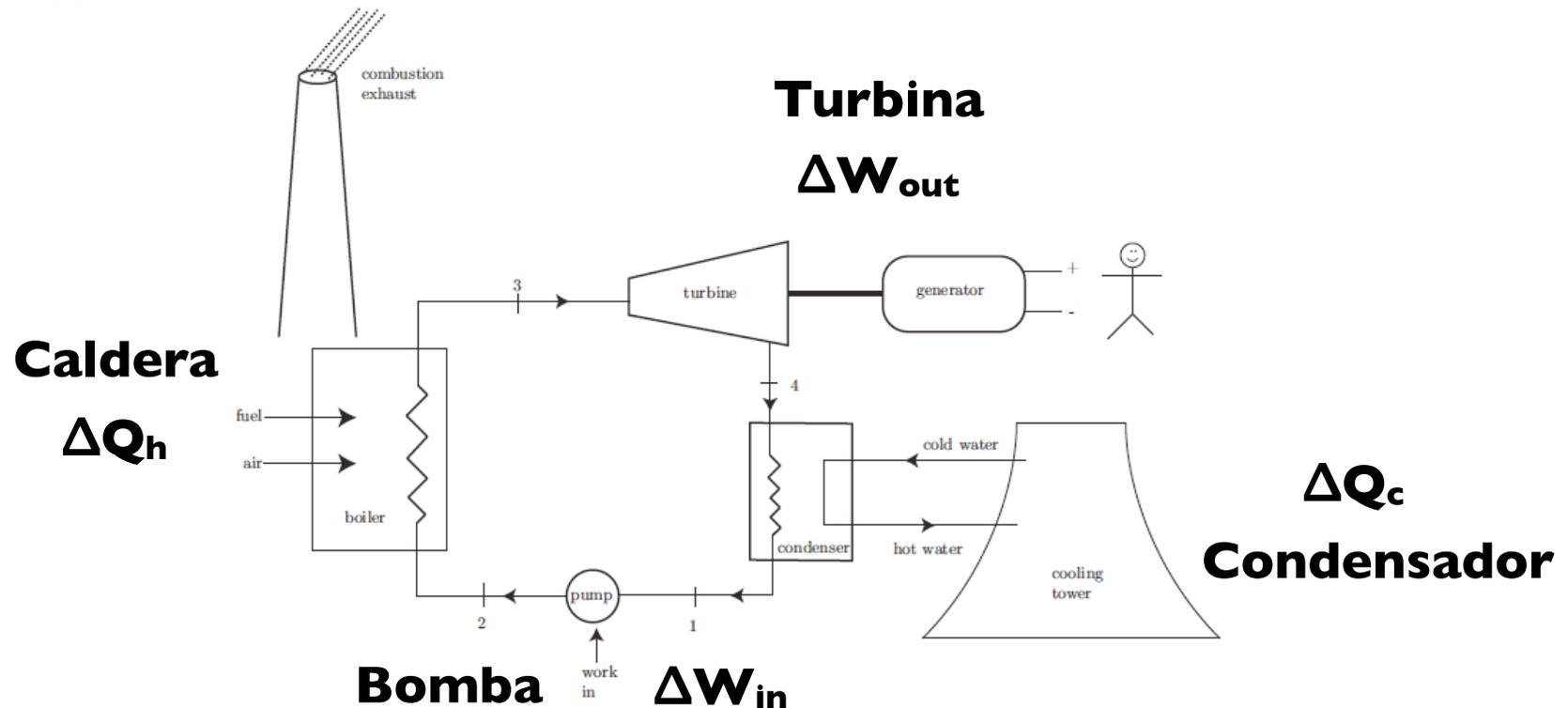


Clase 14

El Ciclo de Rankine

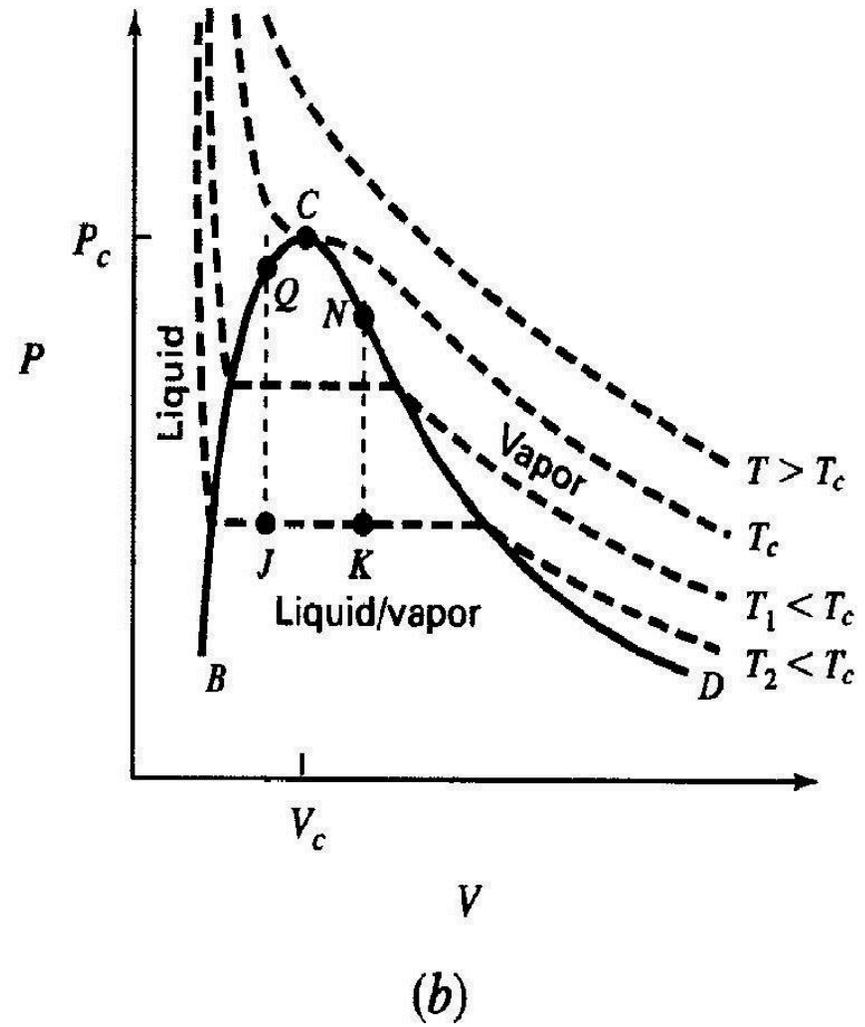
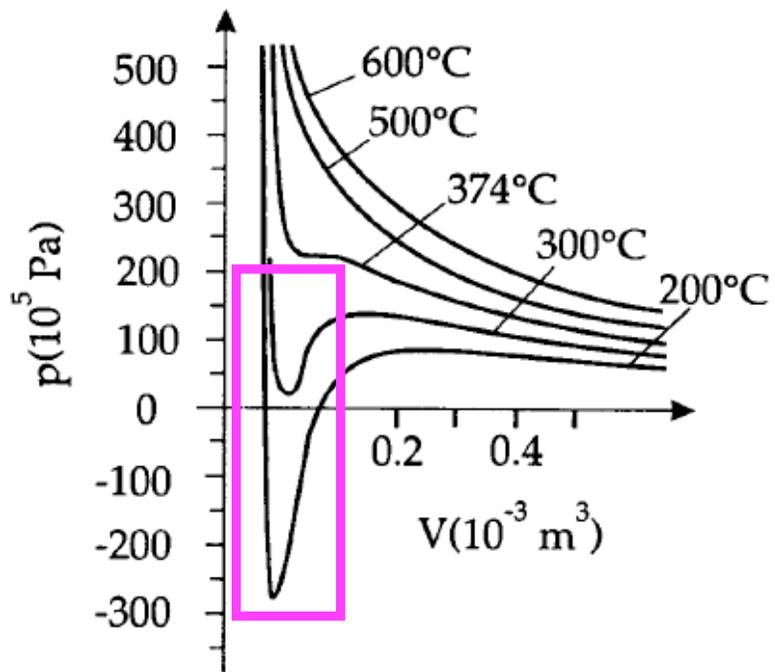
- En términos termodinámicos el proceso que sufre el sistema en un motor a vapor se describe utilizando un ciclo ideal propuesto por **William Rankine** en 1859. En un motor a vapor o una planta generadora de electricidad la caldera opera a alta presión, por lo que es necesario inyectar agua a alta presión con una bomba. Luego el vapor pasa por una turbina/pistón generando trabajo y luego por un condensador que lo lleva de vuelta a la fase líquida y alimenta a la bomba.



