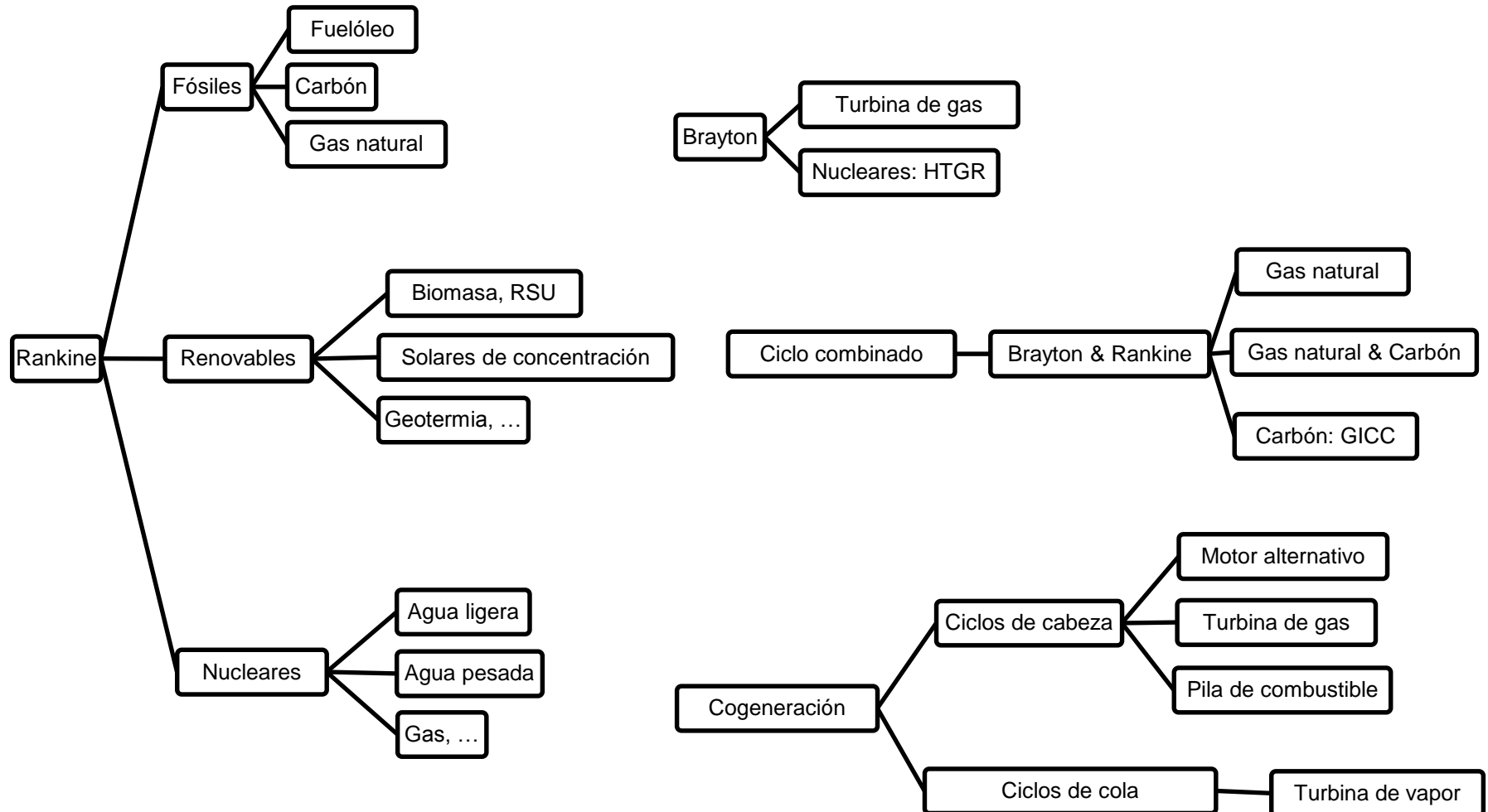


Tema 6.- CENTRALES TÉRMICAS

6.1. INTRODUCCIÓN

