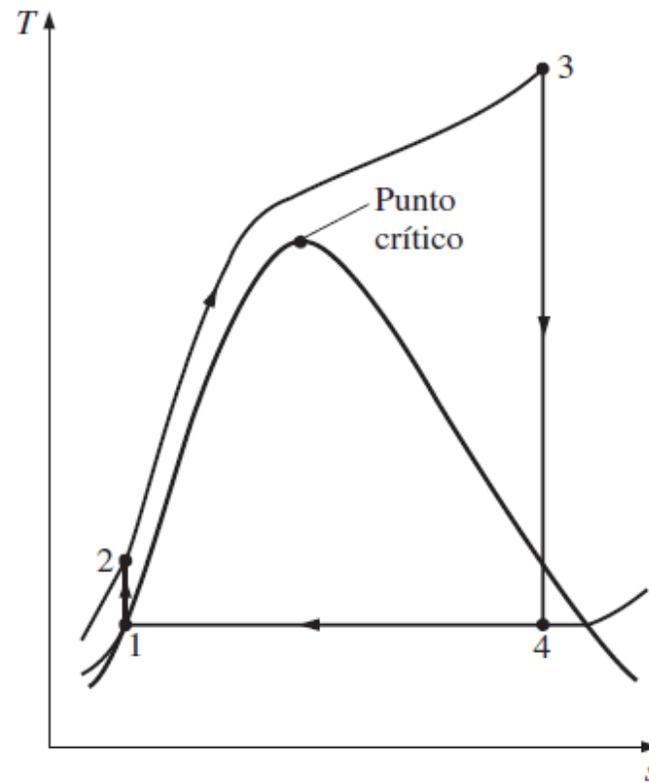
Mejoras del ciclo Rankine

Aumentar la presión de la caldera

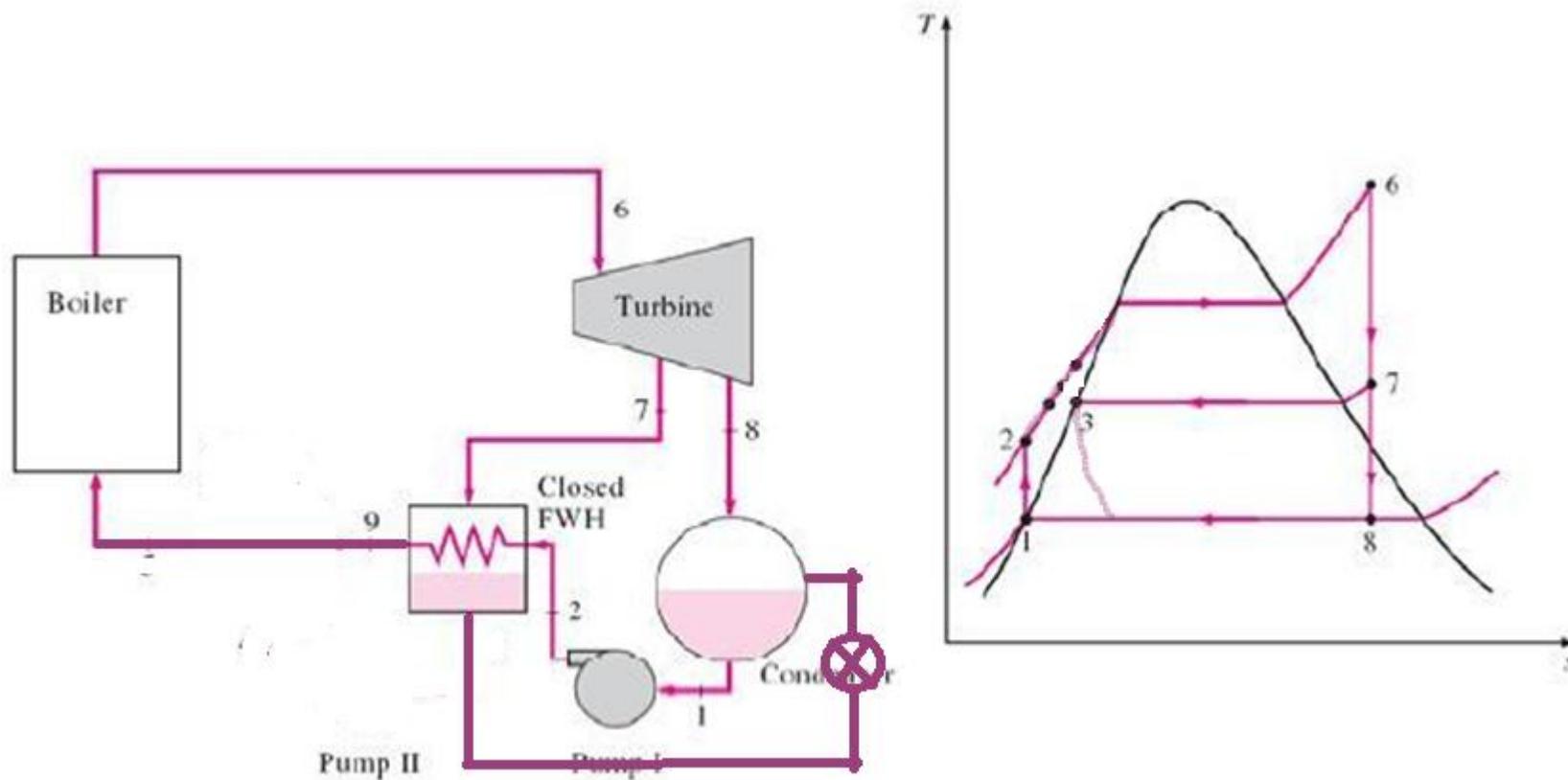


Mejoras del ciclo Rankine

Generar un ciclo Rankine supercrítico

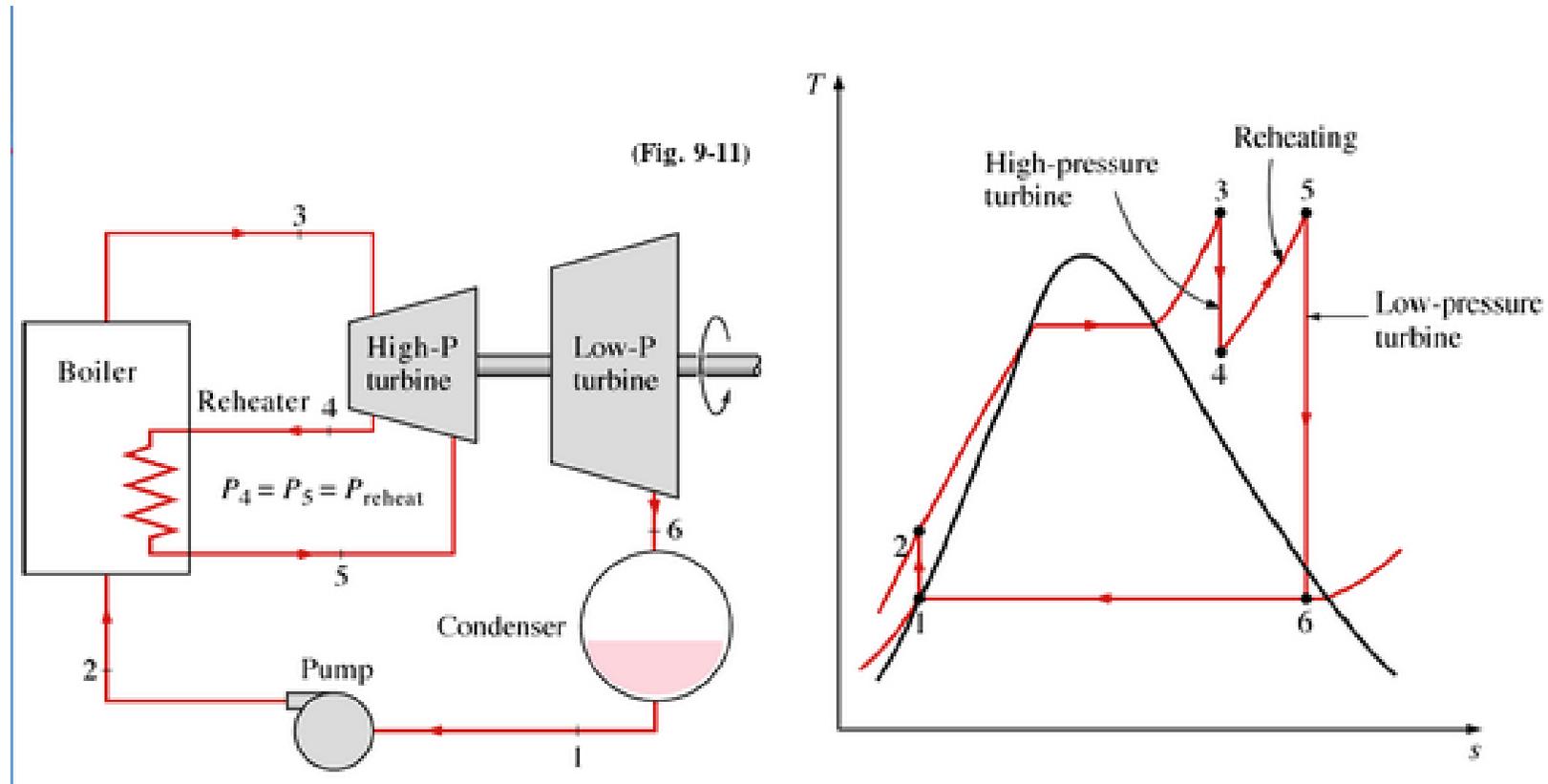


Mejoras del ciclo Rankine - Ciclo con regeneración



La idea principal consiste en precalentar el agua que va a entrar a la caldera con una corriente de vapor caliente que sale de la turbina a una presión intermedia. El efecto neto es un ahorro de calor en la caldera.

Mejoras del ciclo Rankine - Recalentamiento



La idea principal consiste en recalentar el vapor que sale de la turbina de alta presión en la caldera, antes de descomprimirlo en la turbina de baja presión. El efecto neto es un aumento del trabajo que entregan ambas turbinas.

Ejemplo

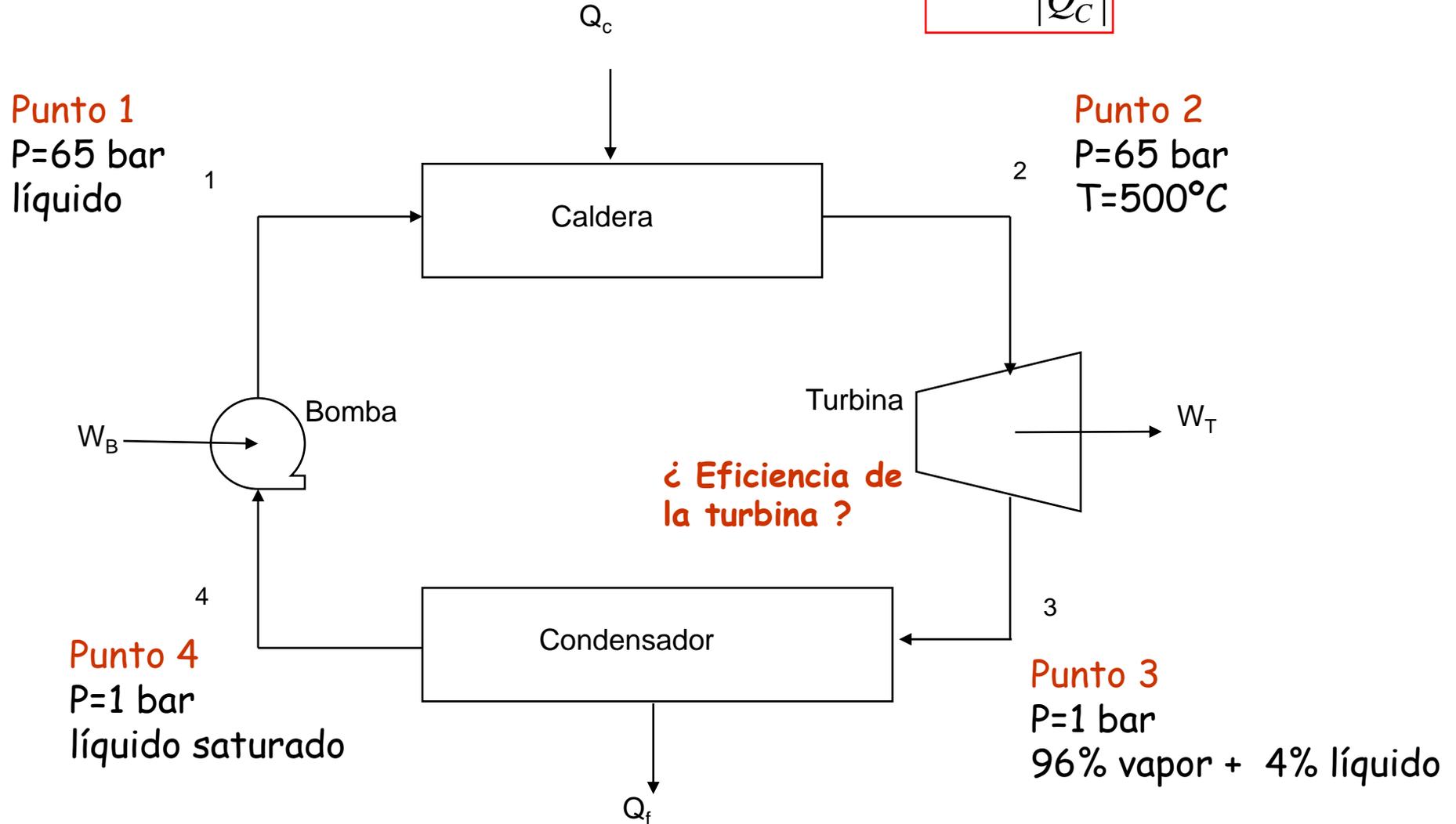
La figura muestra el ciclo básico de una **máquina térmica** que opera en **estado estacionario** con vapor de agua como fluido de trabajo. El vapor ingresa a la turbina a 65 bar y 500°C y descarga a presión atmosférica como vapor parcialmente condensado, con una calidad del 96%.

La turbina opera adiabáticamente. Del condensador sale agua líquida saturada, que es bombeada a la caldera en una operación adiabática.