El Ciclo de Rankine

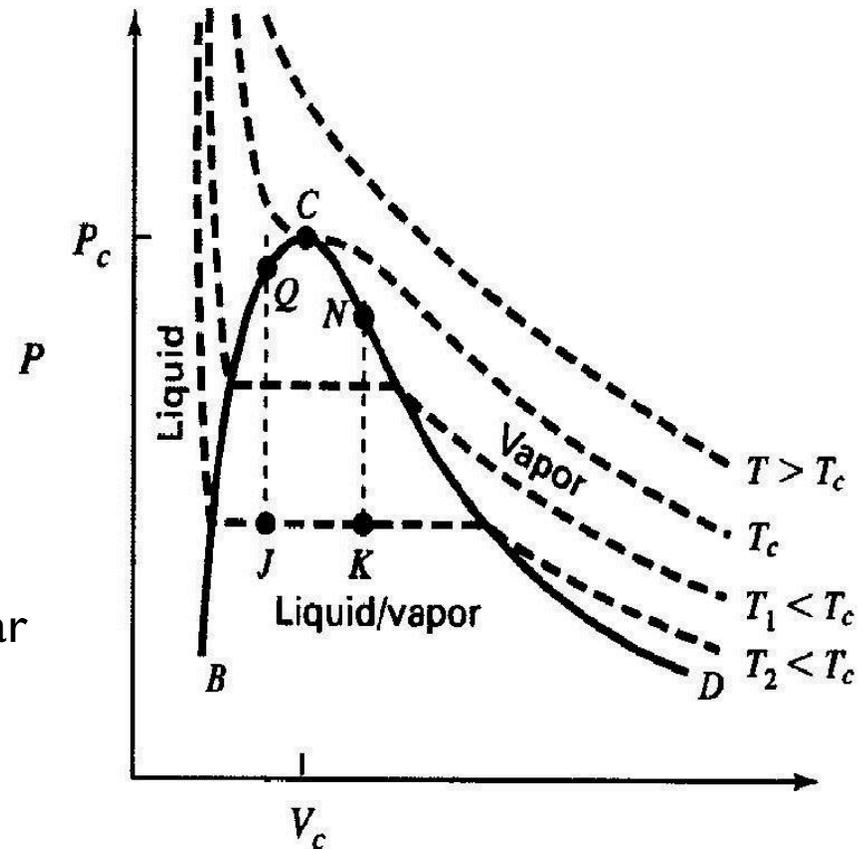
- El **ciclo de Rankine** tiene los siguientes pasos:
 - **Paso I:** Compresión adiabática del agua antes de entrar a la caldera por una bomba que requiere trabajo para operar.
 - **Paso II:** Calentamiento isobárico (y evaporación) en una caldera.
 - **Paso III:** Expansión adiabática en una turbina
 - **Paso IV:** Condensación isotermal isobárica en un condensador.