Centrales Térmicas

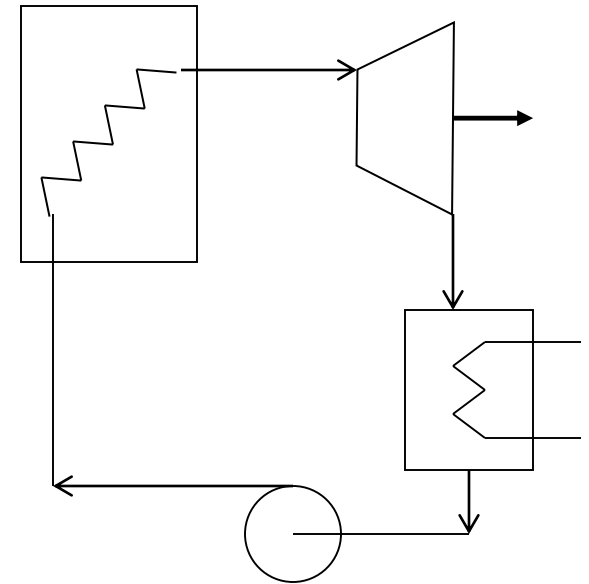
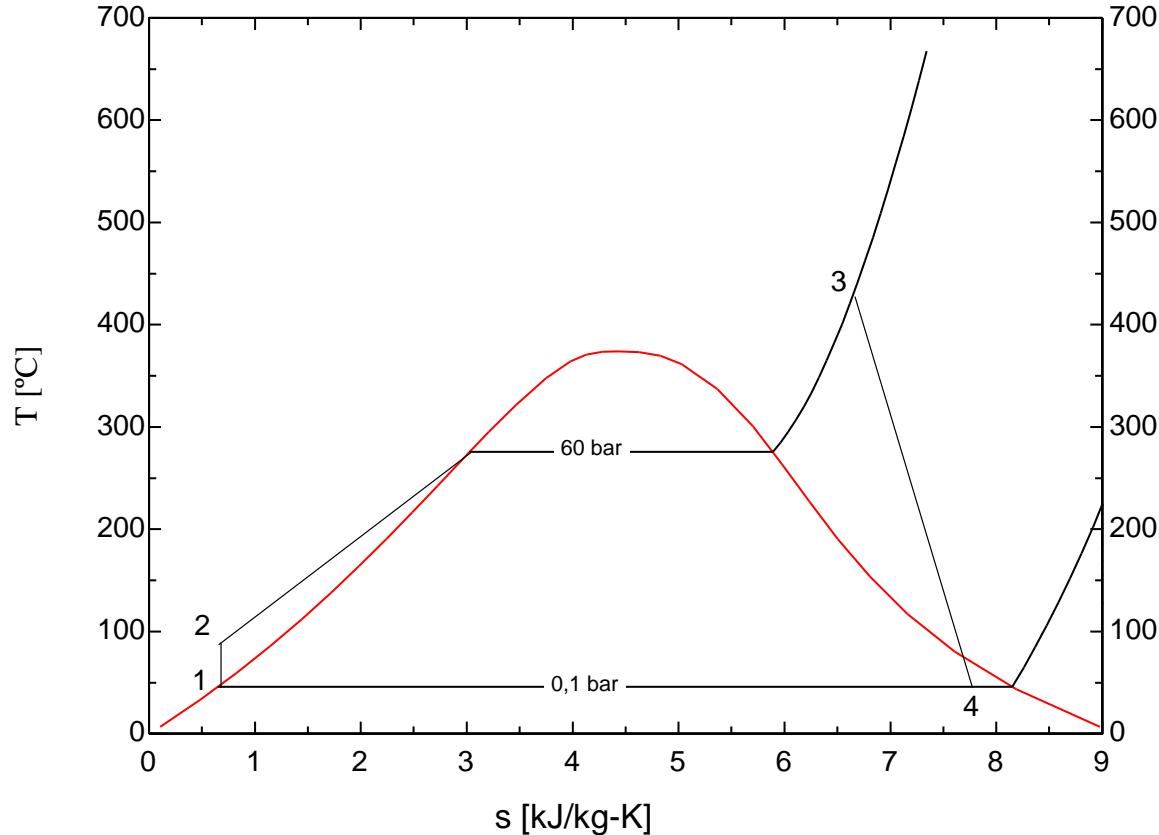