Calcular la **eficiencia** con la que opera la turbina y la eficiencia con la que opera el ciclo (eficiencia de la máquina térmica)

¿Eficiencia del ciclo?

$$\eta_{MT} = \left| \frac{W}{Q_C} \right|$$



De tablas de vapor:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 65 \text{ bar} \\ T_2 = 500^\circ\text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{ll} H_2 = 3416.4 \text{ kJ/kg} & \underline{S_2 = 6.8392 \text{ kJ/kgK}} \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 1 \text{ bar} \\ T_3 = T_{\text{sat}} \end{array} \right\} \begin{array}{ll} H^L = 417.511 \text{ kJ/kg} & S^L = 1.3027 \text{ kJ/kgK} \\ H^V = 2675.4 \text{ kJ/kg} & S^V = 7.3598 \text{ kJ/kgK} \end{array}$$

$$H_3 = 417.511 \times 0.04 + 2675.4 \times 0.96 \quad H_3 = 2585.08 \text{ kJ/kg}$$

$$S_3 = 1.3027 \times 0.04 + 7.3598 \times 0.96 \quad S_3 = 7.0775 \text{ kJ/kgK} > S_2$$

$$W_{\text{irrev}} = H_3 - H_2 = 2585.08 - 3416.4 \quad \boxed{W_{\text{irrev}} = -831.3 \text{ kJ/kg}}$$

El W_{rev} corresponde a una operación isoentrópica de la turbina:

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 1 \text{ bar} \\ \underline{S_{3,\text{rev}} = 6.8392} \end{array} \right\} \begin{array}{l} S_{3,\text{rev}} = 1.3027 \times (1 - x^{V-\text{rev}}) + 7.3598 \times x^{V-\text{rev}} = 6.8392 \\ H_{3,\text{rev}} = 417.511 \times 0.086 + 2675.4 \times 0.914 = 2481.2 \text{ kJ/kg} \end{array} \quad \boxed{x^{V-\text{rev}} = 0.914}$$

$$W_{\text{rev}} = H_{3,\text{rev}} - H_2 = 2481.2 - 3416.4 \quad \boxed{W_{\text{rev}} = -935.2 \text{ kJ/kg}}$$

Rendimiento de la turbina: $\eta_{\text{Turbina}} = \left| \frac{W_{\text{irrev}}}{W_{\text{rev}}} \right| = \frac{831.3}{935.2}$ $\eta_{\text{Turbina}} = 88.9\%$

Rendimiento
máq. térmica: $\eta_{\text{MT}} = \left| \frac{W_T - W_B}{Q_c} \right|$

Trabajo de la bomba adiabática: (1.044 cm³/g , liq sat a 1 bar)

$$W_{\text{bomba}} = V \times \Delta P = 1.044 \text{ cm}^3/\text{g} \times (65-1) \text{ bar} \quad W_{\text{bomba}} = 6.68 \text{ J/kg} \cong 0$$

$$W_{\text{bomba}} = 0 = H_1 - H_4 \quad H_1 = H_4 = H^L = 417.511 \text{ kJ/kg}$$

En la caldera:

$$Q_c = H_2 - H_1 = 3416.4 - 417.511$$

$$Q_c = 2998.9 \text{ kJ/kg}$$

$$W_T = W_{\text{irrev}} = -831.3 \text{ kJ/kg}$$

Rendimiento de la máquina térmica:

$$\eta_{\text{MT}} = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = \frac{831.3}{2998.9}$$

$$\eta_{\text{MT}} = 27.7\%$$

Ciclos con aire estándar

- Son ciclos de potencia, es decir, transforman calor en trabajo.
- Fluido: aire
- Sistema: cerrado
- Gas ideal
- Todos los procesos son reversibles

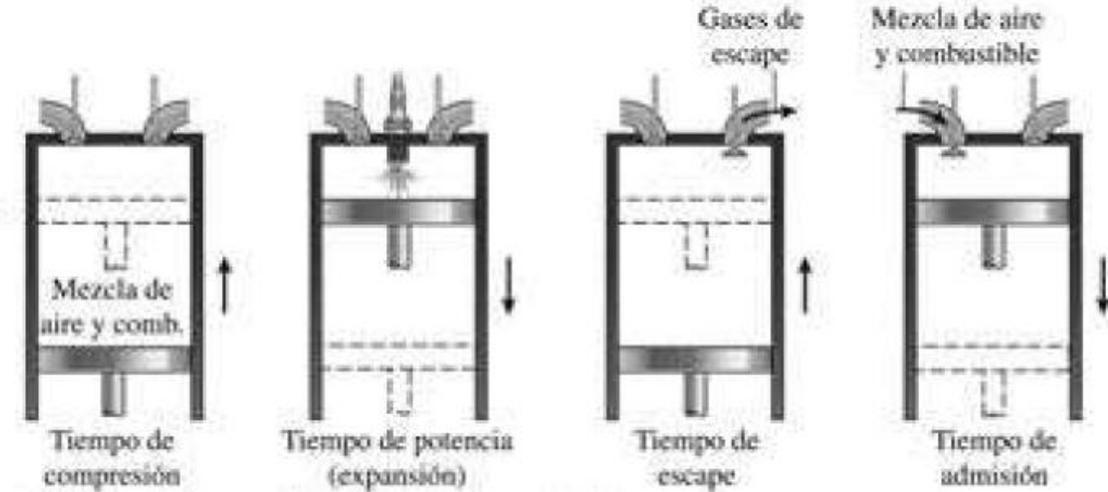
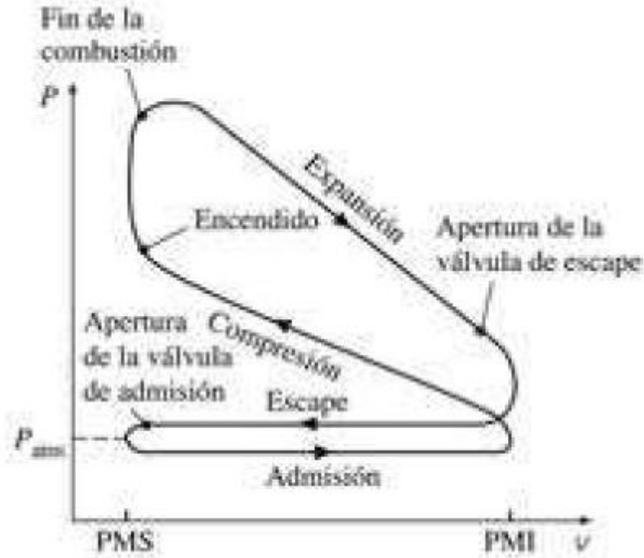
Motores reciprocantes de combustión interna

- No hay un ciclo en realidad, es un proceso abierto.
- La combustión interna se simplifica como un agregado externo de calor.
- El proceso de escape se sustituye por una pérdida de calor del sistema.
- Se suele suponer que el C_v y el C_p del gas son constantes (Aire estándar frío)

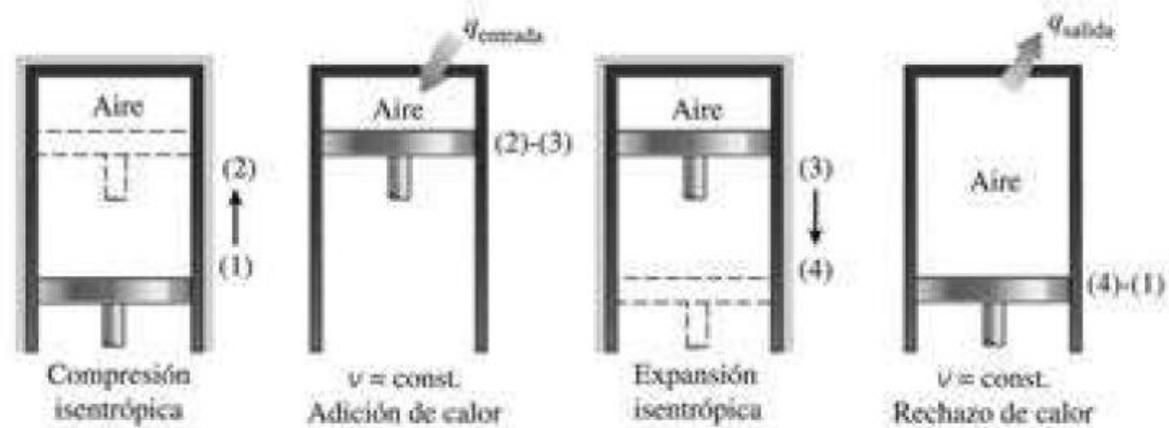
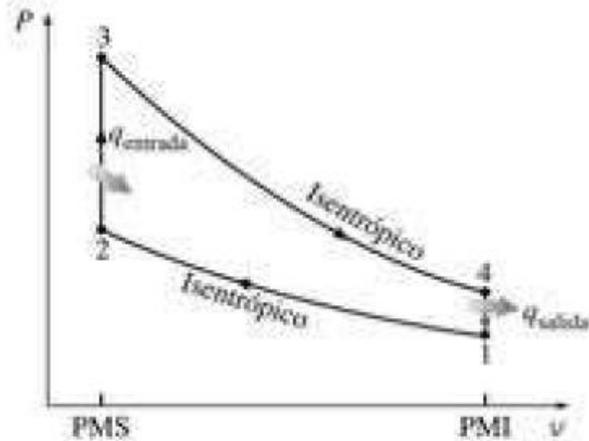
Motores reciprocantes de combustión interna

- Ciclo Otto de cuatro tiempos
- Ciclo Diesel
- Ciclo de Brayton

Ciclo Otto

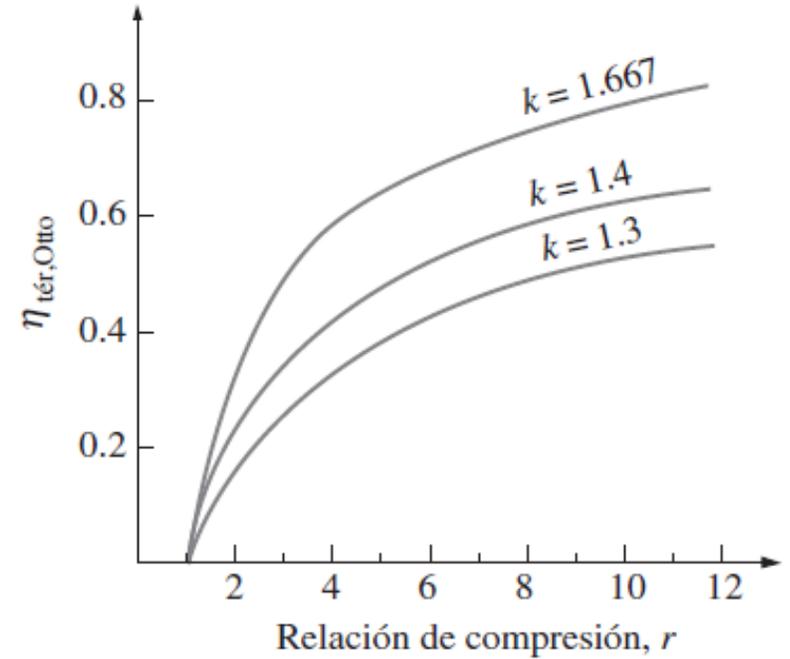
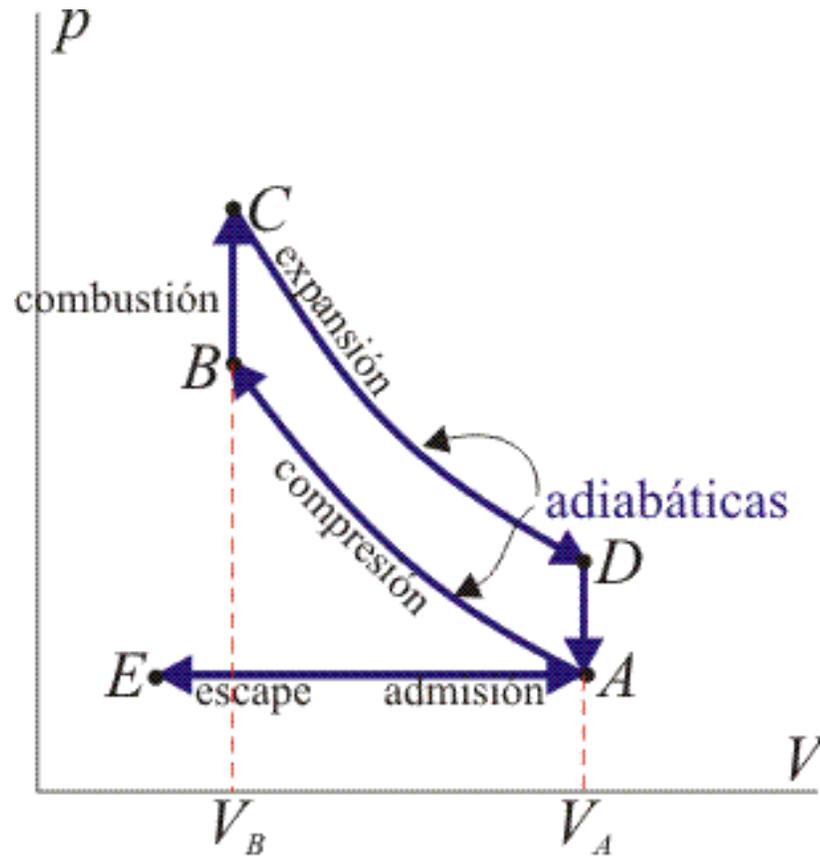
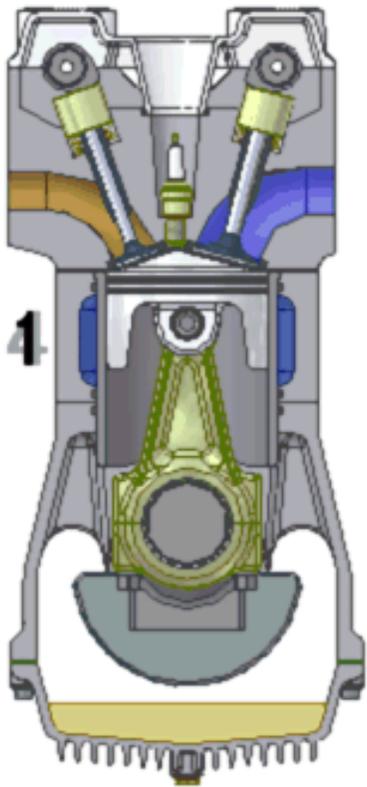


a) Motor real de encendido por chispa de cuatro tiempos



b) Ciclo de Otto ideal

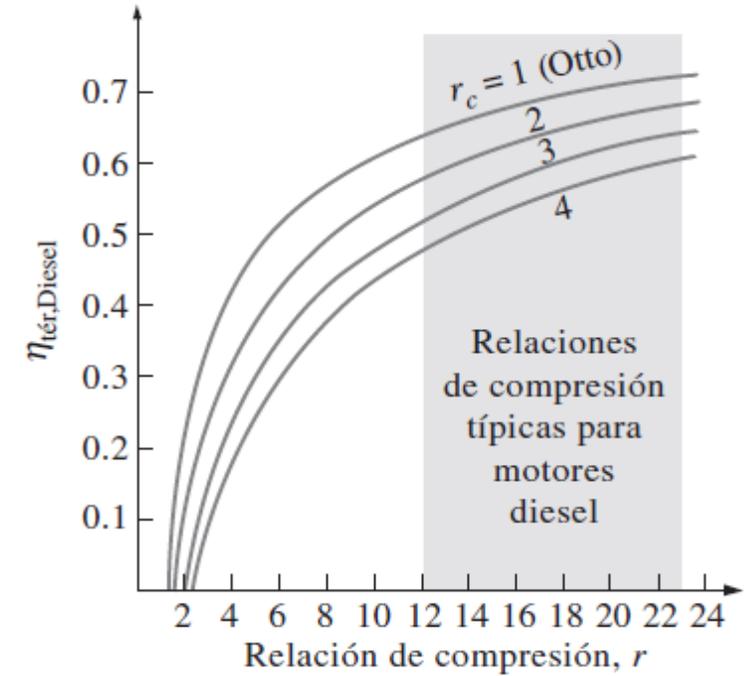
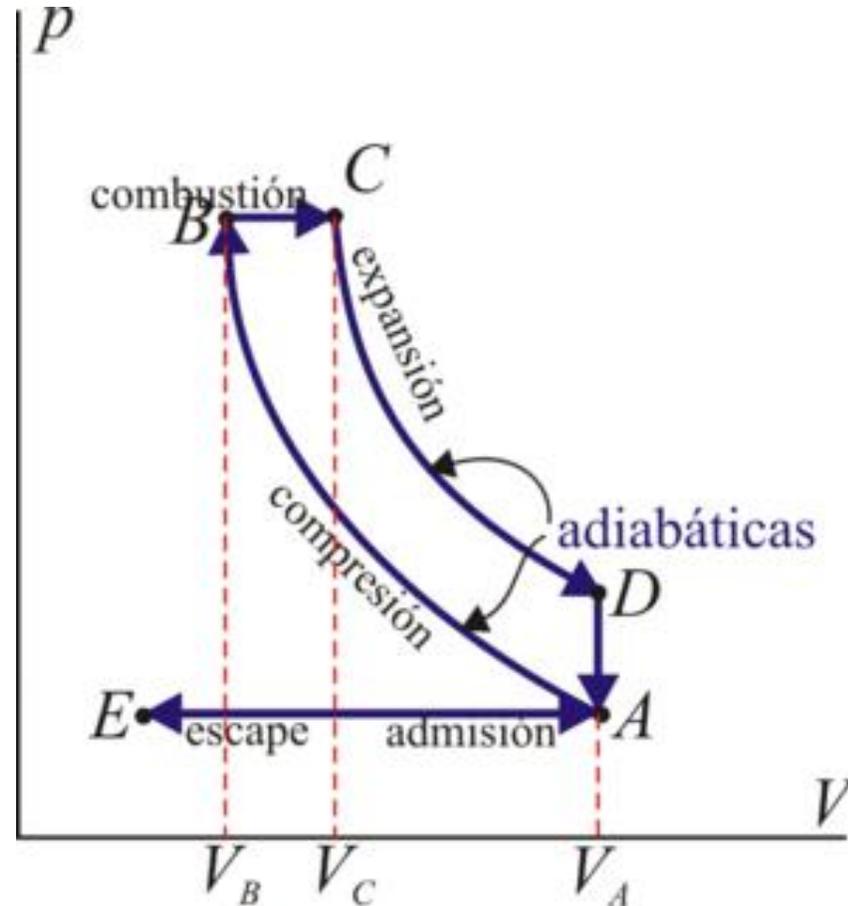
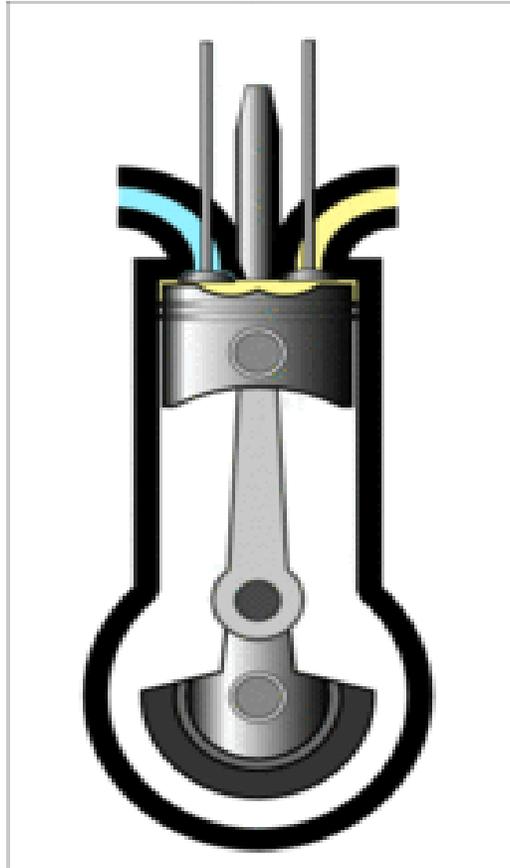
Ciclo Otto



