

SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

Termodinámica técnica y fundamentos de transmisión de calor

Adrián Navas Montilla (anavas@unizar.es)

CONTENIDOS

PARTE I

- Máquinas térmicas
- Segundo principio de la Termodinámica
- El ciclo de Carnot
- Entropía

PARTE II

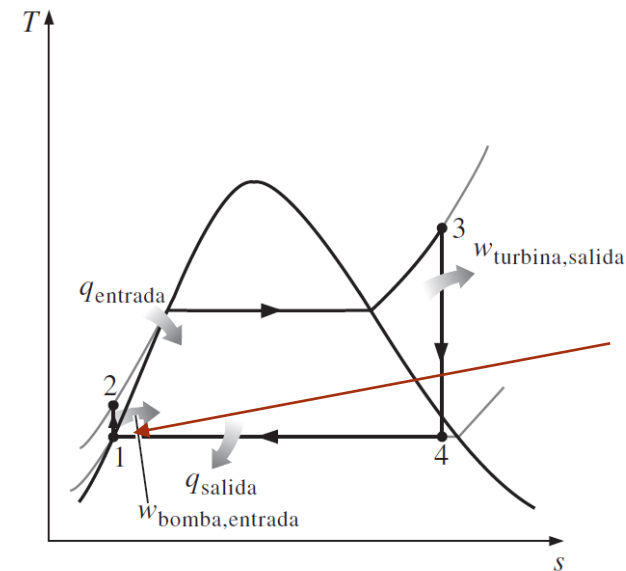
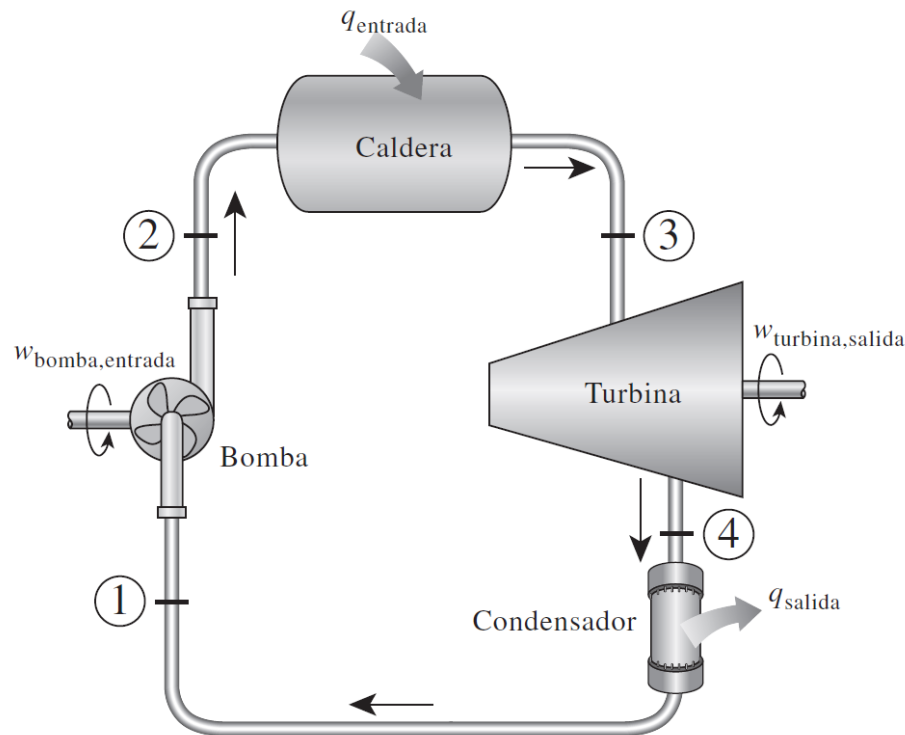
- **Ciclo de potencia de Rankine**
- **Ciclo de potencia de Brayton**
- **Ciclo de motor a reacción de Brayton**

Ciclo de potencia de vapor: ciclo Rankine

Se compone de 4 procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica (adiabática) en una bomba
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera
- 3-4 Expansión isentrópica (adiabática) en una turbina
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador

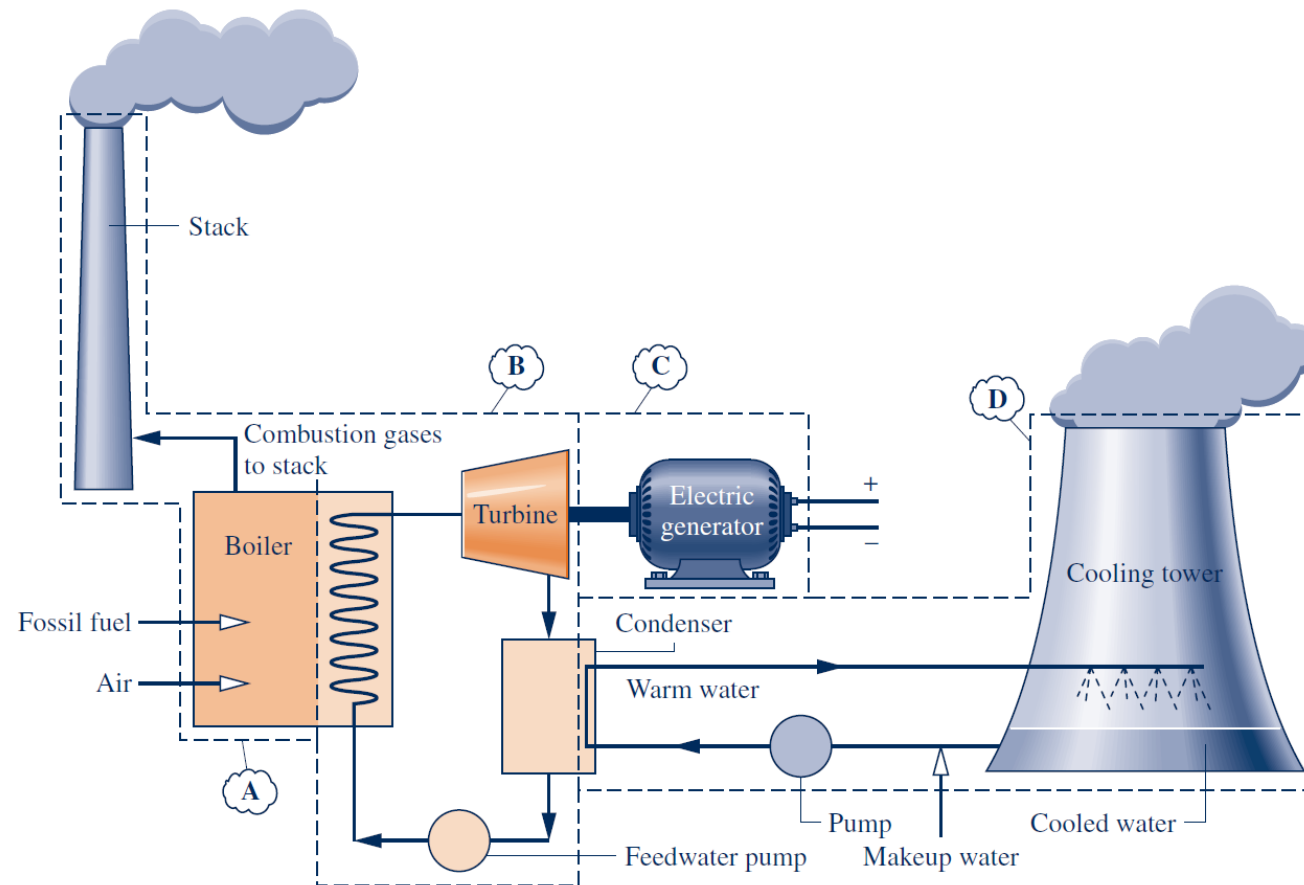
El fluido de trabajo es agua, que podrá estar en fase líquida, vapor o mezcla L+V



El agua llega a la bomba como líquido saturado (1)