Muy Breve Introducción a Cambios de Fase



Muy Breve Introducción a Cambios de Fase

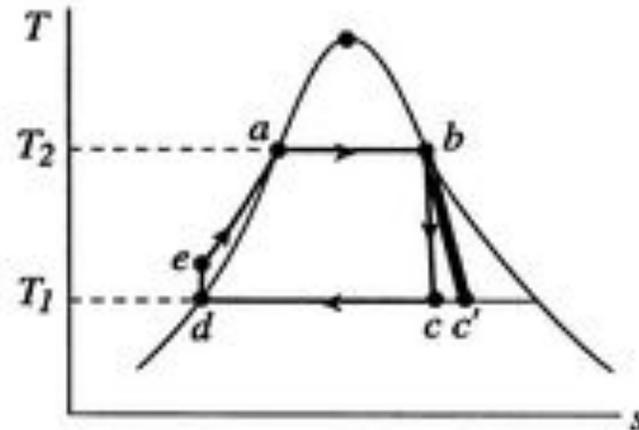
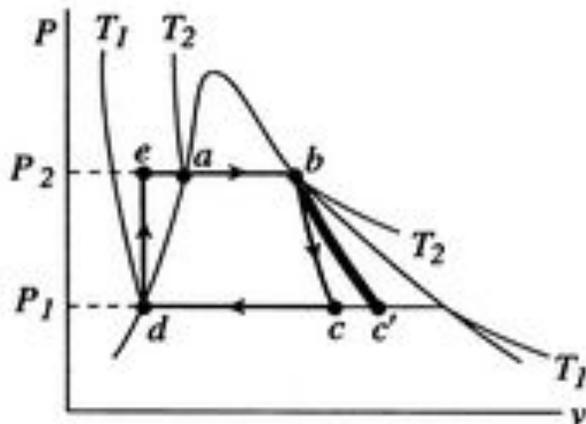
- En la transición de líquido a vapor existe una fase intermedia en la cual conviven ambas fases. En el diagrama PV esto corresponde a la región bajo la curva continua, llamada región de coexistencia líquido-vapor.
- Si caliento un líquido a presión constante ($P < P_c$), el volumen y la temperatura aumentan hasta que se llega a la curva de saturación.
- Dentro de la región saturada al inyectar calor solo aumenta el volumen y la temperatura se mantiene constante ($C_p = \infty$).
- Al salir de la región saturada se tiene vapor y vuelve a aumentar la temperatura con una inyección de calor.



(b)

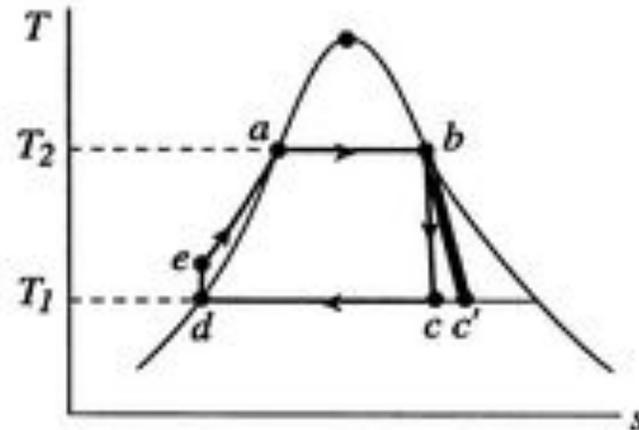
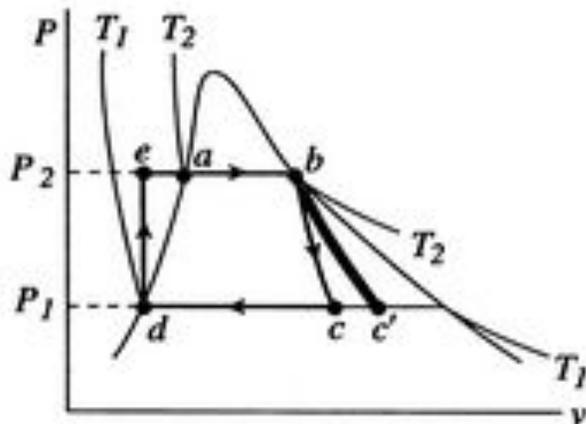
El Ciclo de Rankine

- El ciclo de Rankine tiene los siguientes pasos:
 - **Paso I (d-e):** Aumento de presión adiabático del agua en una bomba que requiere trabajo para operar.
 - **Paso II (e-a-b):** Calentamiento isobárico (y evaporación) en una caldera.
 - **Paso III (b-c):** Expansión adiabática en una turbina
 - **Paso IV (c-d):** Condensación isotermal isobárica en un condensador.



