

EL CICLO DE POTENCIA MAS EFICIENTE

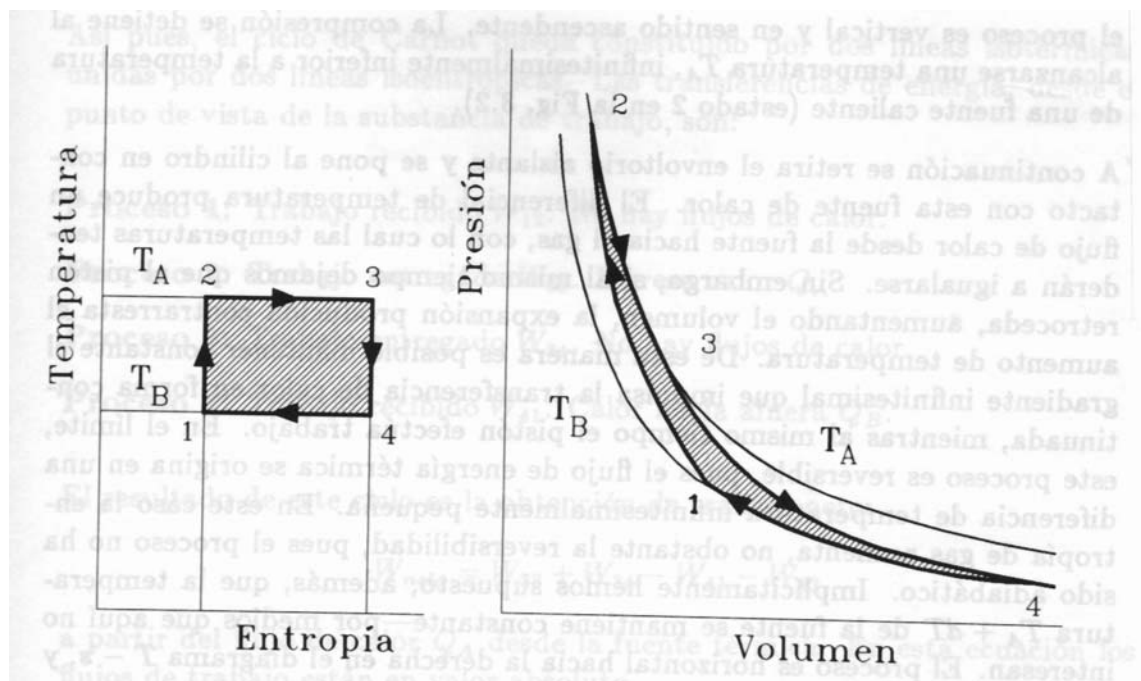
➤ EL CICLO DE CARNOT

- Nicholas Leonard Sadi Carnot (1796-1832)

➤ ¡Es un Ciclo Ideal teórico!

Razones prácticas hacen su realización imposible

- Importancia del ciclo: establece la cantidad de trabajo máxima que se puede obtener de una unidad cantidad de calor (en el caso de refrigeración, trabajo mínimo requerido)
- Diagrama del ciclo



CICLO DE CARNOT

- Sistema: cilindro-pistón hermético, rígido y sin roce
 - 1: Supuesto arbitrario: $P_1 \sim P_o, T_1 \sim T_o$
 - **1-2: Compresión adiabática reversible:** $\Rightarrow S$ cte, $\uparrow P$ y $T, \downarrow V$
 - 2: $T_A \sim T$ fuente de calor
 - **2-3: Expansión isotérmica reversible:** flujo de calor reversible desde la fuente hacia el sistema, el pistón se desplaza, $\uparrow V$ a T cte., $\downarrow P, \uparrow S$. El pistón efectúa trabajo.
 - 3: se interrumpe el flujo de calor
 - **3-4: Expansión adiabática reversible:** la P interior continúa empujando el pistón hacia fuera, realizando trabajo sobre el exterior, $\downarrow T, S$ cte.
 - 4: $T_4 = T_1$, pero $V_4 > V_1$, y $P_4 < P_1$
 - **4-1: Compresión isotérmica reversible:** el cilindro es puesto en contacto con la atm. Flujo de calor desde el sistema a la atm. Se recupera el estado inicial.