Ciclo de potencia de vapor: ciclo Rankine

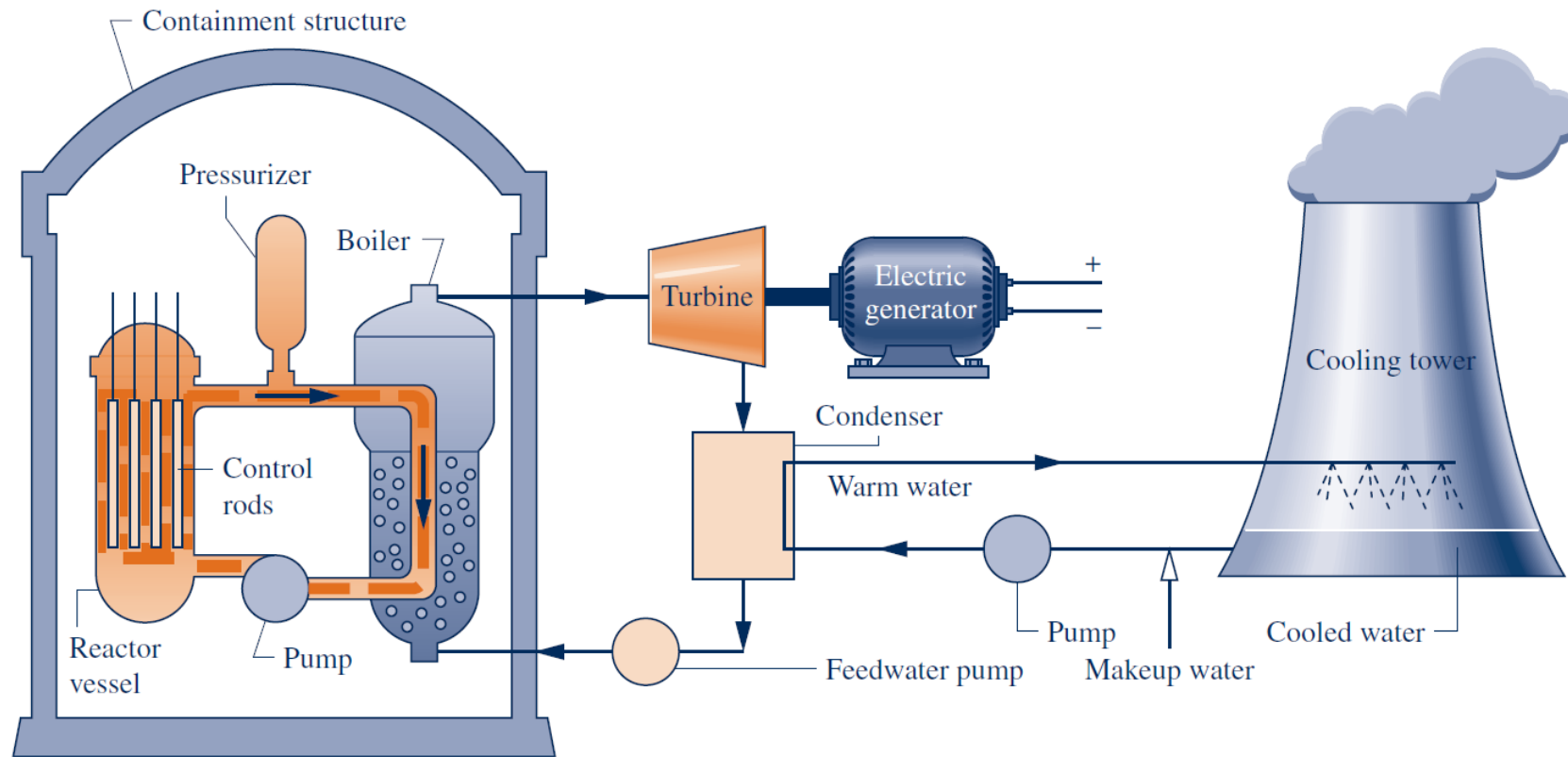
Se utiliza en **centrales térmicas**



(a) Fossil-fueled vapor power plant.