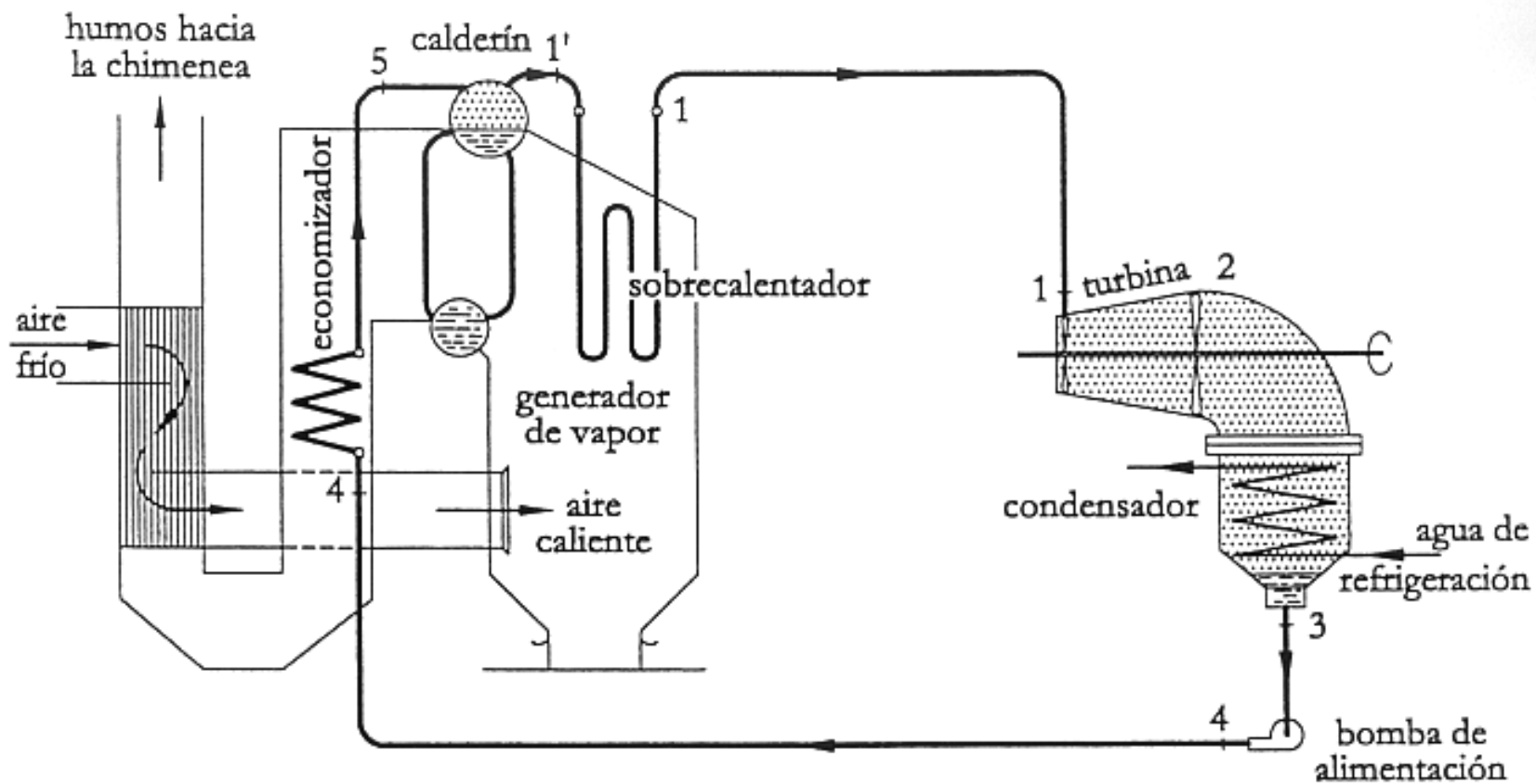
Centrales no Térmicas Renovables



6.2. CICLO DE RANKINE

- La presión mínima la limita el medio de enfriamiento
- El aporte de trabajo se realiza en fase líquida, por lo que resulta muy pequeño:
- Los procesos en la fase líquida no son visibles en el T-s a escala real $w_b = \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_b}$