ANALISIS CICLO DE CARNOT

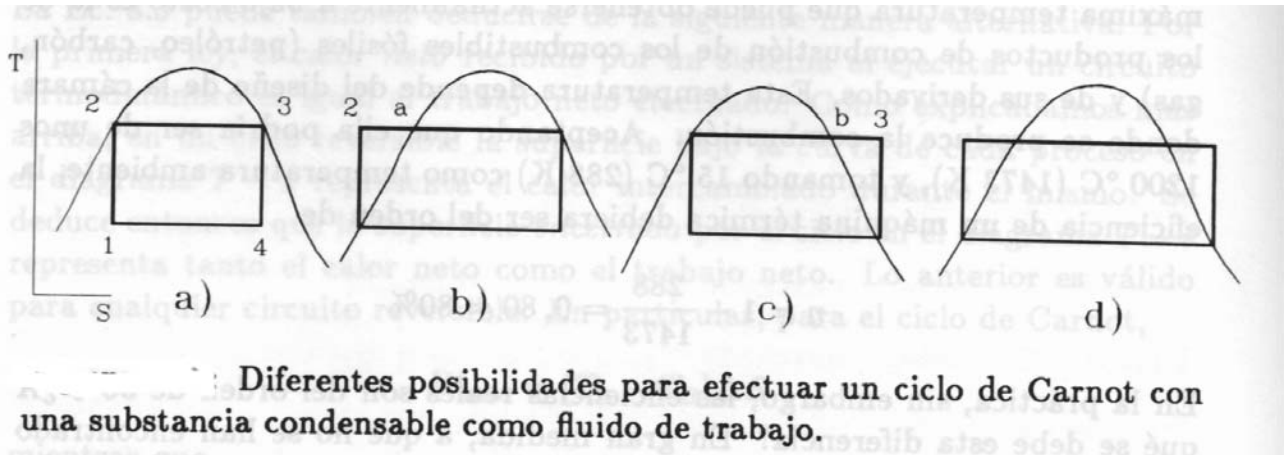
➤ Carnot con un Gas

- Trabajo neto relativamente pequeño comparado con los trabajos de expansión y compresión. Con irreversibilidades podría ser negativo.
- $\uparrow \Delta T$ podría $\uparrow W_{\text{neto}}$
- No se ha encontrado forma de mantener una temperatura elevada constante mientras al mismo tiempo el gas se expande realizando trabajo

➤ Carnot con fluidos condensables

- La transferencia de calor a temperatura constante es un proceso que en la práctica se logra naturalmente cuando el fluido se evapora o condensa a presión cte.

ANALISIS CICLO DE CARNOT



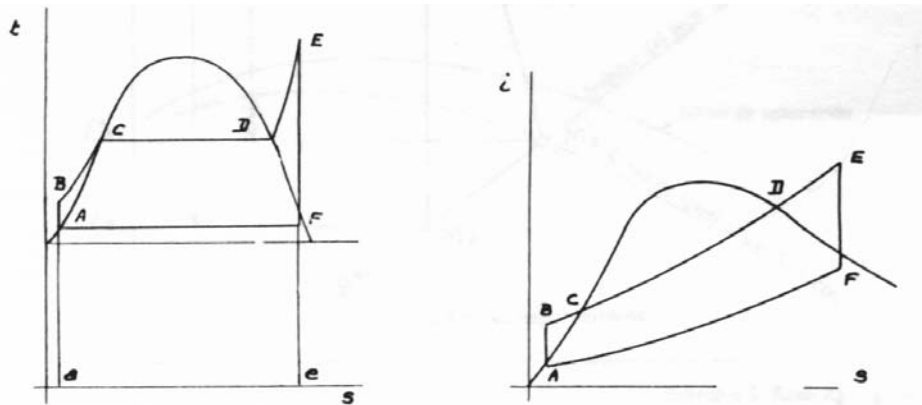
- En todas las alternativas el rechazo de calor ocurre a T y P ctes.
- En a) absorción de calor isobárica e isotérmica;
- Pero la compresión isoentrópica de una mezcla de fases (1-2) es muy difícil. Solución posible: comprimir en una fase (aprovechar incompresibilidad de los líquidos, b))
 - Para alcanzar modestas temperaturas de absorción de calor, P_2 sería impracticablemente alta.
 - Además en b), en el proceso 2-a debe entregarse calor a un líquido, sin que $\uparrow T$ y con $P \downarrow \Rightarrow$ imposible.
- En a) expansión isoentrópica también difícil (3-4). Solución posible: expansión completamente en fase gaseosa, c))
 - Pero en el proceso b-3 debe entregarse calor a un gas sin que $\uparrow T$ y con $P \downarrow$