Ciclo de potencia de vapor: ciclo Rankine

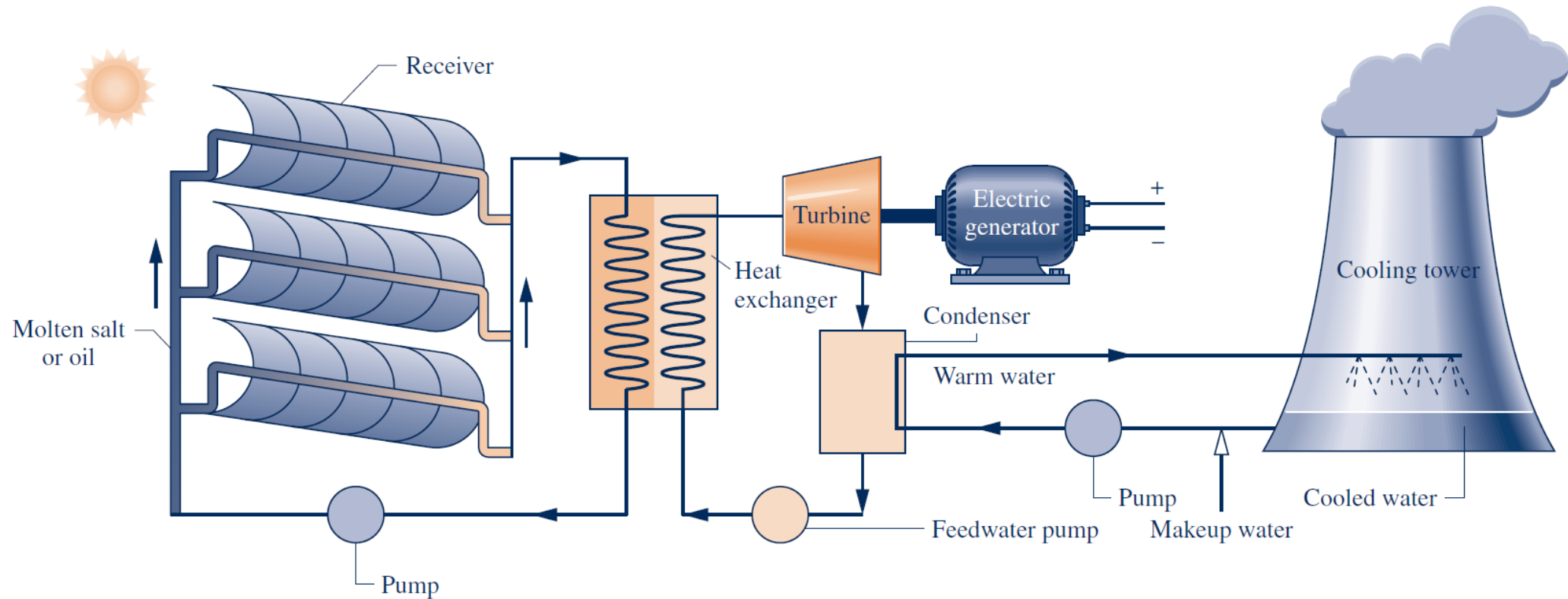
Se utiliza en **centrales nucleares**



(b) Pressurized-water reactor nuclear vapor power plant.

Ciclo de potencia de vapor: ciclo Rankine

Se utiliza en **centrales termosolares de concentración**



(c) Concentrating solar thermal vapor power plant.

Ciclo Rankine: hipótesis de cálculo

- Flujo estacionario: \dot{m} constante para todo el ciclo
- La turbina y el compresor son isentrópicos: $\dot{Q} = 0$
- Las variaciones de energía cinética y potencial se consideran nulas

Así, la ecuación de conservación de la energía entre dos puntos arbitrarios 1 y 2 queda:

$$\cancel{\frac{dE_{vc}}{dt}} = \dot{m} \left(\cancel{h} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_1 - \dot{m} \left(\cancel{h} + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_2 + \dot{Q} - \dot{W}_{eje}$$

$$\dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q} - \dot{W}_{eje} = 0$$

$$h_1 - h_2 + q - w_{eje} = 0$$

Ciclo Rankine: análisis del ciclo

Trabajo dispositivo flujo estable para
flujo incompresible (Tema 4, pag. 15)

- Bomba (1-2): Compresión isentrópica agua líquida ($q=0$)

$$w_{bomba,entrada} = h_2 - h_1$$
$$w_{bomba,entrada} = v(P_2 - P_1)$$

- Caldera (2-3): Adición de calor a P constante ($w=0$)

$$q_{entrada} = h_3 - h_2$$

- Turbina (3-4): Expansión isentrópica vapor ($q=0$)

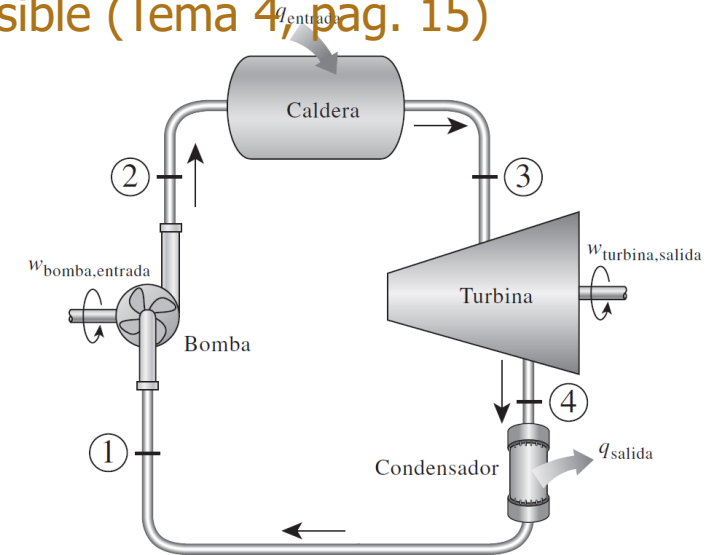
$$w_{turbina,salida} = h_3 - h_4$$

- Condensador (4-1): Extracción de calor a P constante ($w=0$)