$$\eta = 1 - r \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma-1}$$

$$r = \frac{V_C}{V_D}$$

Ciclo Diesel

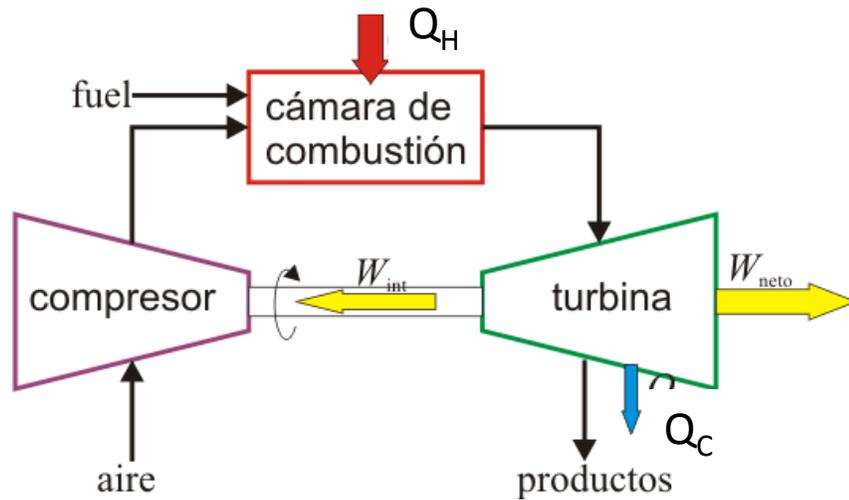


$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{(1/r_e)^\gamma - (1/r)^\gamma}{(1/r_e) - (1/r)} \right]$$

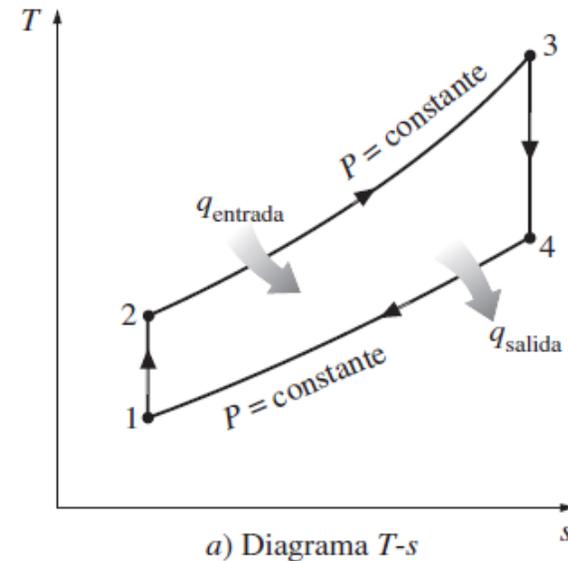
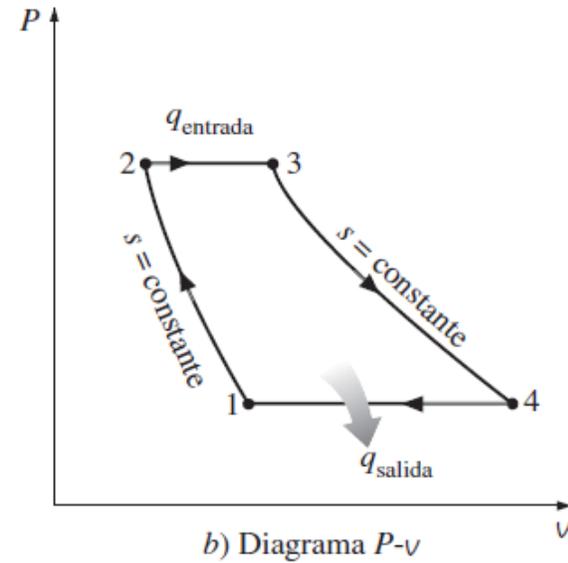
$$r = \frac{V_A}{V_B}$$

$$r_e = \frac{V_D}{V_C}$$

Ciclo Brayton



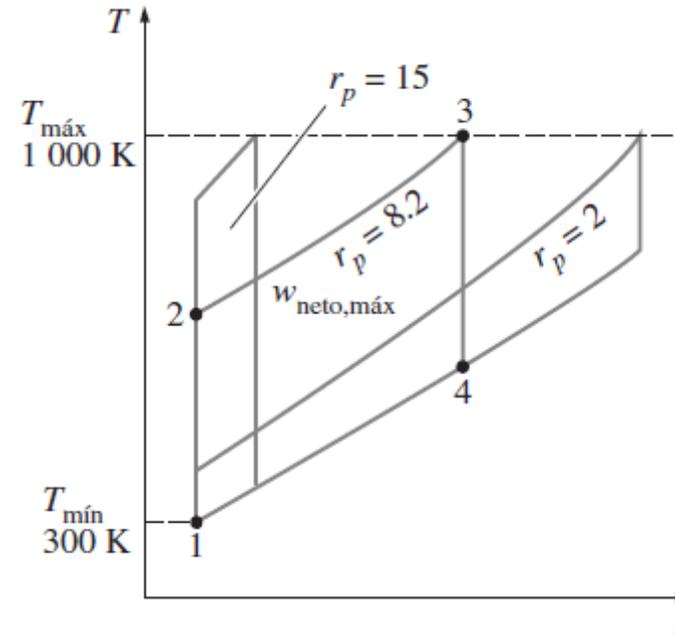
El ciclo Brayton se usa comprimiendo aire y aumentando súbitamente su temperatura por la quema de un combustible para después inyectarlo a una turbina



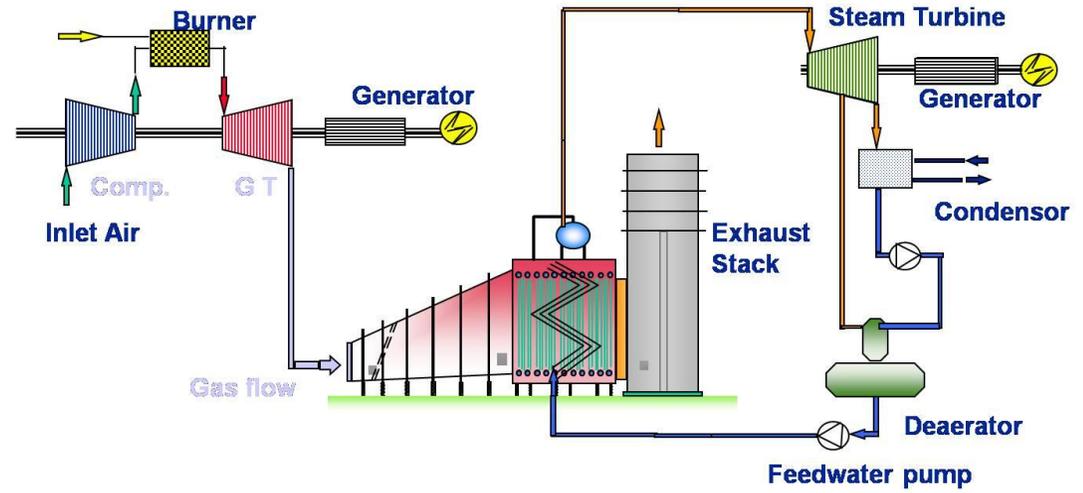
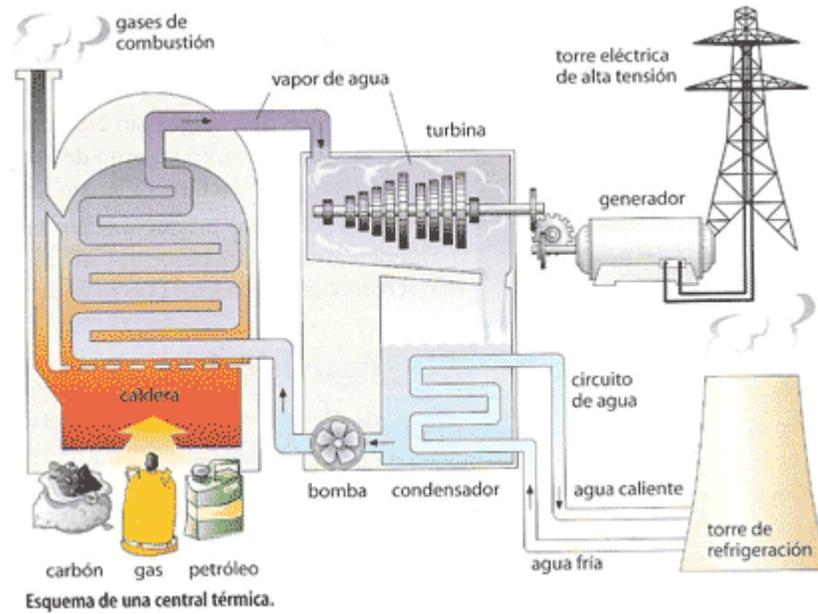
Ciclo Brayton

Para valores fijos de T_{\min} y T_{\max} , el trabajo neto del ciclo Brayton aumenta y luego disminuye según la relación de presiones entre el compresor y la descarga

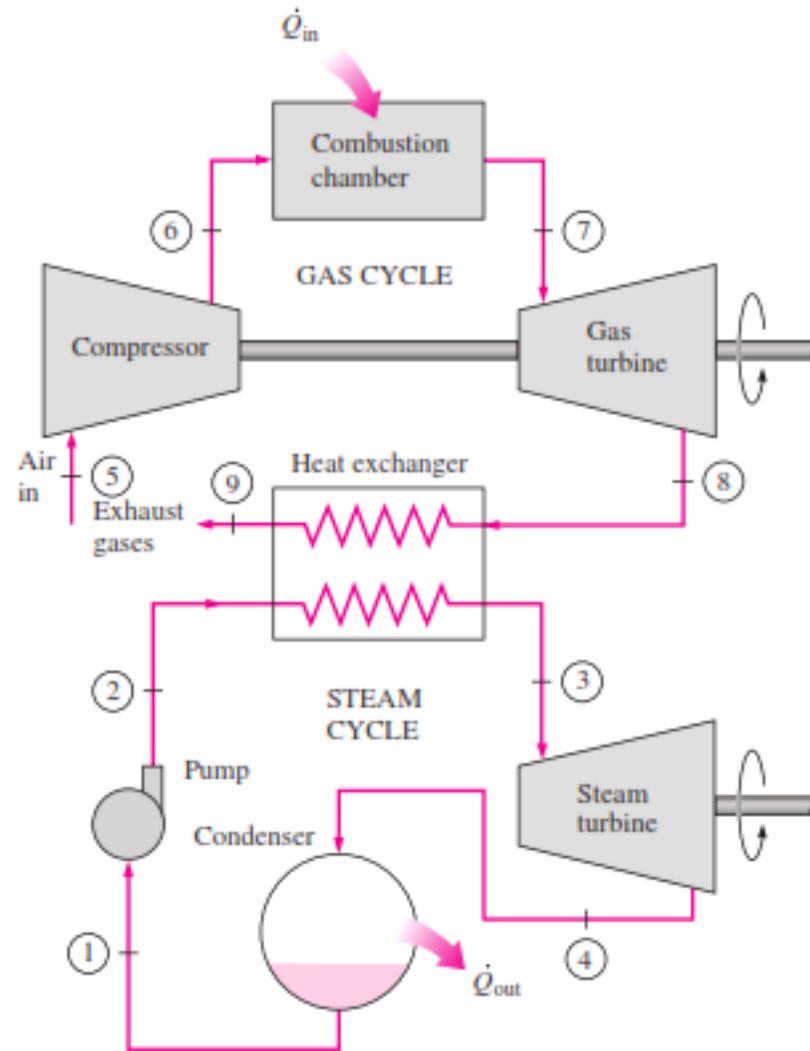
$$r_P = \left(\frac{T_{Max}}{T_{Min}} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}}$$