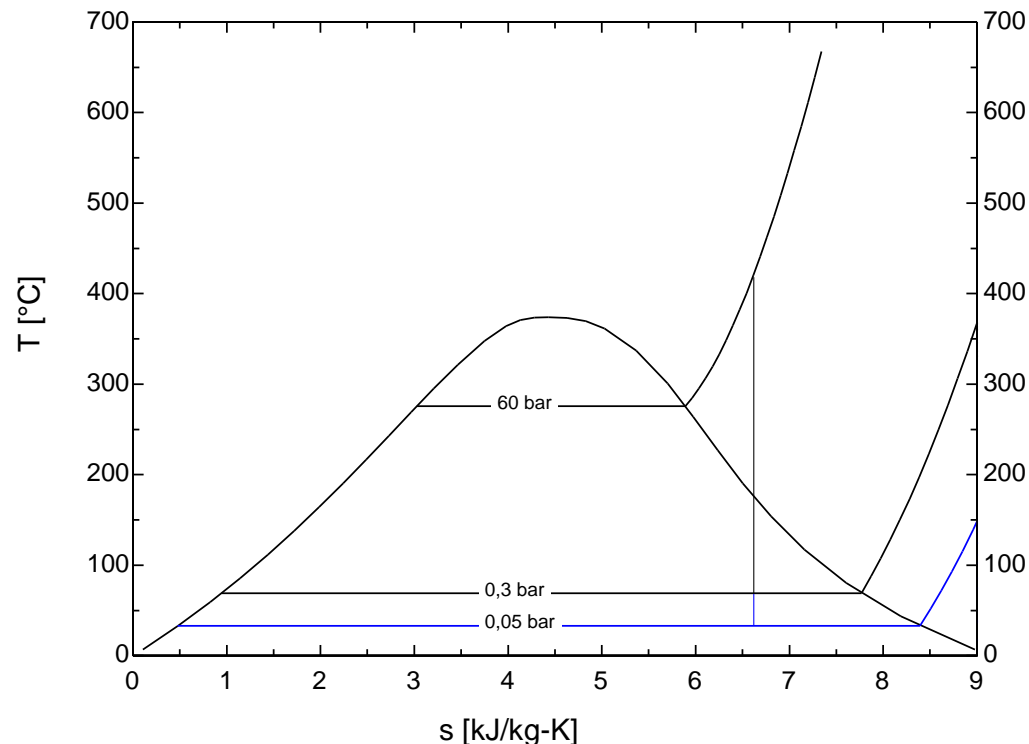


[Agüera, Termodinámica lógica y motores térmicos, Ed. Ciencia 3, Madrid, 1999]

6.2.1. Procedimientos para mejorar el rendimiento

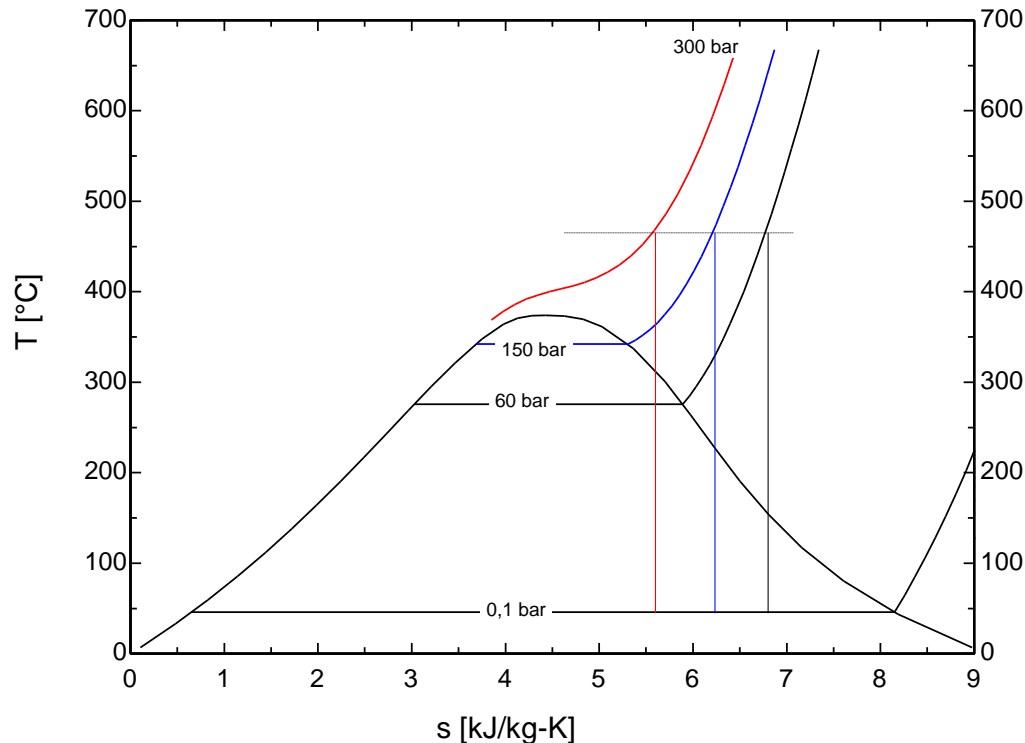
Reducción de la temperatura de rechazo de calor