El Ciclo de Rankine

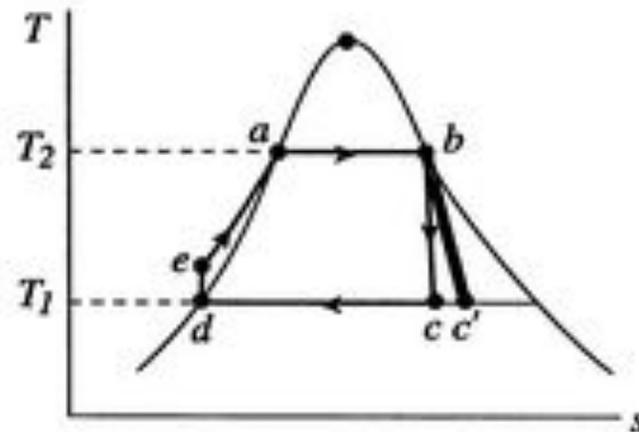
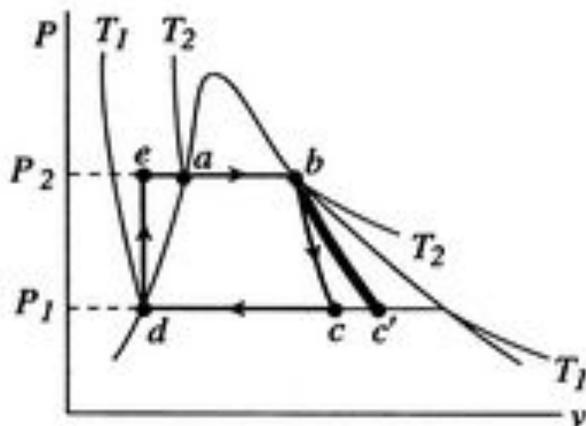
- El motor a vapor funciona entre dos reservas a temperatura T_h (temperatura de la caldera) y T_c (temperatura del condensador) con $T_h > T_c$.
- El calor ΔQ_h entra al sistema en la caldera durante el paso **e-a-b**, pero solo el calor absorbido entre **a** y **b** es absorbido a T_h . Parte del calor es absorbido a $T < T_h$, por lo que el diferencial efectivo de temperatura y la eficiencia del ciclo de Rankine es menor que la de un ciclo de Carnot trabajando entre T_h y T_c .
- En la caldera el proceso **e-a-b** es isobárico pero solo **a-b** es isotermal.



El Ciclo de Rankine

- El sistema hace trabajo sobre el entorno en la turbina/pistón durante el paso **b-c** y consume trabajo en la bomba de compresión durante el paso **d-e**.
- El calor ΔQ_c se elimina durante el paso **c-d** de forma isobárica e isotermal.
- Para calcular la eficiencia del ciclo de Rankine definimos la **temperatura efectiva media** (T_m) por:

$$\Delta Q = T_m \Delta S \quad \Rightarrow \quad T_m = \frac{\int T dS}{\int dS}$$



El Ciclo de Rankine

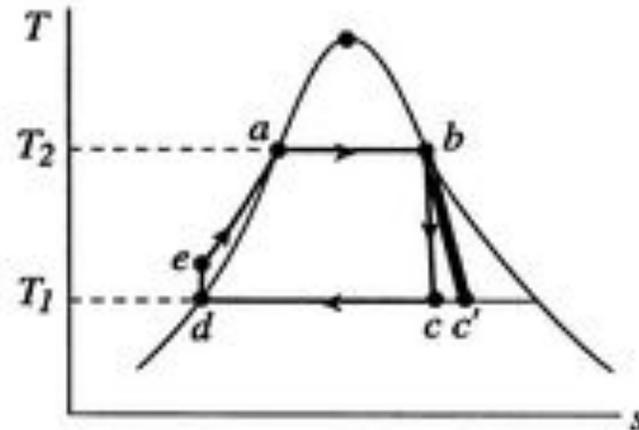
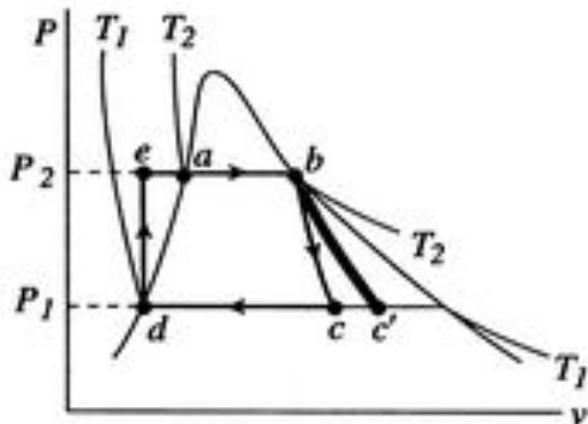
- Definimos entonces:

$$\Delta Q_h = T_{m,h}(S_b - S_e)$$

$$\Delta Q_c = -T_{m,c}(S_c - S_d)$$

- La 1ra ley dice que:

$$\Delta U = 0 = \Delta Q_h + \Delta Q_c + \Delta W_{in} + \Delta W_{out}$$

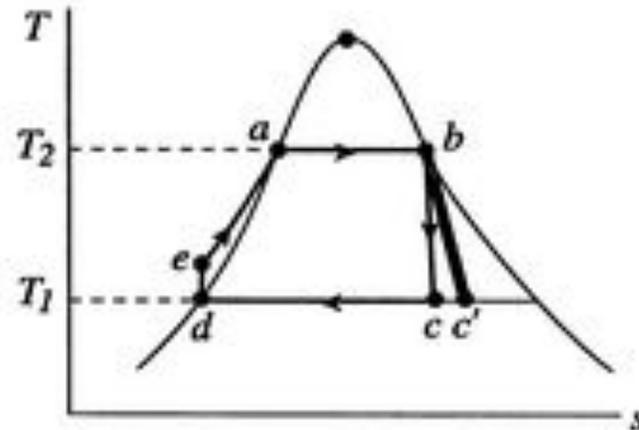
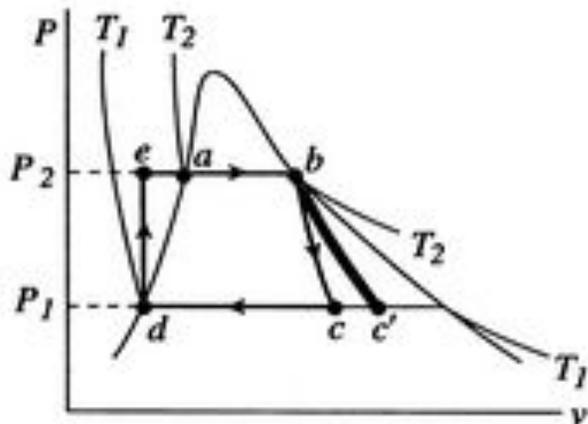


El Ciclo de Rankine

- Por lo tanto la eficiencia es:

$$\eta = \frac{|\Delta W|}{\Delta Q_h} = \frac{|\Delta W_{in} + \Delta W_{out}|}{\Delta Q_h} = \frac{\Delta Q_h + \Delta Q_c}{\Delta Q_h}$$

$$\eta = \frac{T_{m,h}(S_b - S_e) - T_{m,c}(S_c - S_d)}{T_{m,h}(S_b - S_e)}$$



El Ciclo de Rankine

- Como en el ciclo $\Delta S=0$ y **d-e** y **b-c** son adiabáticos ($dS=0$) entonces:

$$S_b - S_e = S_c - S_d$$

- Por lo tanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_{m,c}}{T_{m,h}}$$

- En un motor a vapor se tiene que

$$T_{m,c} \simeq T_c \quad ; \quad T_{m,h} < T_h$$

- Por lo tanto el ciclo es menos eficiente que un ciclo de Carnot trabajando entre T_h y T_c , la forma de optimizar la eficiencia de un motor a vapor es maximizando $T_{m,h}$.

El Ciclo de Rankine

- El ciclo de Rankine (**A**) es difícil de implementar técnicamente porque requiere que pase una mezcla de vapor y líquido a la turbina/pistón (**3-4**) lo que acarrea varios problemas. Por lo general la caldera aumenta la temperatura más allá de la curva crítica (**B**) de modo que la turbina solo reciba vapor (**2-3**). Esto implica más calor inyectado a $T < T_h$ y una menor eficiencia (i.e. menos parecido a Carnot),
- Similarmente, es difícil hacer que un motor/turbina a vapor siga un ciclo de Carnot (**C**) porque tendríamos que operar la bomba y la turbina con un mezcla de vapor y líquido (**1-2** y **3-4**).