Centrales térmicas

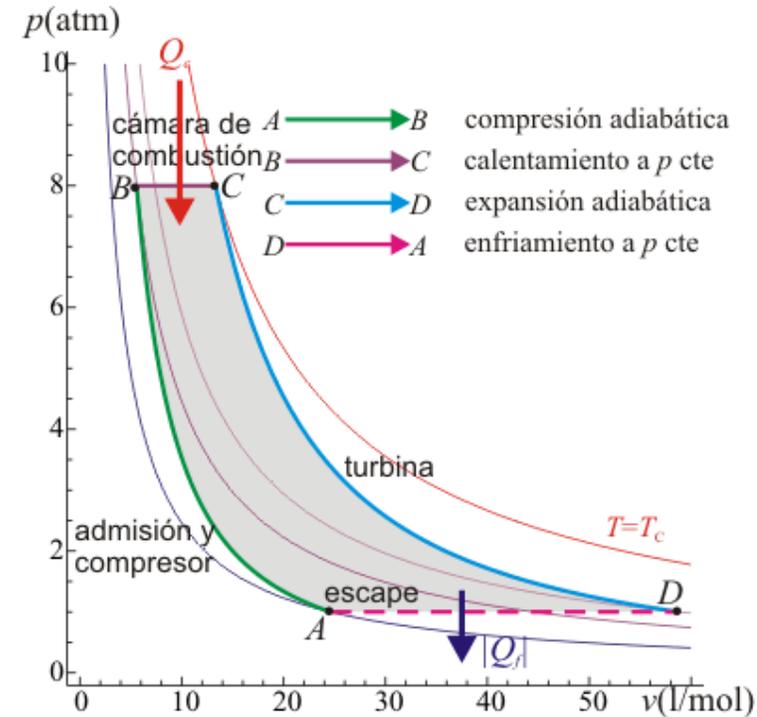
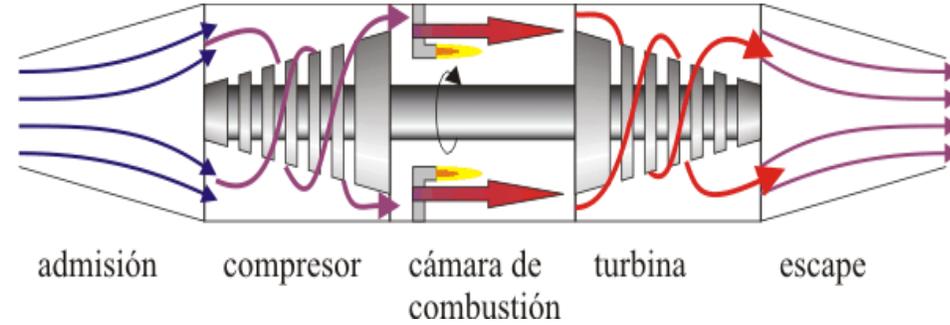
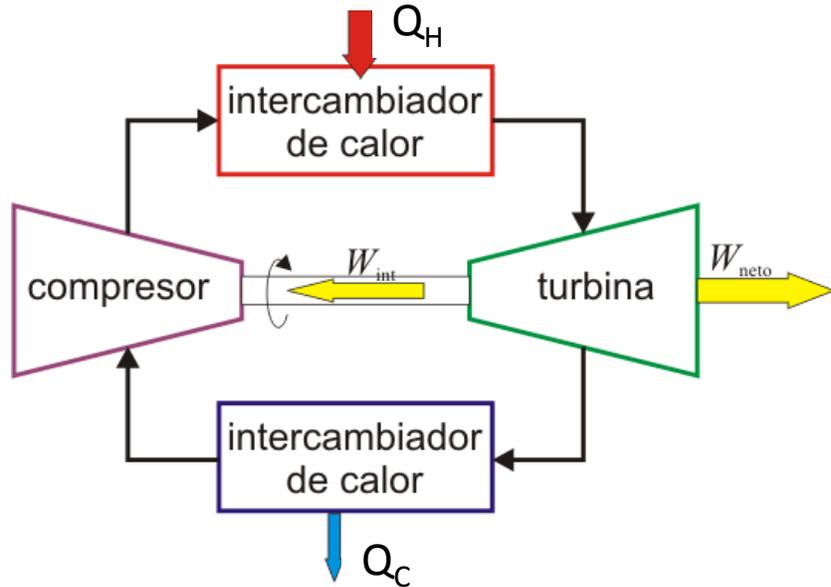
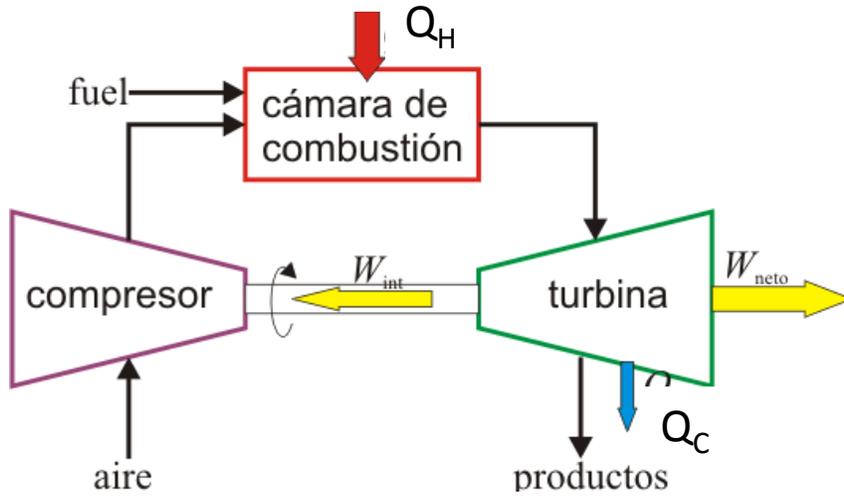


Centrales térmicas de ciclo combinado

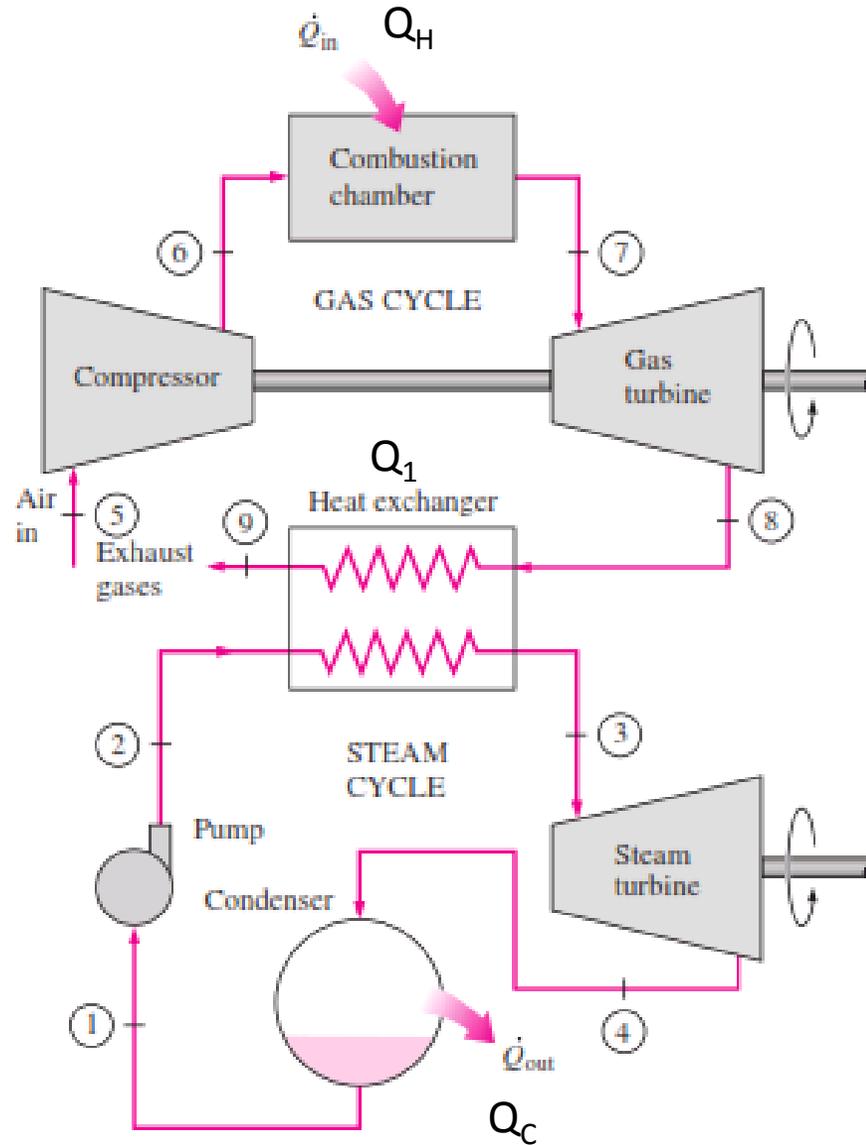


Centrales térmicas de ciclo combinado

Ciclo Brayton



Centrales térmicas de ciclo combinado



$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

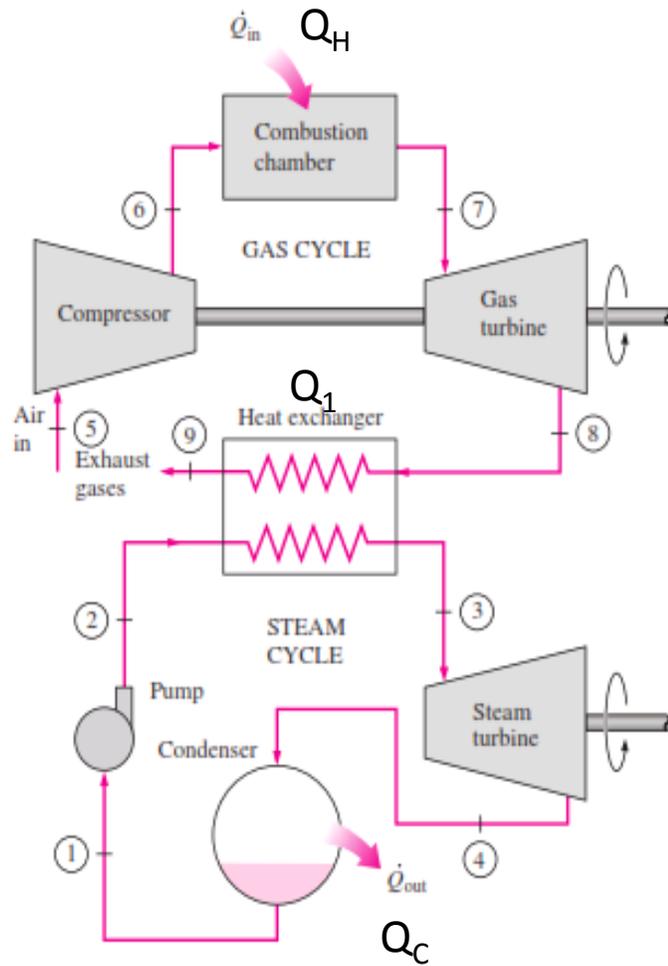
$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|W|_{Brayton} + |W|_{Rankine}}{|Q_H|}$$

$$|W|_{Brayton} = |Q_H| - |Q_1|$$

$$|W|_{Rankine} = |Q_1| - |Q_C|$$

$$\eta = \frac{|Q_H| - |Q_1| + |Q_1| - |Q_C|}{|Q_H|}$$

Centrales térmicas de ciclo combinado



$$\eta = \frac{|Q_H| - |Q_1| + |Q_1| - |Q_C|}{|Q_H|}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{|Q_1|}{|Q_H|}\right) + \left(\frac{|Q_1|}{|Q_H|} - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}\right)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{|Q_1|}{|Q_H|}\right) + \left(1 - \frac{|Q_C|}{|Q_1|}\right) \frac{|Q_1|}{|Q_H|}$$

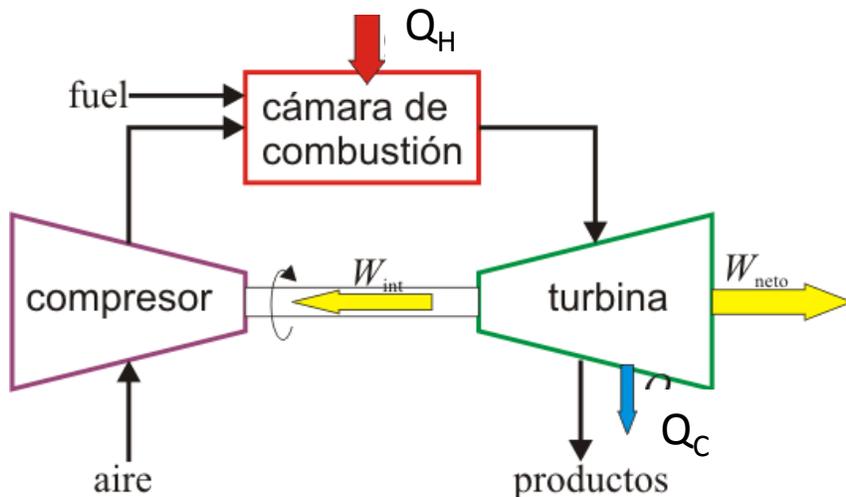
$$\eta = \eta_B + \eta_R (1 - \eta_B)$$

$$\eta_R \approx 0.3$$

$$\eta_B \approx 0.4$$

$$\eta = 0.58$$

Centrales térmicas de ciclo combinado



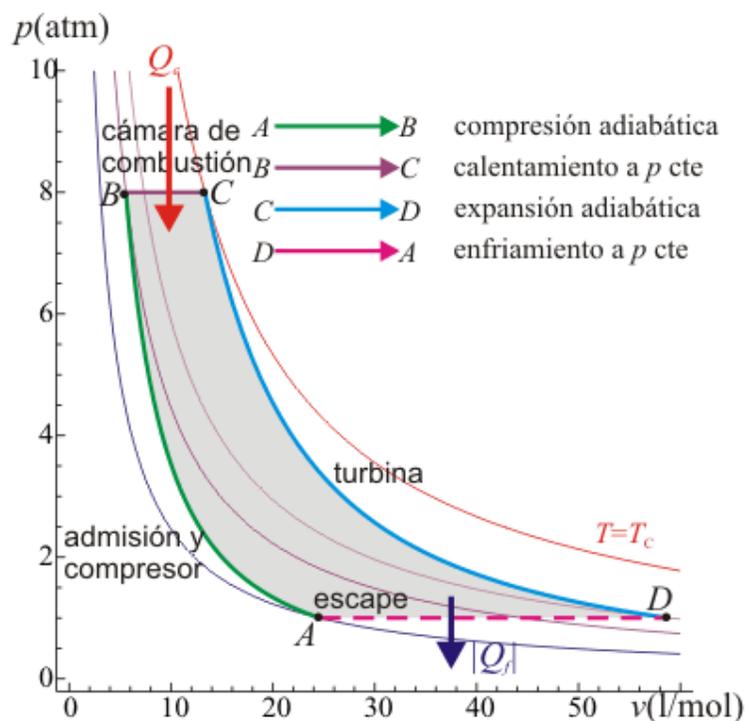
$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_C|}{|Q_H|}$$

$$\eta = 1 - \frac{C_p (T_D - T_A)}{C_p (T_C - T_B)}$$

$$P_A^{1-\gamma} T_A^\gamma = P_B^{1-\gamma} T_B^\gamma$$

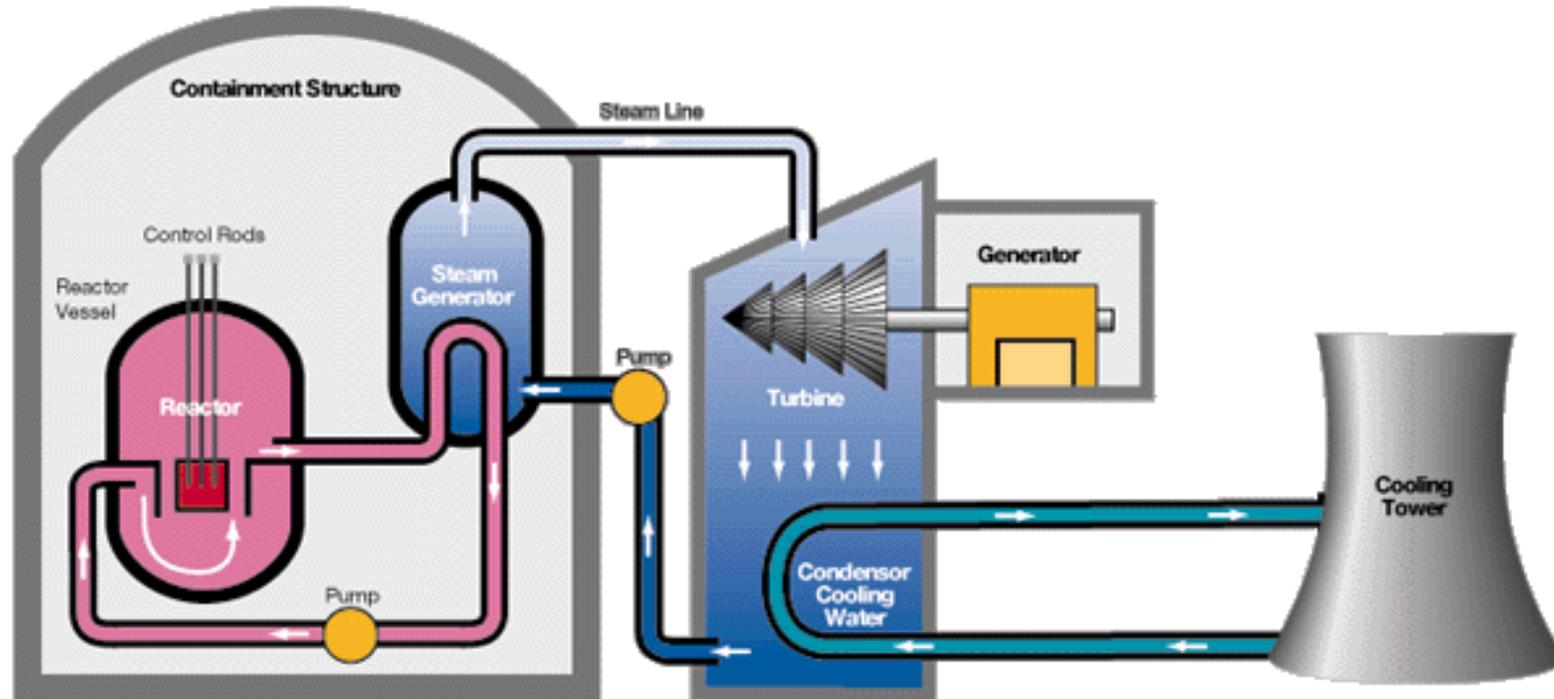
$$P_D^{1-\gamma} T_D^\gamma = P_C^{1-\gamma} T_C^\gamma$$

$$\frac{T_A}{T_D} = \frac{T_B}{T_C}$$



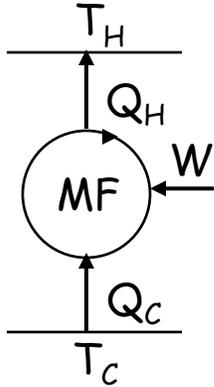
$$\eta = 1 - \frac{T_A}{T_B} = 1 - \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Centrales térmicas nucleares