- Supone reducir la presión del condensador
- Se reduce la temperatura media de rechazo de calor
- Se incrementa la humedad a la salida de la turbina
- Está limitado por el medio de enfriamiento
- Se produce entrada de aire debido al vacío: necesidad de desgasificador

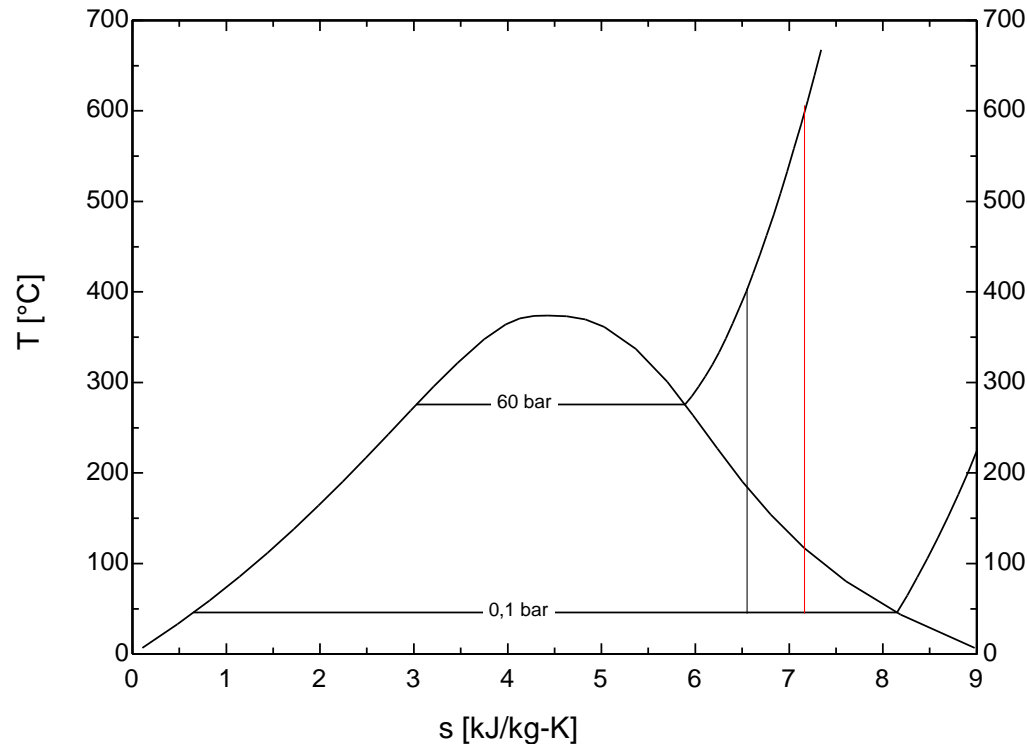


Aumento de la temperatura de aceptación de calor

- **Método 1:** Incremento de la presión de la caldera
 - Se eleva la temperatura media de aceptación de calor
 - Se incrementa la humedad a la salida de la turbina: erosión en los álabes por impacto de gotas ($x_4 > 0,9$)
 - Este problema se resuelve con recalentamiento