CICLO DE HIRN: RANKINE CON RECALENTAMIENTO

- Ciclo parecido al de Carnot
- Fluido de Trabajo: AGUA
 - Características termodinámicas favorables, en las condiciones descritas por el ciclo de Carnot
 - Cambios de fase a T cte
 - Transferencia de calor a presión constante (en IC, $P \downarrow$ levemente por la fricción)
 - Es relativamente abundante
 - Bajo costo, casi nulo, requiere tratamientos químicos:
 - Ablandadores
 - Desgasificador
 - Planta desmineralizadora,
 - Productos químicos para purga
 - Segura:
 - No es explosiva
 - No es combustible
 - Facilidad para su transporte
 - Reflexión sobre la **disponibilidad del agua** ¿hasta cuándo será segura si persisten las conductas consumistas y contaminantes?

CICLO DE HIRN

➤ Diagrama del ciclo



$$\eta_{\text{Ciclo}} = \frac{\dot{W}_{TV} - \dot{W}_{\text{Bomba}}}{\dot{Q}_{\text{Util Caldera}}}$$

- Ciclo cerrado
- Compresión isoentrópica (en estado líquido): requiere trabajo
- Absorción de calor: calentamiento hasta saturación, evaporación y sobrecalentamiento, a P cte (pero T variable)
- Expansión isoentrópica: producción de trabajo
- Liberación de calor: condensación a P cte
- Equipos principales:
 - Bomba agua de alimentación
 - Caldera
 - Turbina de vapor (a condensación)-Generador
 - Condensador

ANALISIS CICLO DE HIRN

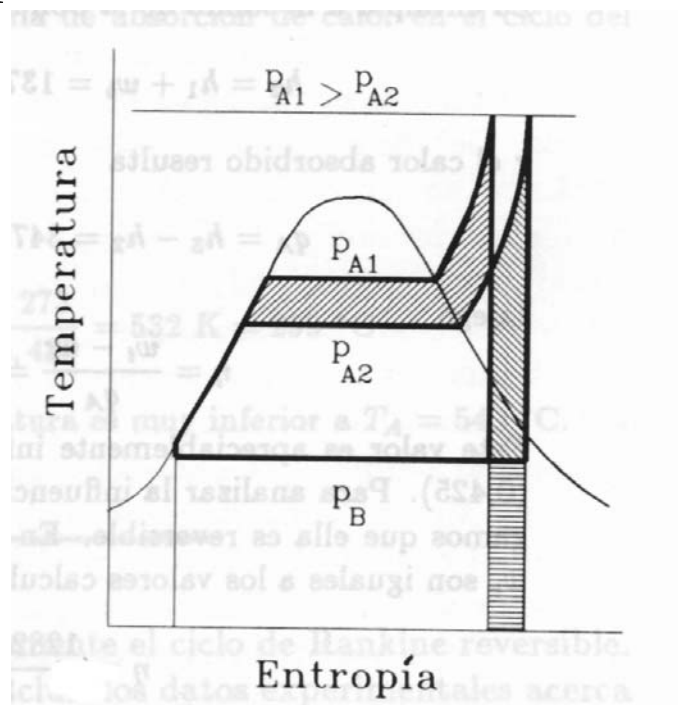
- Ciclo cerrado:
 - No requiere reposición de agua, la cual requiere tratamiento químico para no dañar la caldera (excepto por purgas en caldera)
 - Permite expandir el vapor hasta presiones inferiores a la atmosférica (el condensador trabaja en vacío mediante eyectores o bombas de vacío)
- Compresión en estado líquido consume muy poco trabajo en relación al trabajo que produce la expansión en la turbina entre las mismas presiones
- W_{neto} es siempre positivo por ineficiente que sea el equipo productor de trabajo
- **Ciclo real:** pérdidas de presión en los equipos que componen el ciclo, ineficiencias en la turbina y bomba:
 - Pérdidas de presión (de carga) son poco importante para el cálculo de la eficiencia térmica, pues la entalpía es una función muy débil de la presión
 - Las ineficiencias de la bomba son irrelevantes debido a que el trabajo requerido por la bomba es una pequeña fracción del trabajo producido por la turbina
 - Diferencia más importante c/r al ciclo teórico: las irreversibilidades de la turbina.