Máquinas Frigoríficas

Una máquina frigorífica consume trabajo W para poder quitar calor de una fuente térmica a temperatura T_C y entregarla a otra fuente térmica a temperatura mayor T_H



Para un ciclo completo:

Balance de energía: $\Delta U = 0 = Q_C + W - Q_H \longrightarrow Q_H = Q_C + W$

Balance de entropía:

$$\Delta S^t = \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_H}{T_H} + S_{gen} = 0$$

$$S_{gen} = -\frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_H}{T_C} + \frac{W}{T_C} = Q_H \left(-\frac{1}{T_H} + \frac{1}{T_C} \right) + \frac{W}{T_C}$$

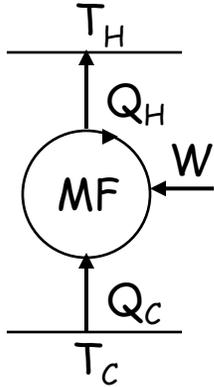
$$S_{gen} = Q_H \left(\frac{T_H - T_C}{T_H T_C} \right) + \frac{W}{T_C}$$

(-) (+) (+)

El segundo término debe superar el valor absoluto del primero para que $S_{gen} > 0$ y el proceso sea factible

Hay un valor mínimo del trabajo consumido por la MF

El valor del trabajo mínimo corresponde a un **proceso reversible** en el que $S_{gen} = 0$



$$Q_H \left(\frac{T_H - T_C}{T_H T_C} \right) = -\frac{W_{min}}{T_C}$$

$$W_{min} = -Q_H \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} \right)$$

Rendimiento (en general) de la máquina frigorífica:

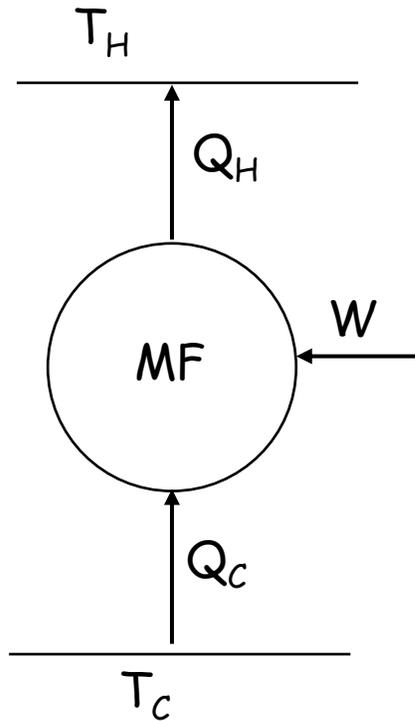
$$\eta_{MF} = \left| \frac{W}{Q_H} \right|$$

Teniendo en cuenta que el objetivo de una máquina frigorífica es quitar calor, para lo cual consume trabajo, se evalúa su funcionamiento a través del **coeficiente de performance** :

Coeficiente de performance de una máquina frigorífica:

$$COP = \left| \frac{Q_C}{W} \right|$$

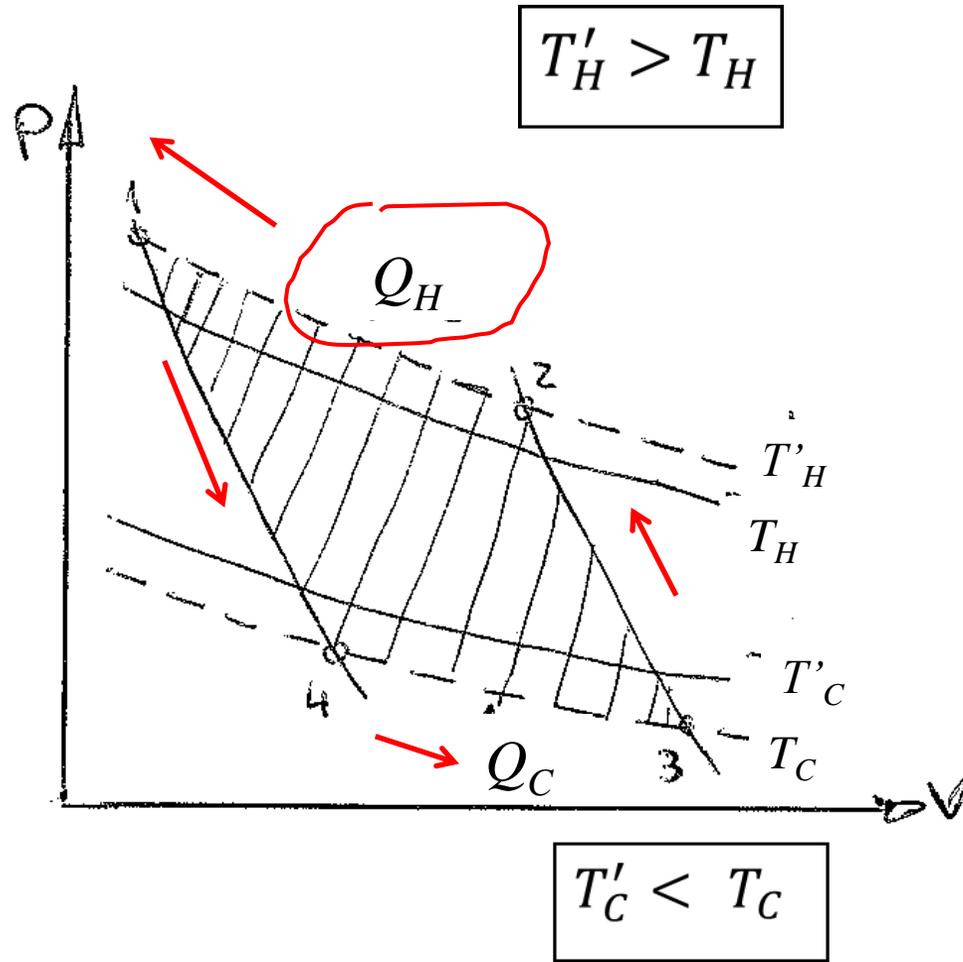
¿Cómo entender el COP?



El coeficiente de performance nos indica qué cantidad de unidades de energía térmica elimina la máquina del espacio refrigerado por cada unidad de energía eléctrica que consume. Normalmente, es un número mayor a 1

$$COP = \left| \frac{Q_C}{W} \right|$$

En el caso de una máquina frigorífica, las diferencias de temperatura entre las fuentes térmicas y el fluido dan como consecuencia un mayor consumo de trabajo para un dado valor de Q_C .



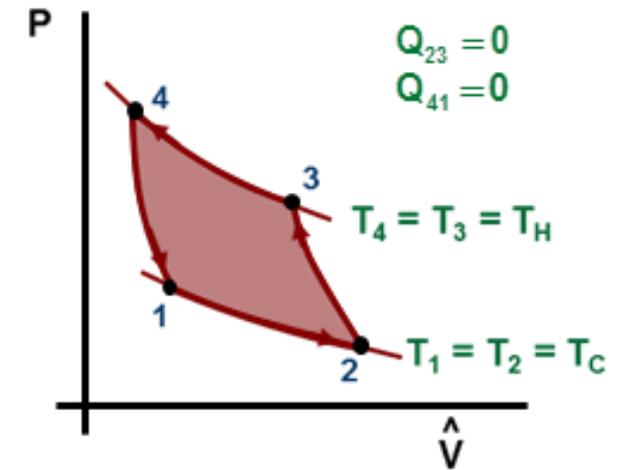
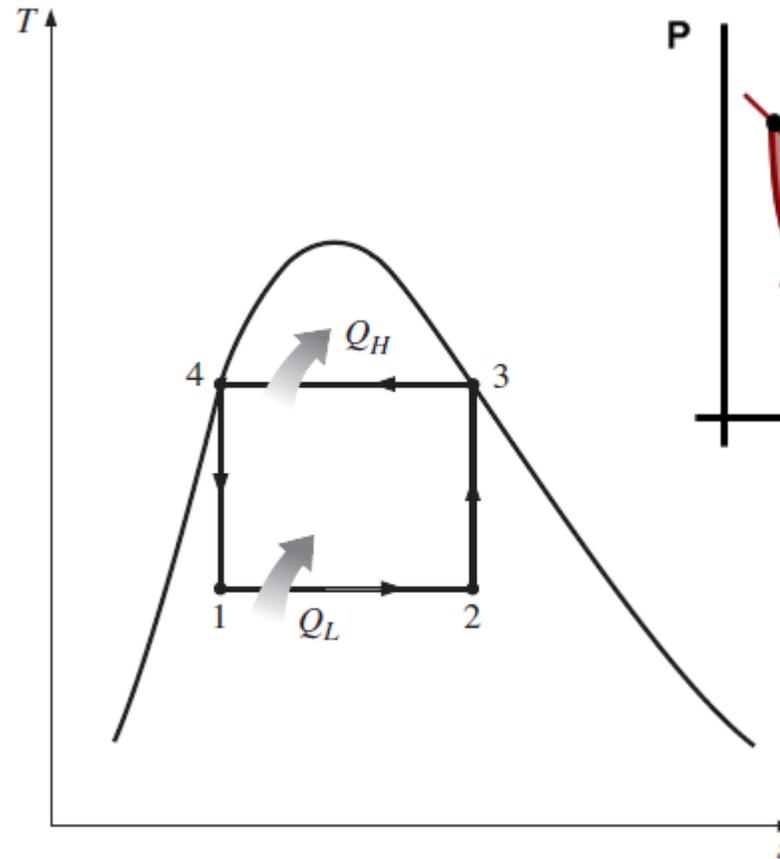
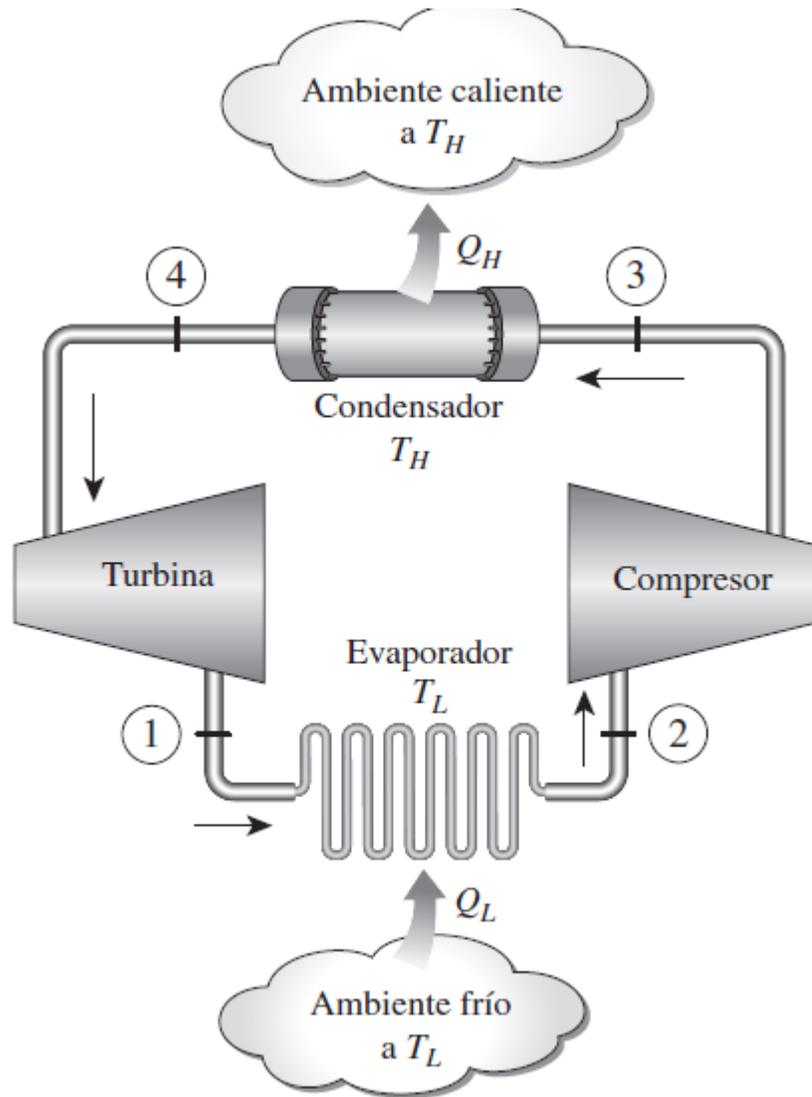
T'_H = Temperatura del fluido en la etapa en la que entrega calor