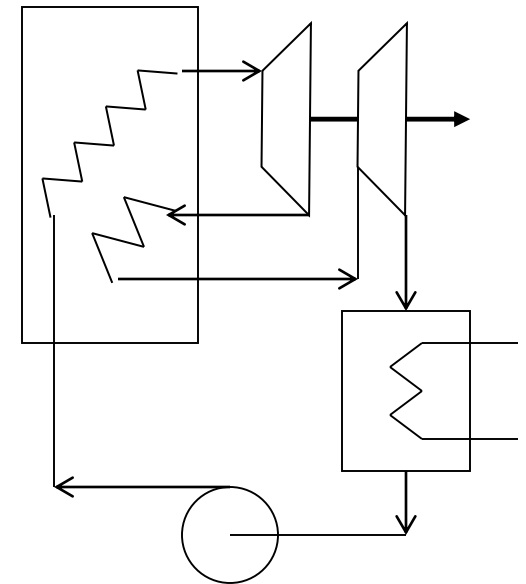
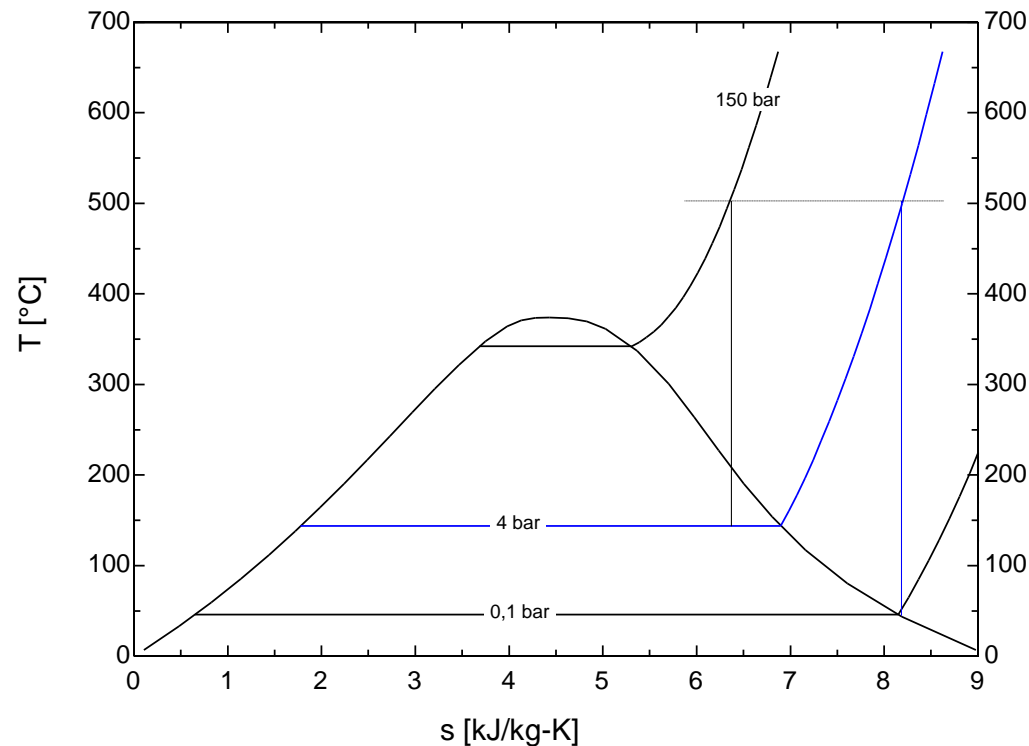


- **Método 2:** Sobrecalentamiento a alta temperatura
 - se incrementa la temperatura media de adición de calor
 - se reduce la humedad a la salida de la turbina
 - está limitado por los materiales de la turbina: $T_3 < 620^{\circ}\text{C}$