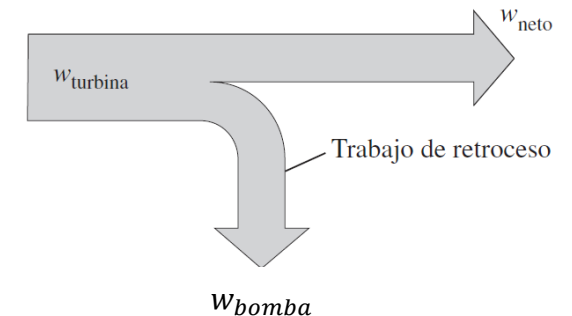
$$q_{salida} = h_4 - h_1$$

Eficiencia térmica del ciclo:

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto,salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}}$$

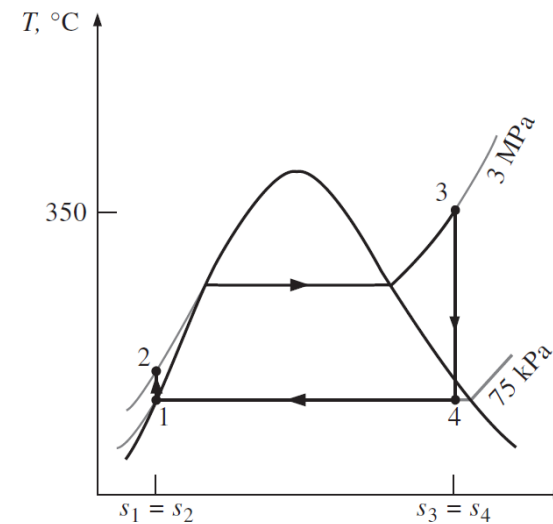
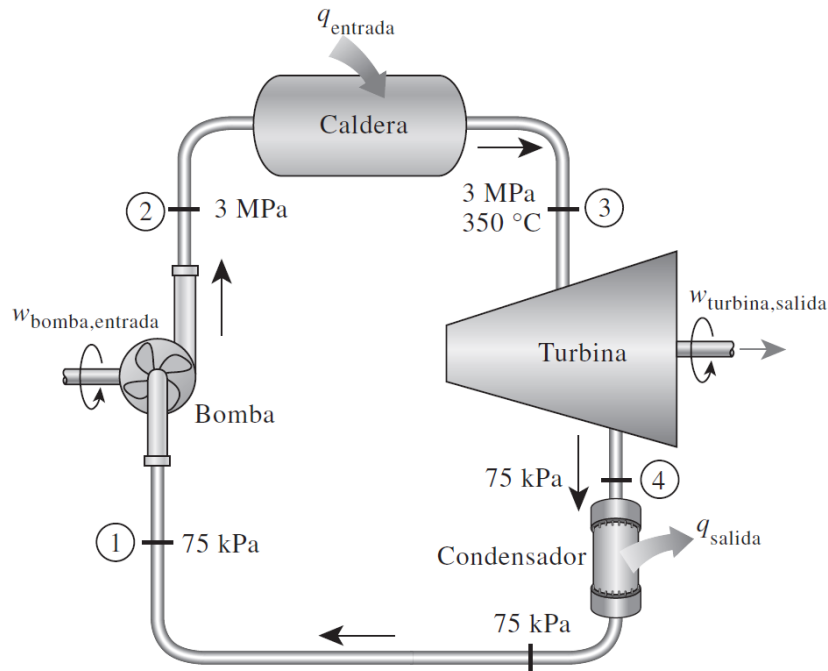


$$w_{turbina,salida} - w_{bomba,entrada} = q_{entrada} - q_{salida}$$



Ciclo Rankine: ejemplo

Considere una central eléctrica de vapor que opera en el ciclo Rankine ideal simple. El vapor de agua entra a la turbina a 3 MPa y 350 °C y es condensado en el condensador a una presión de 75 kPa. Determine la eficiencia térmica de este ciclo.