T_H = Temperatura de la fuente caliente

T_C = Temperatura de la fuente fría

T'_C = Temperatura del fluido en la etapa en la que entrega calor

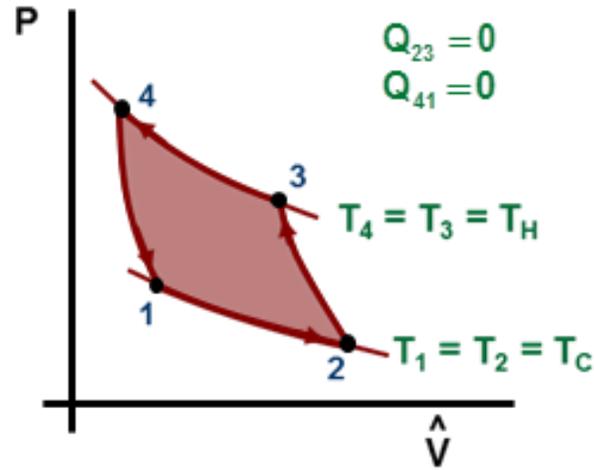
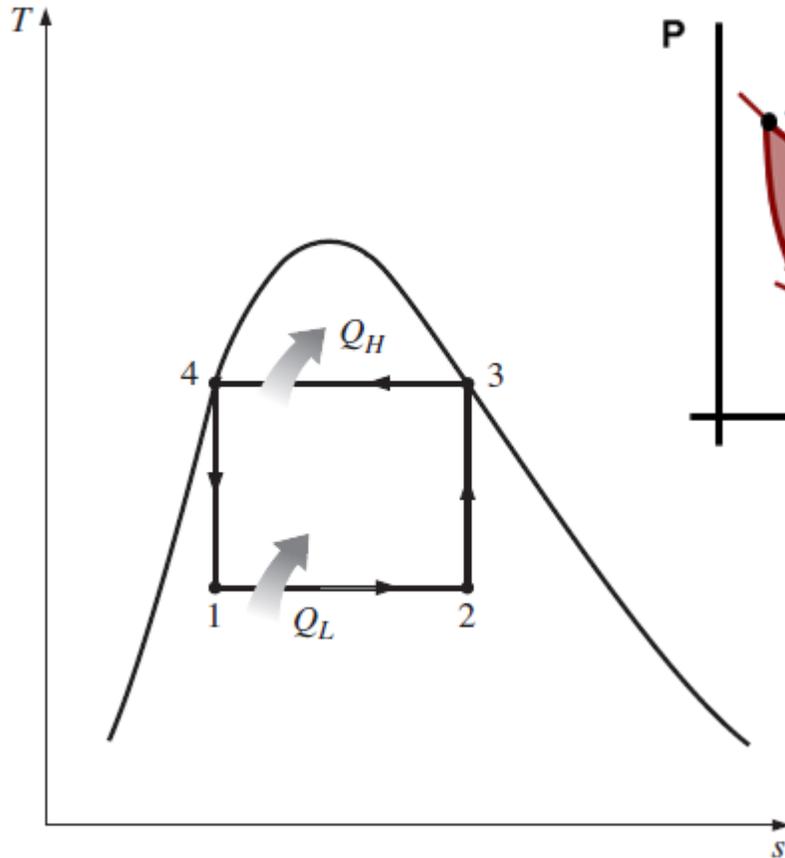
La máquina frigorífica de Carnot



Al igual que en el ciclo de potencia, consta de:

- 2 pasos isotérmicos (1-2 y 3-4)
- 2 pasos adiabáticos (4-1 y 2-3)

La máquina frigorífica de Carnot



En este caso, el coeficiente de performance se calcula:

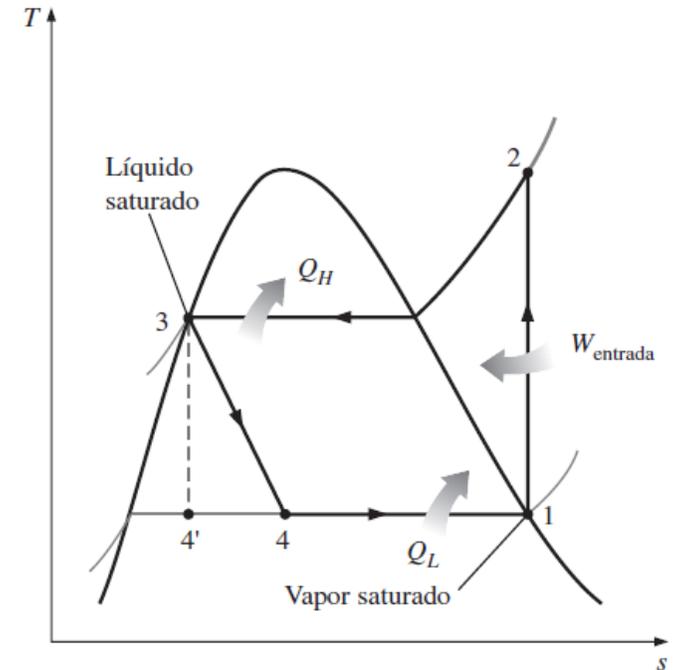
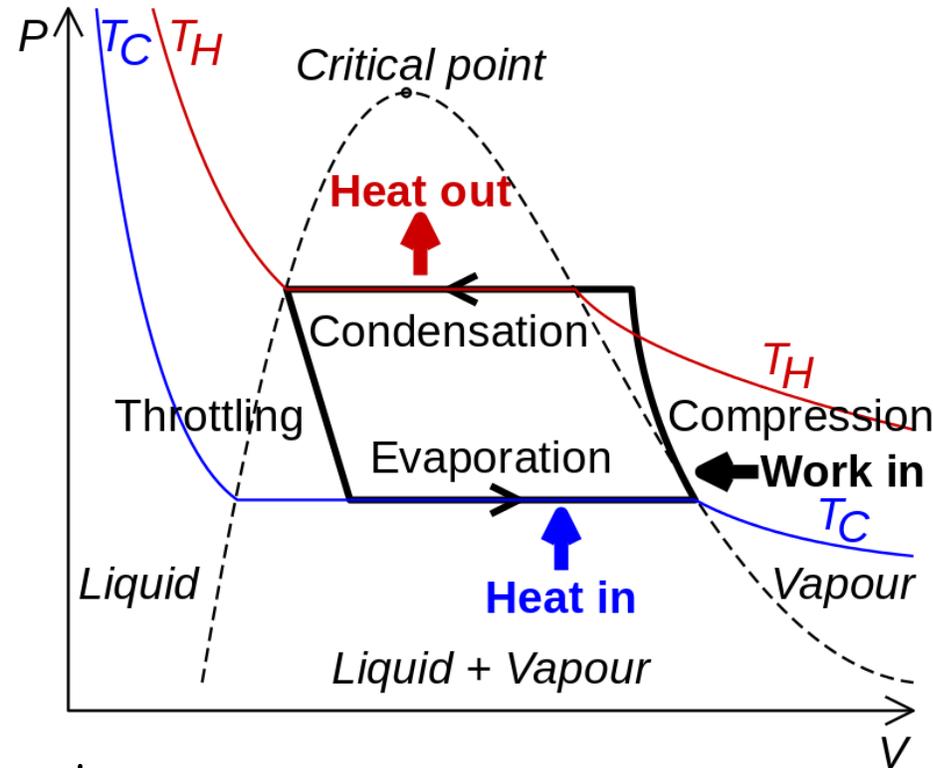
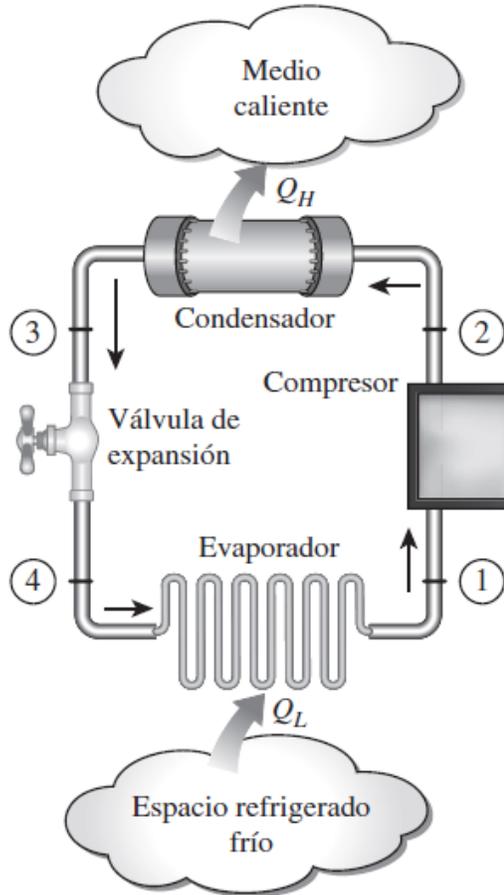
$$COP = \left| \frac{Q_C}{W} \right| = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1}$$

El ciclo invertido de Carnot es el ciclo de refrigeración **más eficiente** que opera entre dos temperaturas específicas.

El ciclo invertido de Carnot presenta problemas técnicos:

1. Es dificultoso operar un compresor con una mezcla líquido-vapor
2. La turbina o válvula de expansión isoS operan en zona bifásica

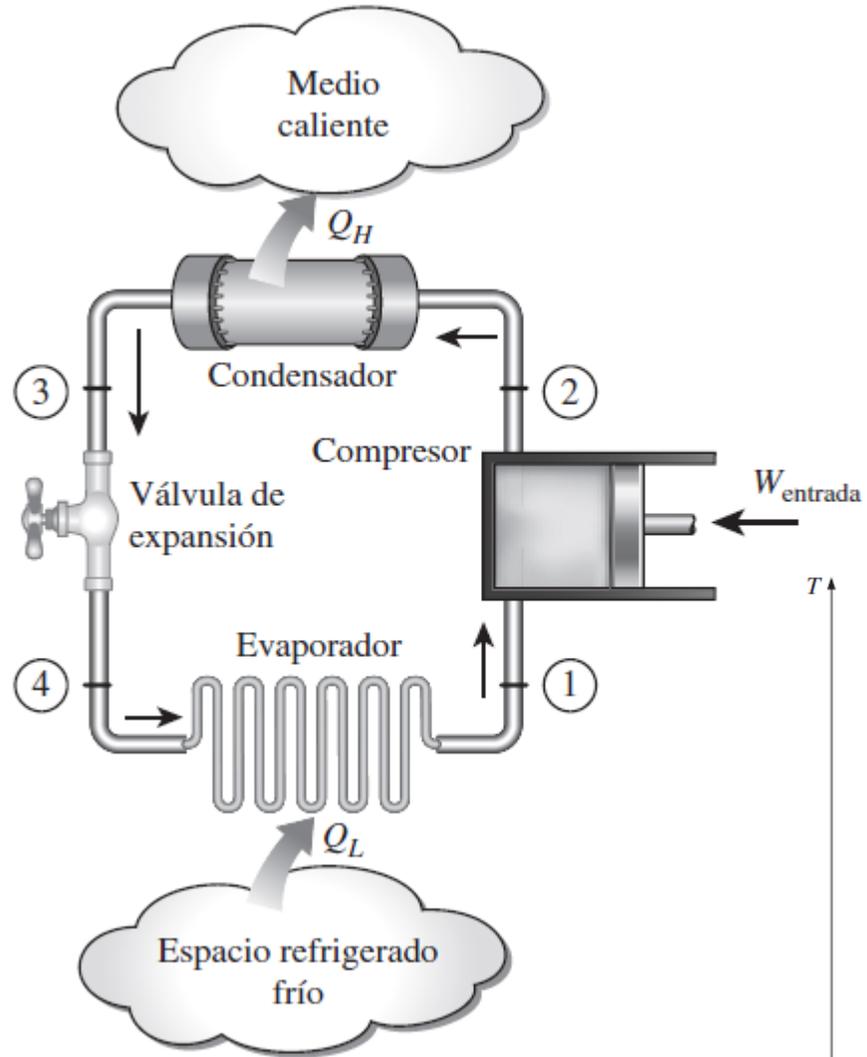
Ciclo ideal de compresión de vapor



Consta de cuatro pasos:

- Compresión isoS
- Pérdida de Q a P constante en un condensador
- Expansión (normalmente isoH)
- Absorción de Q a P constante en un evaporador

Ciclo ideal de compresión de vapor

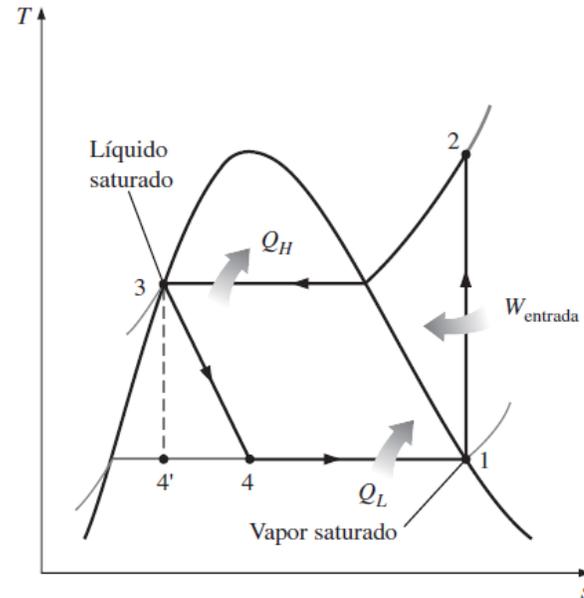


El ciclo ideal de compresión de vapor es análogo al ciclo de Rankine de generación de potencia:

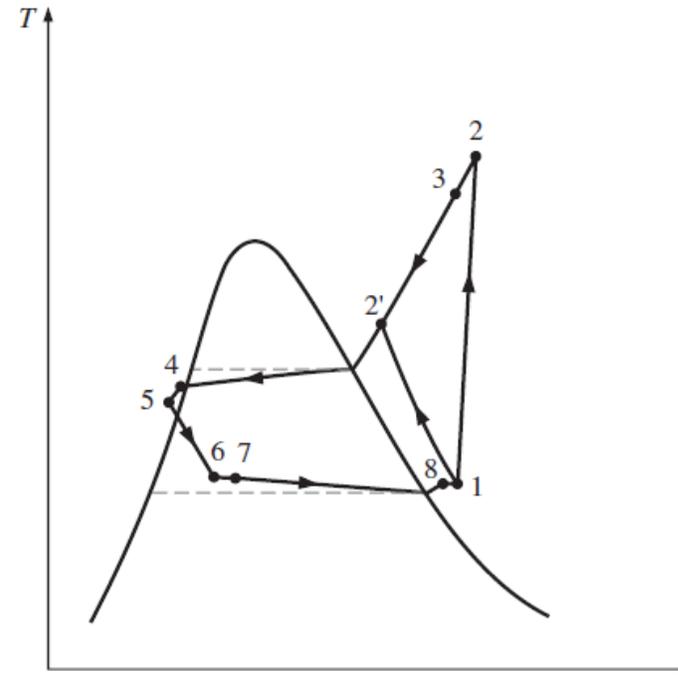
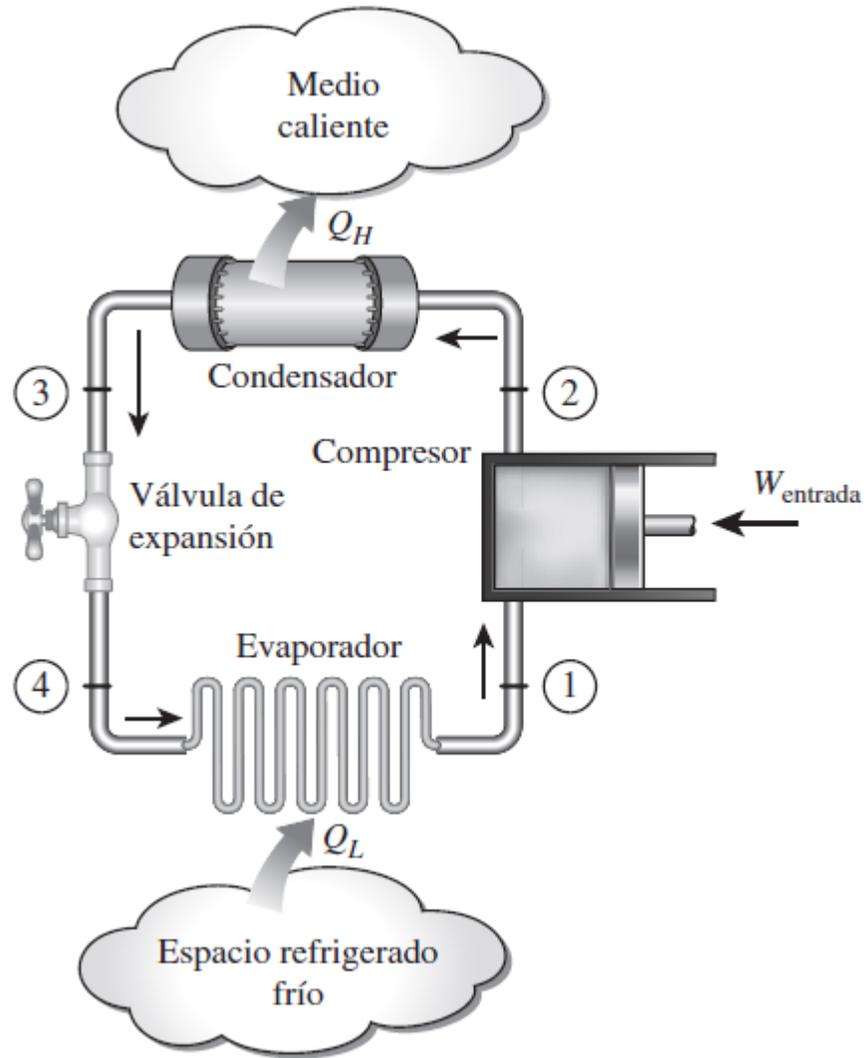
1. El compresor opera siempre con un vapor
2. La turbina sustituye por una **válvula de expansión isoentálpica** por sencillez técnica