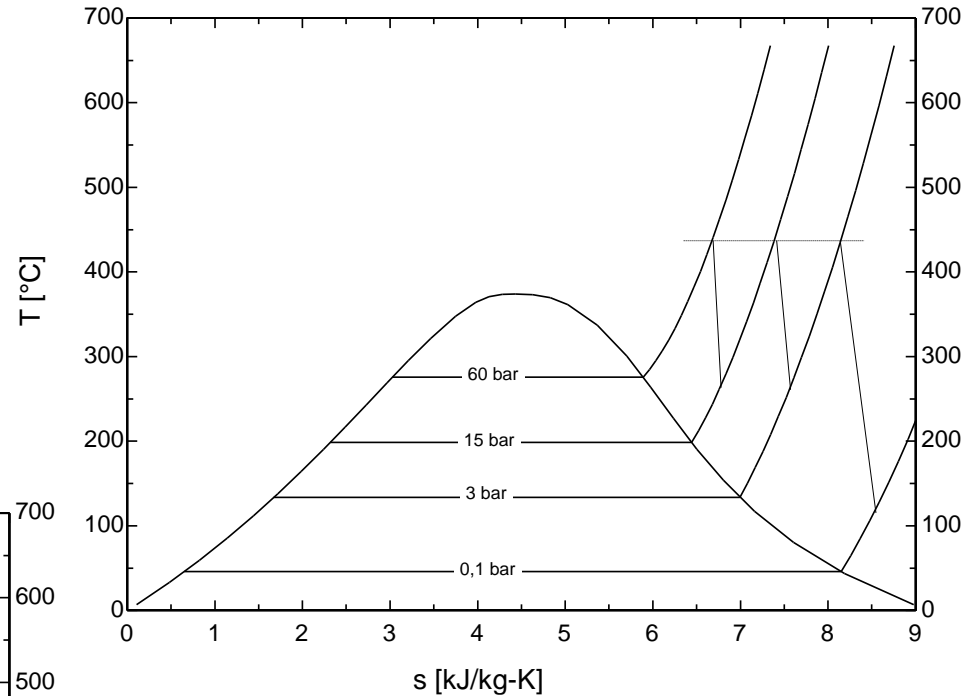
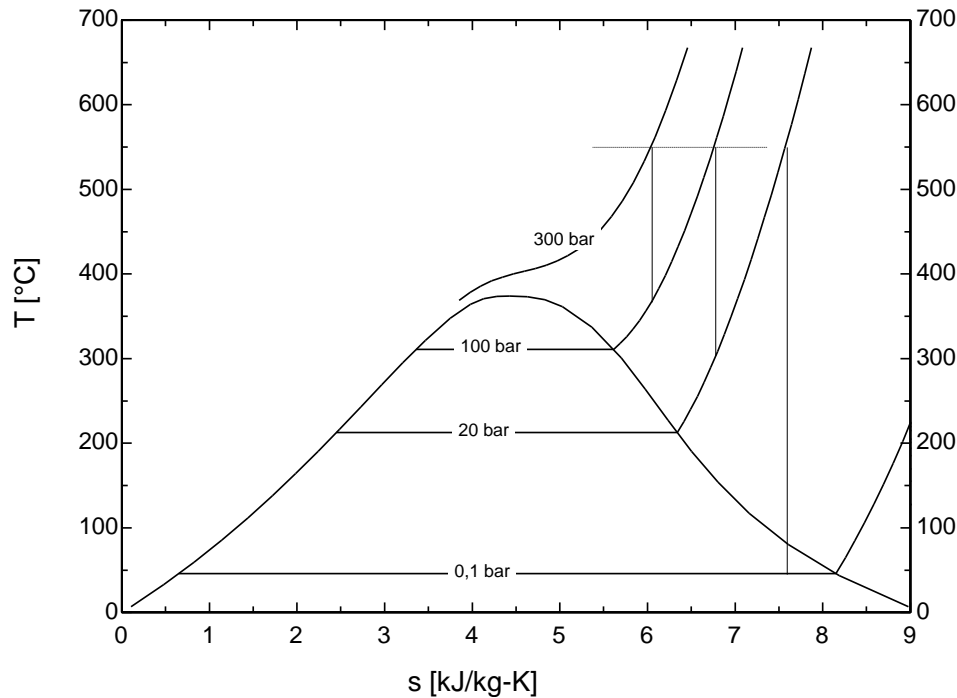


• **Método 3:** Recalentamiento

- se emplea para altas presiones de caldera, pues reduce la humedad a la salida de la turbina
- se incrementa la temperatura media de adición de calor
- la temperatura media de adición de calor sube cuantos más recalentamientos se hagan



- en ciclos subcríticos sólo se hace un recalentamiento, pues si no puede aumentar la temperatura de rechazo de calor



- en ciclos supercríticos se hacen dos recalentamientos, para reducir la humedad de las últimas etapas

• **Método 4:** Regeneración

- persigue incrementar la temperatura media de adición de calor mediante precalentamiento con vapor extraído de la turbina