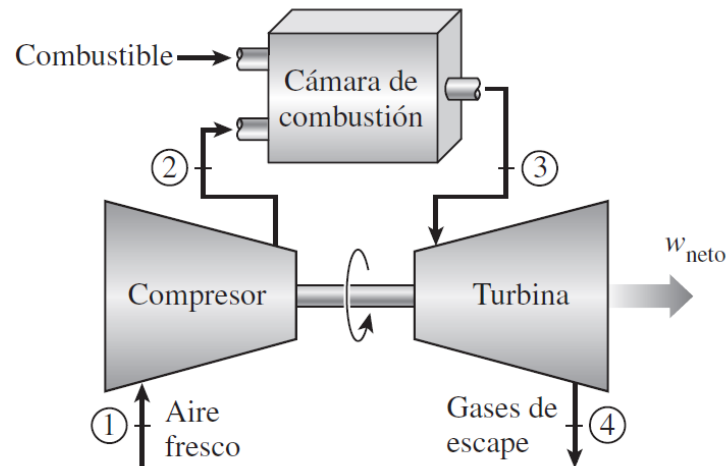


Ciclo de potencia de gas: ciclo Brayton

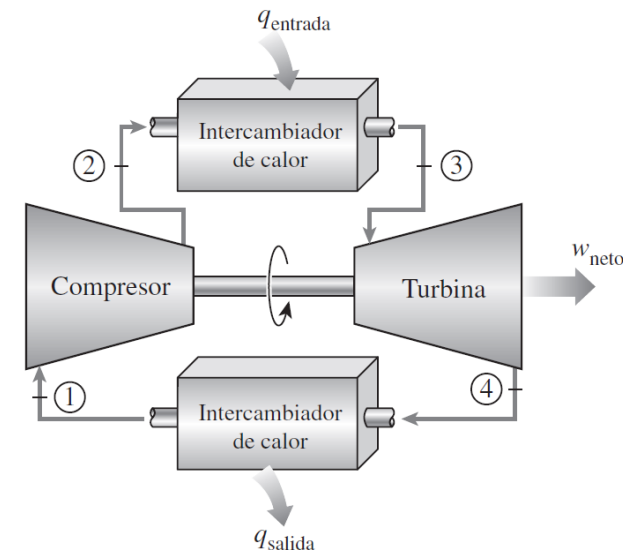
Los ciclos de potencia de gases reales son bastante complejos. Para reducir el análisis a un nivel manejable, se utilizan las siguientes aproximaciones, conocidas comúnmente como suposiciones de **aire estándar**:

1. El fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y siempre se comporta como un gas ideal. Podemos aproximarlos por gas perfecto (c_p, c_v constantes).
2. Todos los procesos que integran el ciclo son internamente reversibles.
3. El proceso de combustión es sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa.
4. El proceso de escape es sustituido por un proceso de rechazo de calor que regresa al fluido de trabajo a su estado inicial.

Ciclo real
(abierto)

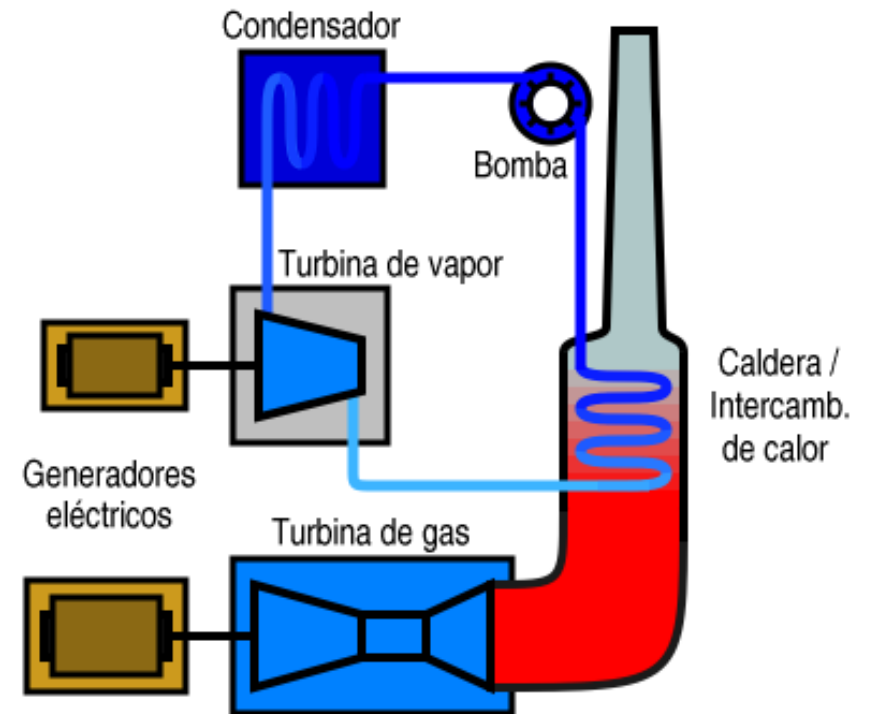
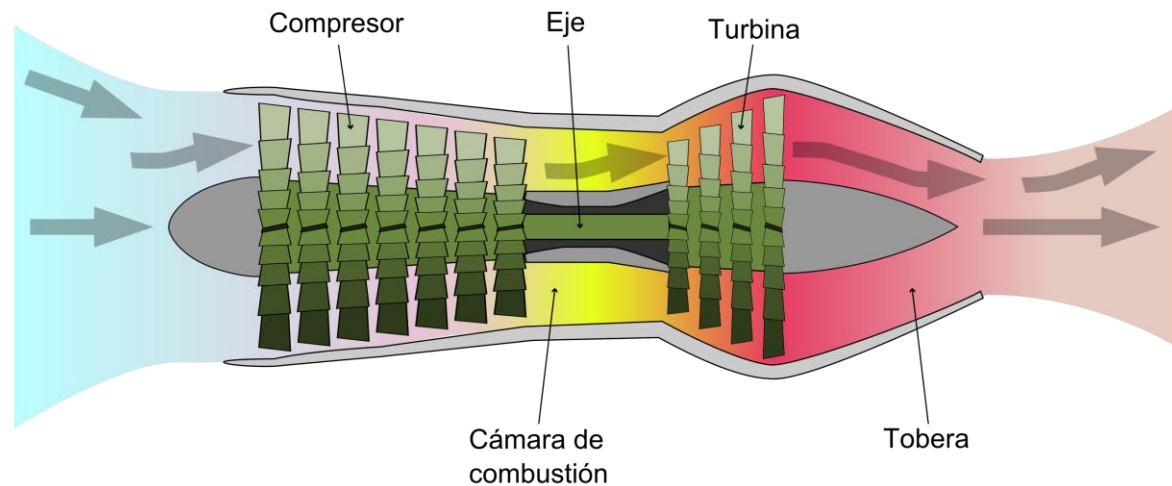