En este caso, el coeficiente de performance se calcula:

$$COP = \left| \frac{Q_C}{W} \right| = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

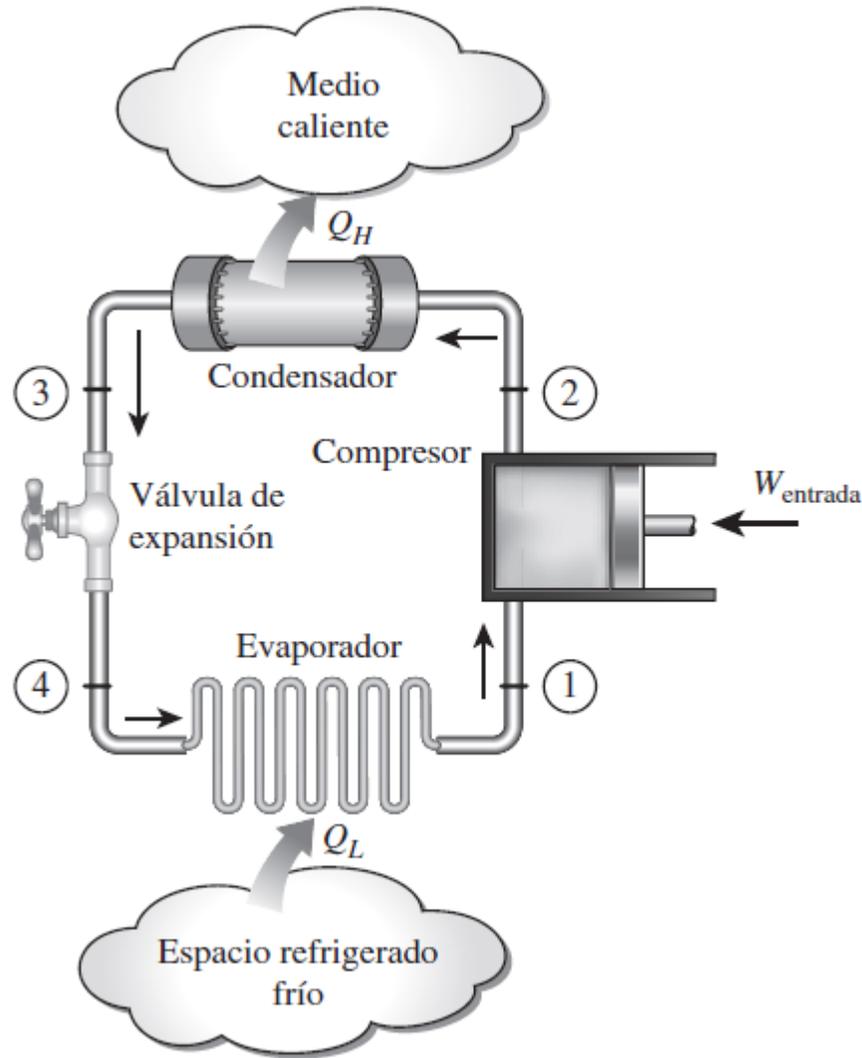


Ciclos reales de compresión de vapor



- En los ciclos reales de compresión de vapor se observa:
1. El compresor no puede operar isoS, por lo tanto hay un incremento de la Entropía en ese paso
 2. El vapor ingresa al compresor ligeramente sobrecalentado
 3. Tanto en el evaporador como en el condensador se producen caídas de presión

Selección de fluidos para ciclos de refrigeración



Algunos fluidos refrigerantes de uso común:

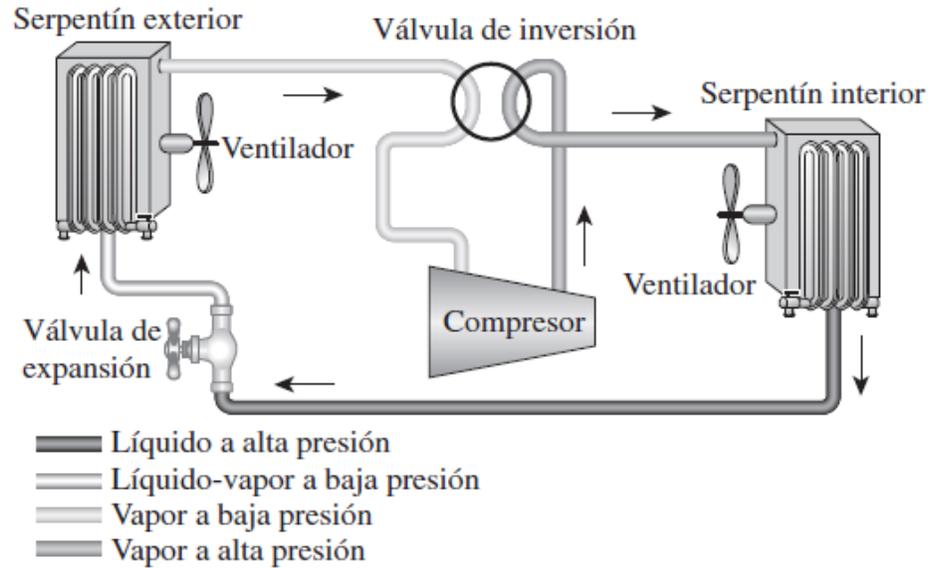
1. Éter etílico
2. Clorofluorocarbonados (CFCs)
3. Amoníaco (NH_3)
4. Hidrocarburos (propano)
5. CO_2

Criterios para la selección de fluidos para ciclos:

- $T_{\text{evaporador}} < T_{\text{amb refrigerado}}$ (5 °C como mín)
- $T_{\text{condens}} > T_{\text{amb}}$ (5 °C como mín)
- $P_{\text{evaporador}} > P_{\text{atm}}$ (la presión más baja del ciclo)
- $P_{\text{refrig}}^{\text{sat}}|_{T=-20\text{C}} > P_{\text{atm}}$
- Buena capacidad de absorción de calor del fluido refrigerante (C_p)
- No tóxico, no inflamable, no corrosivo
- Costo

Aires acondicionados frío/calor

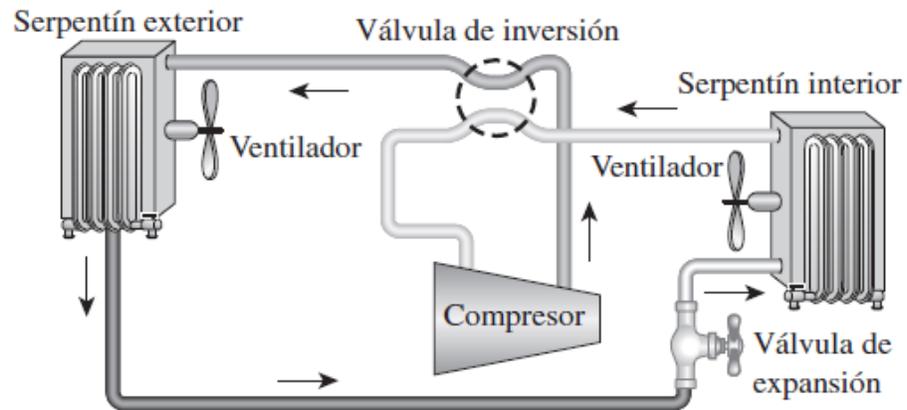
Operación de la bomba de calor: modo de calentamiento



Dispositivos capaces de funcionar como máquinas frigoríficas y como bombas de calor

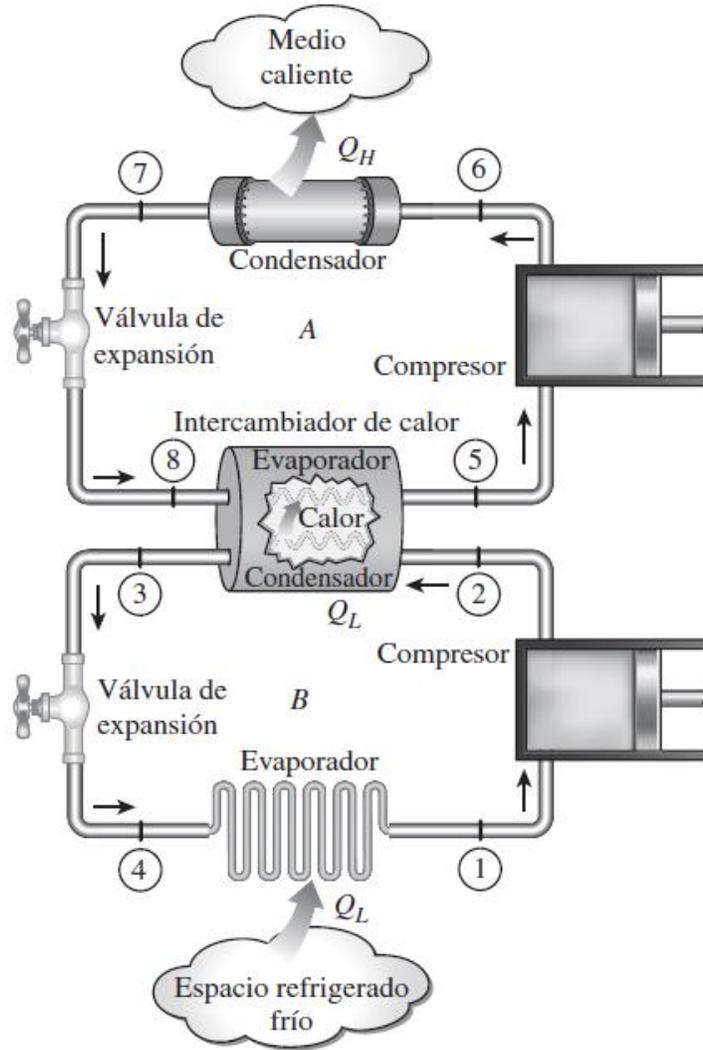
Gracias a una **válvula de inversión**, pueden intercambiar el uso del serpentín exterior y del serpentín interior del sistema para que funcionen en un caso como evaporador y en otro como condensador, alternativamente

Operación de la bomba de calor: modo de enfriamiento

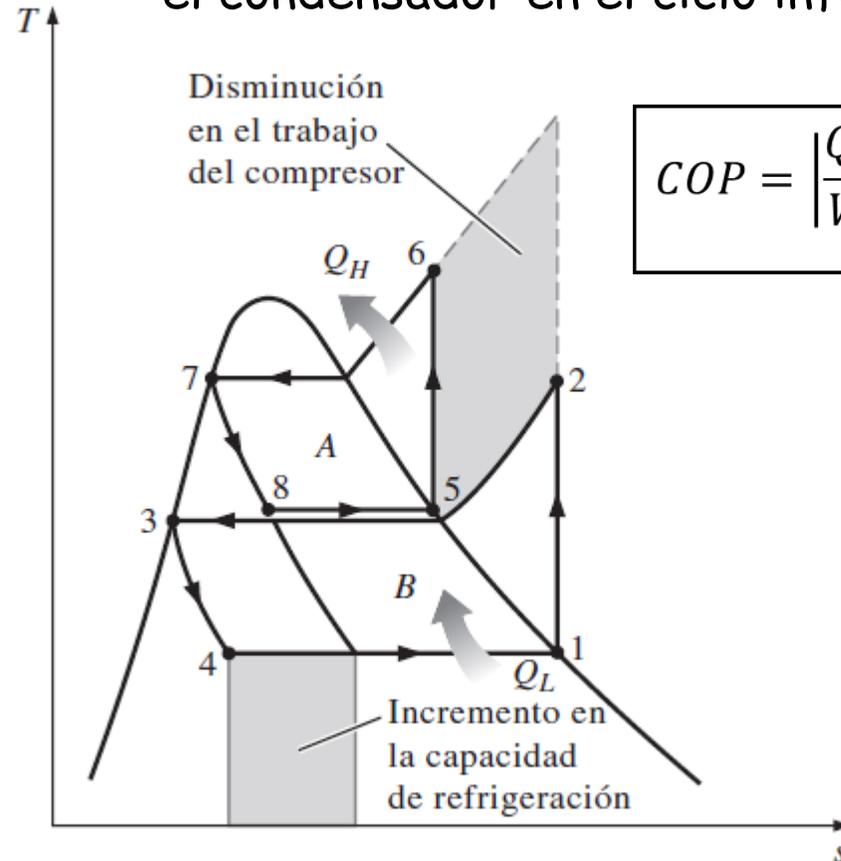


Mejoras en los sistemas de refrigeración

Sistema de refrigeración en cascada



Los dos ciclos se conectan por medio de un intercambiador de calor en medio, el cual sirve como el evaporador para el ciclo superior (ciclo A) y como el condensador en el ciclo inferior (ciclo B).



$$COP = \left| \frac{Q_C}{W} \right| = \frac{\dot{m}_B(h_1 - h_4)}{\dot{m}_A(h_6 - h_5) + \dot{m}_B(h_2 - h_1)}$$

Los sistemas en cascada son más eficientes cuando se usan dos fluidos diferentes para cada ciclo

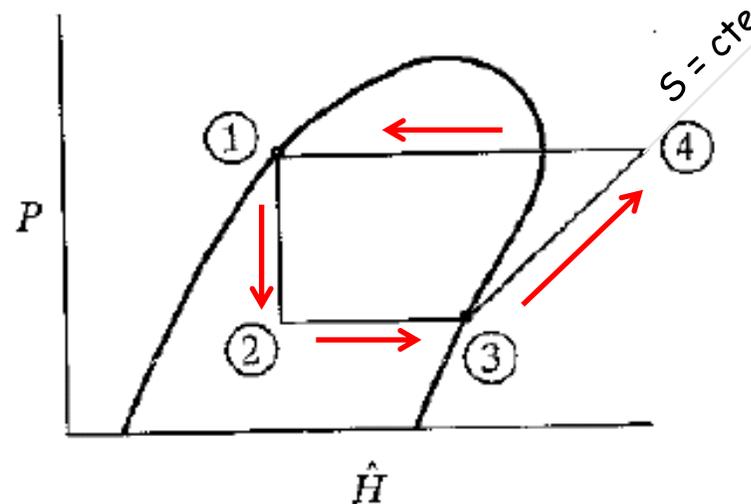
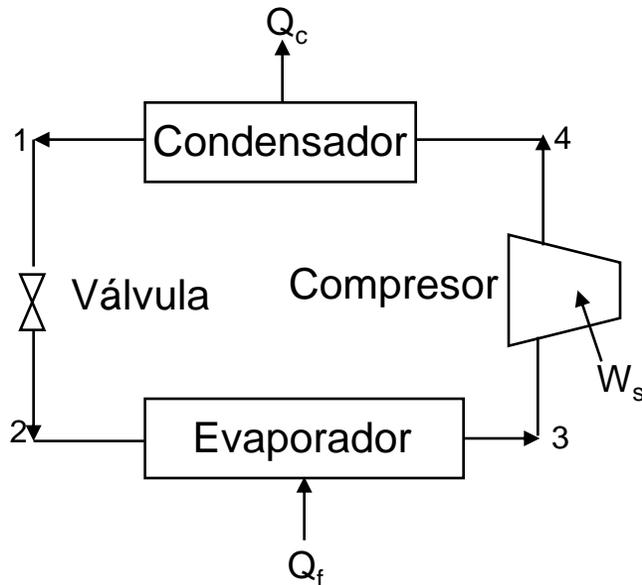
Ejemplo

Un refrigerador debe mantener una temperatura de 10°F (-12°C). El condensador es enfriado por aire a 70°F (21°C).