ANALISIS CICLO DE HIRN: MEDIOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL CICLO

- ↓ de irreversibilidades de la turbina: está limitado por la viscosidad del fluido y por las capacidades de diseño y fabricación actuales
- ↑ T_m de absorción de calor:
 - ↑ T_{max} : sobrecalentamiento (max 540°C?, ya hay calderas super-críticas). ↑ el η del ciclo, pero con mayor costo de capital y espacio. Por ello en centrales muy pequeñas se trabaja sólo con vapor saturado
 - ↑ P en calentamiento, ↑ T ebullición, proceso en el que se absorbe gran parte del calor
- Nota:** durante la revolución industrial la presión de trabajo fue ↑ paulatinamente a medida que progresaba la tecnología y ↓ la frecuencia de accidentes.
- ↓ T_{min} a la salida de la turbina (acercamiento a la $T_{atm.}$): se logra ↓ P a la salida de la turbina hasta presiones subatmosféricas (condensador opera en vacío). Esto está limitado por la temperatura del agua (local) de refrigeración del condensador y la temperatura ambiente local (torres de enfriamiento)

ANALISIS CICLO DE HIRN: MEDIOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL CICLO

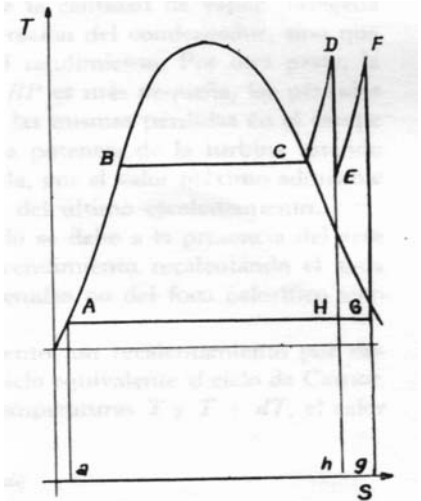
- P y T iniciales, y T final del vapor a la salida de la TV determinan el salto entálpico en la turbina. Son magnitudes teóricamente independientes pero:
 - El $\uparrow$ de P, sin $\uparrow$ de $T_{\max}$, produce a $\downarrow$ del título del vapor (x) a la salida de la turbina
 - Un $\uparrow$ del vacío en el condensador, para las mismas condiciones iniciales, tb produce una $\downarrow$ de x
 - El condensado formado produce erosión en las últimas etapas de la turbina
 - $x_{\min} = 88\%$



- El $\uparrow$ de η por un $\uparrow$ de P es útil, pero está limitado por aspectos prácticos de la realidad.

ANÁLISIS CICLO DE HIRN: MEDIOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL CICLO

➤ Recalentamientos intermedios:



- Se extrae vapor expandido hasta presiones intermedias en la TV y se recalienta en la caldera (multi-presión) a presión constante hasta T inicial, y se vuelva a introducir en la TV para hacerle trabajar de nuevo
- Aumenta el η de los álabes al $\downarrow$ el condensado en los últimos escalonamientos de la turbina
- $\uparrow$ la proporción de calor transferido a alta temperatura
- Pueden repetirse los recalentamientos, $\uparrow T_m$, $\uparrow \eta$. El óptimo está determinado por aspectos económicos
- El ciclo mejora entre un 2% y 4%. Esto ocurre si $\eta_{HEFG} > \eta_{ABCDEH}$
- Existe una P optima para el recalentamiento

ANALISIS CICLO DE HIRN: MEDIOS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DEL CICLO

- Precalentamiento del agua de alimentación (después del condensador) con extracciones de vapor de etapas intermedias de la turbina
 - Se reduce la cantidad de calor que debe absorberse en la caldera $\Rightarrow \downarrow$ el consumo de combustible en la caldera, a costa del trabajo que deja de producir en la TV el vapor parcialmente expandido. Sin embargo el efecto es positivo (¡menor destrucción de exergía! por menores diferencias de temperatura).
 - El calor latente de la cantidad de vapor extraída de la TV permanece en el ciclo al no ser “eliminado” del ciclo por el agua de refrigeración del condensador
 - La cantidad de calor que se libera en la parte de baja presión del ciclo (condensador) es más pequeña
 - Las pérdidas a la salida de la turbina $\downarrow$, o si se admiten las mismas pérdidas, es posible $\uparrow$ el límite superior de potencia de la turbina, para una velocidad dada, diámetro y longitud de los álabes de la última etapa
 - En el ciclo de Rankine, el precalentamiento continuo de toda el agua de alimentación permite teóricamente obtener la eficiencia de Carnot.
 - La economía debida al recalentamiento se mejora $\uparrow$ el número de extracciones de vapor en la TV para el precalentamiento del agua de alimentación
- Emplear contrapresión en la TV cuando sea posible usar el calor para no desperdiciarlo en el condensador (cogeneración)