Modelo
(cerrado)



Ciclo de potencia de gas: aplicaciones

Propulsión aeronáutica y generación de energía (ciclo combinado)

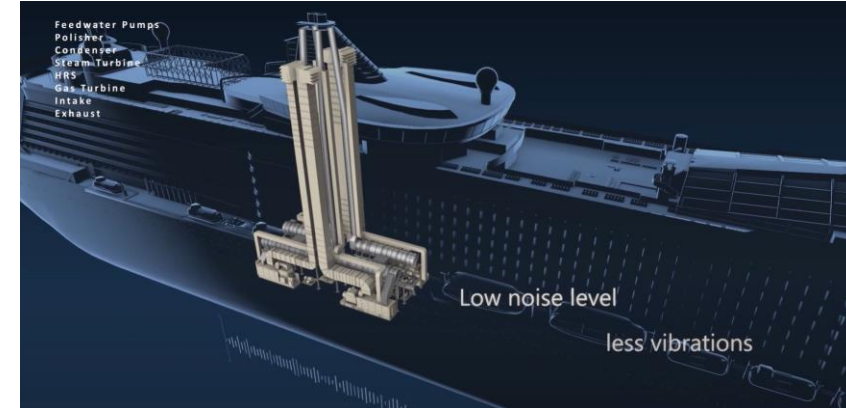


Ciclo combinado: ciclo Rankine + ciclo Brayton

https://youtu.be/TuL3nI_3X6g

Ciclo de potencia de gas: aplicaciones

Otras aplicaciones...