Los serpentines del evaporador y del condensador operan con una diferencia de temperatura de 10°F (5.5°C) entre los fluidos que intercambian calor.

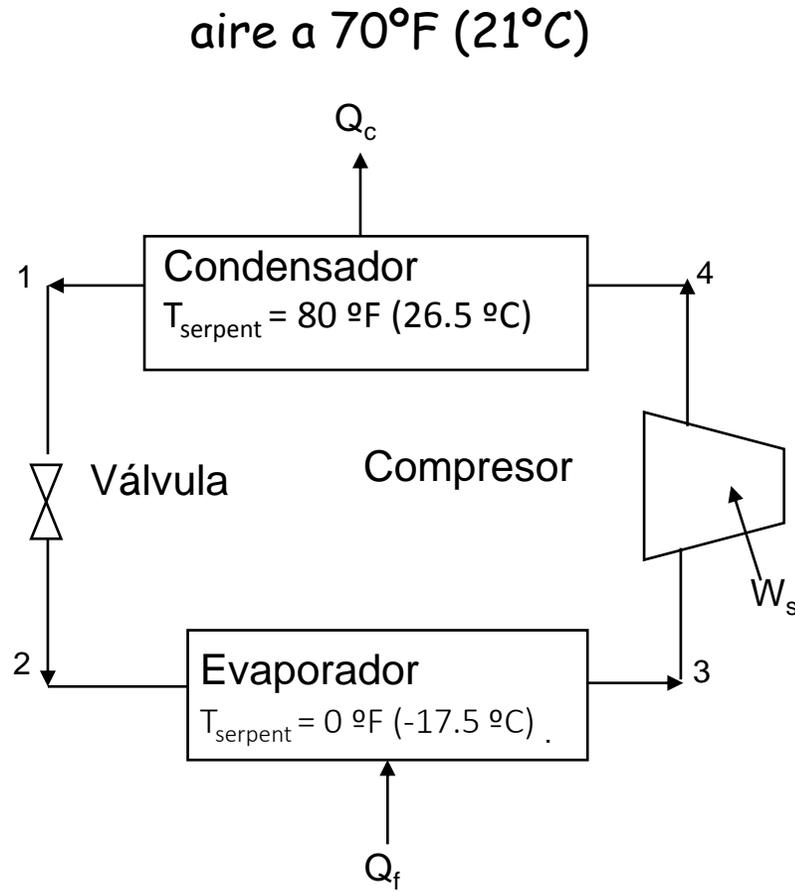
Calcular el coeficiente de performance de un ciclo de refrigeración por compresión que opera entre los niveles térmicos indicados, utilizando tetrafluoroetano (HFC-134a) como refrigerante.

Considerar que el compresor opera reversible y adiabáticamente.

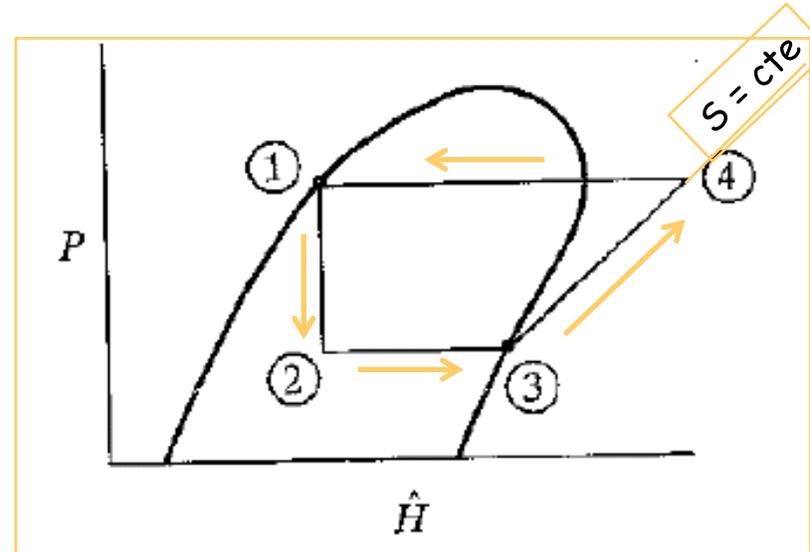


Fluido de trabajo tetrafluoroetano (HFC-134a)

¿ coeficiente de performance ?



$T_{\text{refrigerador}}: 10^\circ\text{F} (-12^\circ\text{C})$



Compresor:
 $Q=0$
Revers.

Delta T = 10°F =
(Equivalentemente:
Delta T = 5.5°C)

Temperatura de evaporación del fluido: $T_2 = T_3 = 10^\circ\text{F} - 10^\circ\text{F} = 0^\circ\text{F}$

Temperatura de condensación del fluido: $T_1 = 70^\circ\text{F} + 10^\circ\text{F} = 80^\circ\text{F}$

Utilizamos la **tabla** de propiedades del **HFC-134a saturado** y el **diagrama P vs H** de propiedades del **vapor sobrecalentado** para calcular las condiciones de operación en cada punto del ciclo:

Pto.	Estado	T [°F]	P [psia]	H [BTU/lb]	S [BTU/lb R]
1	Liq. Sat.	80	101.37	37.978	0.07892
2	L + V	0	21.162	37.978	
3	Vapor Sat.	0	21.162	103.015	0.22525
4	Vapor sobrecal.	$\cong 100$	101.37	$\cong 117$	0.22525

$$\text{COP} = \left| \frac{Q_f}{W_s} \right| = \frac{H_3 - H_2}{H_4 - H_3} = \frac{103.015 - 37.978}{117 - 103.015}$$

$$\text{COP} = 4.65$$

Table 9.1: Thermodynamic properties of saturated tetrafluoroethane†

$t(^{\circ}\text{F})$	$P(\text{psia})$	Volume		Enthalpy		Entropy	
		$(\text{ft})^3(\text{lb}_m)^{-1}$	$(\text{ft})^3(\text{lb}_m)^{-1}$	$(\text{Btu})(\text{lb}_m)^{-1}$	$(\text{Btu})(\text{lb}_m)^{-1}$	$(\text{Btu})(\text{lb}_m)^{-1}(\text{R})^{-1}$	$(\text{Btu})(\text{lb}_m)^{-1}(\text{R})^{-1}$
		V^l	V^v	H^l	H^v	S^l	S^v
-40	7.429	0.01132	5.782	0.000	97.050	0.00000	0.23125
-35	8.577	0.01139	5.053	1.489	97.804	0.00352	0.23032
-30	9.862	0.01145	4.432	2.984	98.556	0.00701	0.22945
-25	11.297	0.01152	3.901	4.484	99.306	0.01048	0.22863
-20	12.895	0.01158	3.445	5.991	100.054	0.01392	0.22786
-15	14.667	0.01165	3.052	7.505	100.799	0.01733	0.22714
-10	16.626	0.01172	2.712	9.026	101.542	0.02073	0.22647
-5	18.787	0.01180	2.416	10.554	102.280	0.02409	0.22584
0	21.162	0.01187	2.159	12.090	103.015	0.02744	0.22525
5	23.767	0.01194	1.934	13.634	103.745	0.03077	0.22470
10	26.617	0.01202	1.736	15.187	104.471	0.03408	0.22418
15	29.726	0.01210	1.563	16.748	105.192	0.03737	0.22370
20	33.110	0.01218	1.410	18.318	105.907	0.04065	0.22325
25	36.785	0.01226	1.275	19.897	106.617	0.04391	0.22283
30	40.768	0.01235	1.155	21.486	107.320	0.04715	0.22244
35	45.075	0.01243	1.048	23.085	108.016	0.05018	0.22207
40	49.724	0.01252	0.953	24.694	108.705	0.05359	0.22172
45	54.732	0.01262	0.868	26.314	109.386	0.05679	0.22140
50	60.116	0.01271	0.792	27.944	110.058	0.05998	0.22110
55	65.895	0.01281	0.724	29.586	110.722	0.06316	0.22081
60	72.087	0.01291	0.663	31.239	111.376	0.06633	0.22054
65	78.712	0.01301	0.608	32.905	112.019	0.06949	0.22028
70	85.787	0.01312	0.558	34.583	112.652	0.07264	0.22003
75	93.333	0.01323	0.512	36.274	113.272	0.07578	0.21979
80	101.37	0.01335	0.472	37.978	113.880	0.07892	0.21957
85	109.92	0.01347	0.434	39.697	114.475	0.08205	0.21934
90	119.00	0.01359	0.400	41.430	115.055	0.08518	0.21912
95	128.63	0.01372	0.369	43.179	115.619	0.08830	0.21890
100	138.83	0.01386	0.341	44.943	116.166	0.09142	0.21868
105	149.63	0.01400	0.315	46.725	116.694	0.09454	0.21845
110	161.05	0.01415	0.292	48.524	117.203	0.09766	0.21822
115	173.11	0.01430	0.270	50.343	117.690	0.10078	0.21797
120	185.84	0.01447	0.250	52.181	118.153	0.10391	0.21772
125	199.25	0.01464	0.231	54.040	118.591	0.10704	0.21744
130	213.38	0.01482	0.214	55.923	119.000	0.11018	0.21715
135	228.25	0.01502	0.198	57.830	119.377	0.11333	0.21683
140	243.88	0.01522	0.184	59.764	119.720	0.11650	0.21648
150	277.57	0.01567	0.157	63.722	120.284	0.12288	0.21566
160	314.69	0.01620	0.134	67.823	120.650	0.12938	0.21463
170	355.51	0.01683	0.114	72.106	120.753	0.13603	0.21329

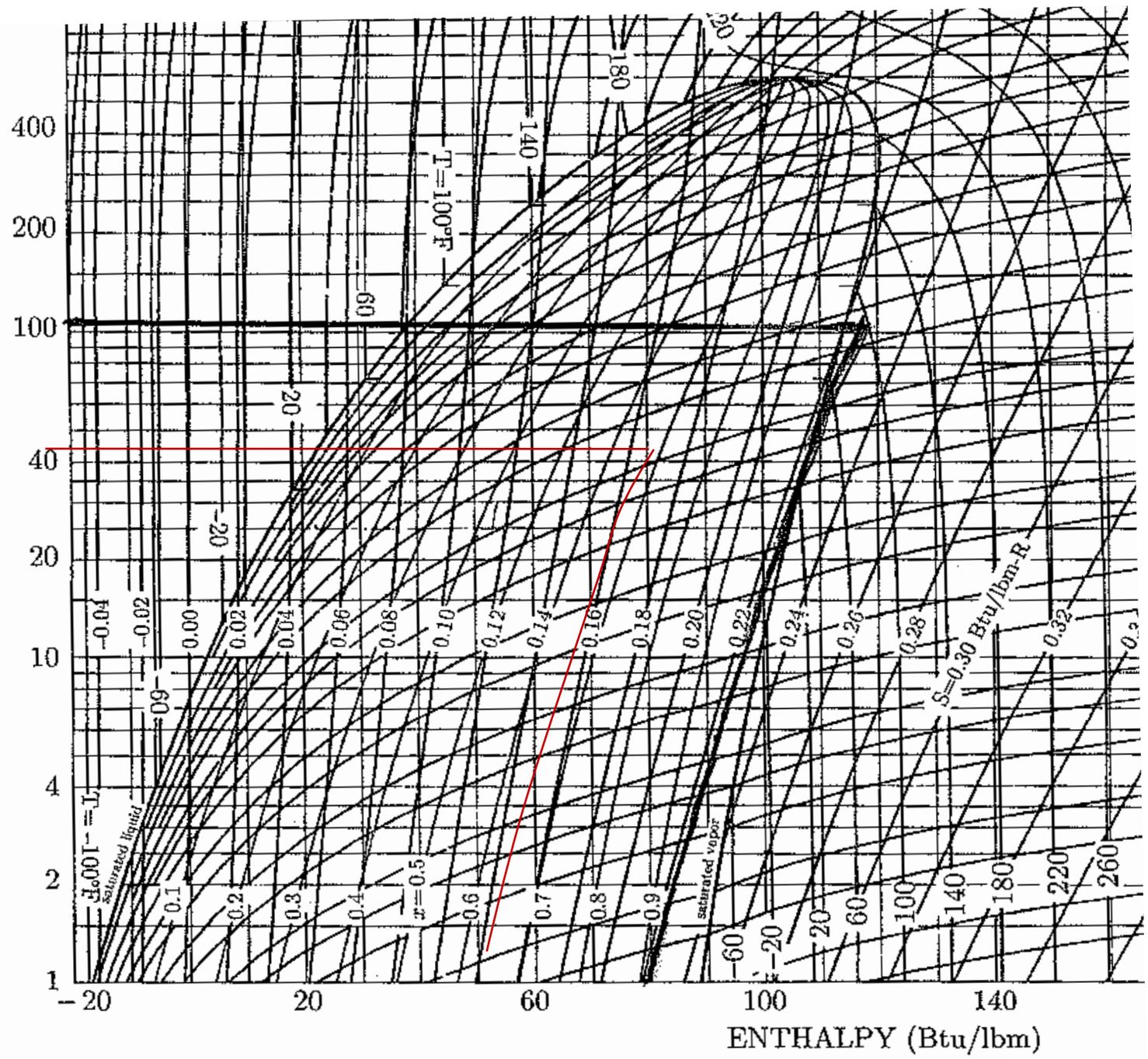
Table 9.1: Thermodynamic properties of saturated tetrafluoroethaneⁱ

$t(^{\circ}\text{F})$	$P(\text{psia})$	Volume		Enthalpy		Entropy	
		V^l	V^v	H^l	H^v	S^l	S^v
-40	7.429	0.01132	5.782	0.000	97.050	0.00000	0.23125
-35	8.577	0.01139	5.053	1.489	97.804	0.00352	0.23032
-30	9.862	0.01145	4.432	2.984	98.556	0.00701	0.22945
-25	11.297	0.01152	3.901	4.484	99.306	0.01048	0.22863
-20	12.895	0.01158	3.445	5.991	100.054	0.01392	0.22786
-15	14.667	0.01165	3.052	7.505	100.799	0.01733	0.22714
-10	16.626	0.01172	2.712	9.026	101.542	0.02073	0.22647
-5	18.787	0.01180	2.416	10.554	102.280	0.02409	0.22584
0	21.162	0.01187	2.159	12.090	103.015	0.02744	0.22525
5	23.767	0.01194	1.934	13.634	103.745	0.03077	0.22470

Table 9.1: Thermodynamic properties of saturated tetrafluoroethaneⁱ

$t(^{\circ}\text{F})$	$P(\text{psia})$	Volume		Enthalpy		Entropy	
		V^l	V^v	H^l	H^v	S^l	S^v
35	45.075	0.01243	1.048	23.085	108.016	0.05018	0.22207
40	49.724	0.01252	0.953	24.694	108.705	0.05359	0.22172
45	54.732	0.01262	0.868	26.314	109.386	0.05679	0.22140
50	60.116	0.01271	0.792	27.944	110.058	0.05998	0.22110
55	65.895	0.01281	0.724	29.586	110.722	0.06316	0.22081
60	72.087	0.01291	0.663	31.239	111.376	0.06633	0.22054
65	78.712	0.01301	0.608	32.905	112.019	0.06949	0.22028
70	85.787	0.01312	0.558	34.583	112.652	0.07264	0.22003
75	93.333	0.01323	0.512	36.274	113.272	0.07578	0.21979
 80	101.37	0.01335	0.472	37.978	113.880	0.07892	0.21957

PRESSURE (psia)



ENTHALPY (Btu/lbm)