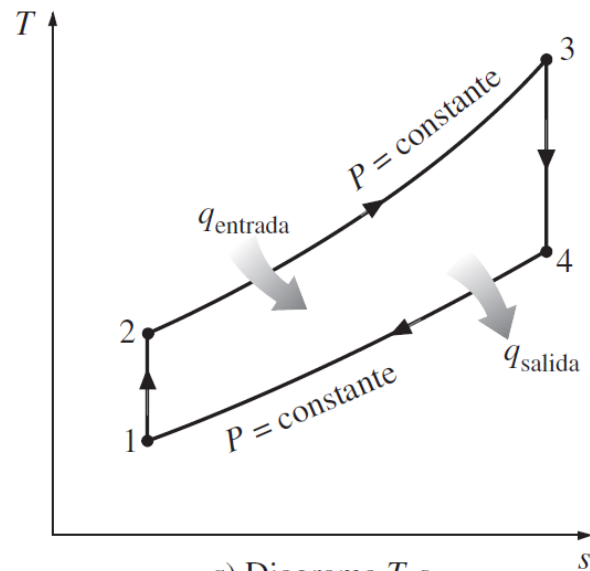
<https://youtu.be/MoVcohlSRMc>

<https://youtu.be/gN3AU0CwoeM>

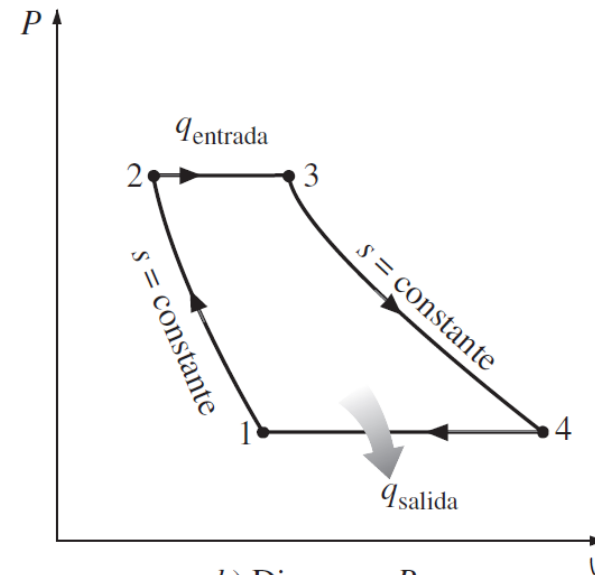
Ciclo de potencia de gas: ciclo Brayton

Se compone de 4 procesos:

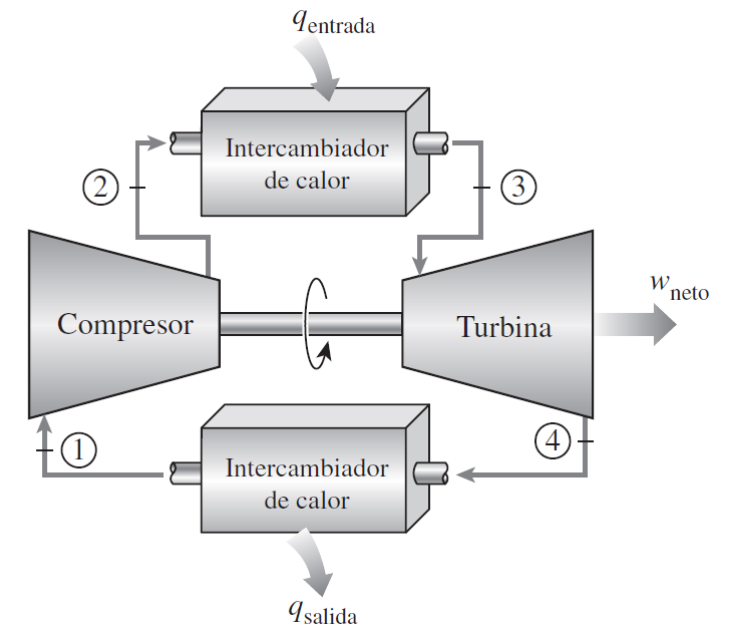
- 1-2 Compresión isentrópica (en un compresor)
- 2-3 Adición de calor a presión constante
- 3-4 Expansión isentrópica (en una turbina)
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante



a) Diagrama T-s



b) Diagrama P-v



Ciclo Brayton: hipótesis de cálculo

- Flujo estacionario: \dot{m} constante para todo el ciclo
- La turbina y el compresor son isentrópicos: $\dot{Q} = 0$
- Las variaciones de energía cinética y potencial se consideran nulas

Así, la ecuación de conservación de la energía queda:

$$\cancel{\frac{dE_{vc}}{dt}} = \dot{m} \left(h + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_1 - \dot{m} \left(h + \cancel{\frac{c^2}{2}} + \cancel{gz} \right)_2 + \dot{Q} - \dot{W}_{eje}$$

$$\dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q} - \dot{W}_{eje} = 0$$

$$h_1 - h_2 + q - w_{eje} = 0$$

Además, podemos considerar:
 $\Delta h = c_p \Delta T$

Ciclo Brayton: análisis del ciclo

- Compresor (1-2): Compresión isentrópica ($q=0$)

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

- Intercambiador (2-3): Adición de calor a P constante ($w=0$)

$$q_{\text{entrada}} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

- Turbina (3-4): Expansión isentrópica ($q=0$)

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_1}{T_2}$$

- Intercambiador (4-1): Extracción de calor a P constante ($w=0$)

$$q_{\text{salida}} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

Eficiencia térmica del ciclo:

$$\eta_{\text{ter}} = \frac{w_{\text{neto,salida}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