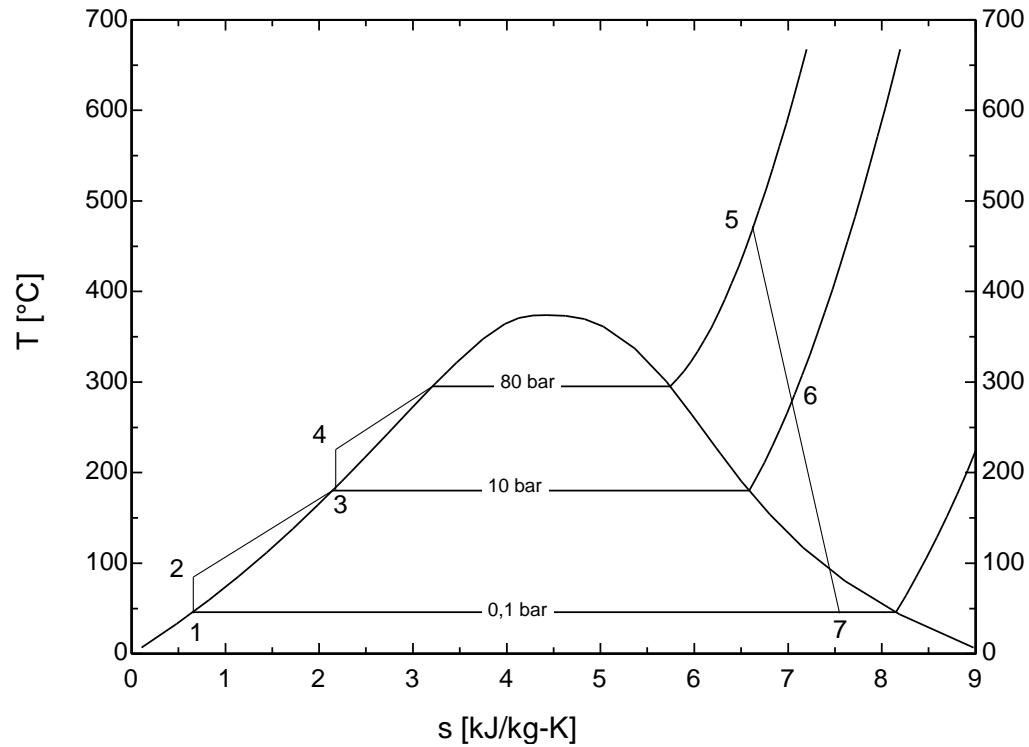
- Precalentadores abiertos o de mezcla

- el agua que va a la caldera (agua de alimentación) se mezcla con el vapor extraído
- el agua de alimentación sale normalmente como líquido saturado
- requieren una bomba aguas abajo para elevar la presión a la de la caldera
- buenas características de intercambio de calor
- se suele poner uno sólo, a presión mayor que la atmosférica, como desgasificador o desaereador

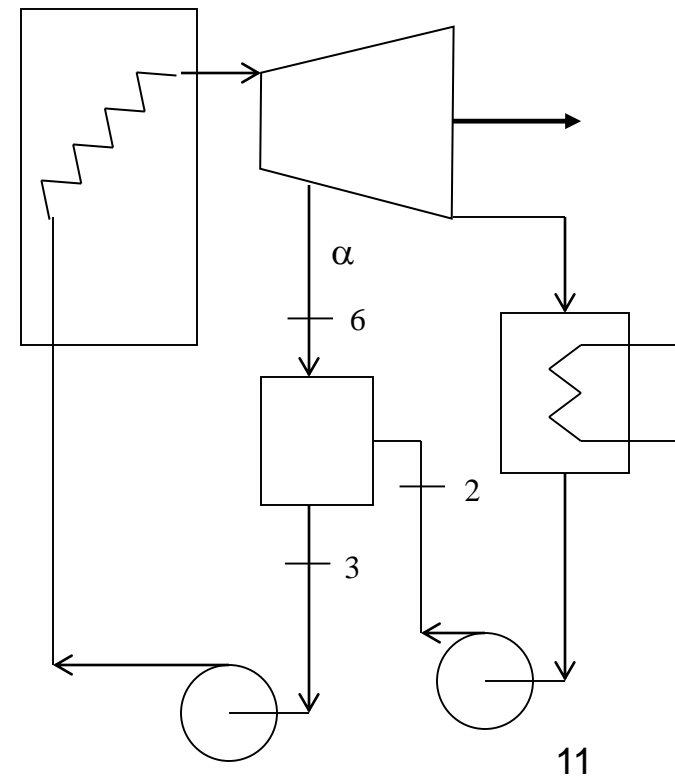
- Precalentadores cerrados o de superficie

- el agua que va a la caldera circula por unos tubos, en cuyo exterior se condensa el vapor extraído
- el vapor condensado (drenaje) sale en condiciones de líquido saturado o subenfriado (en el primer caso se dice que el calentador es seco). Si no se dice otra cosa debe asumirse que el calentador es de este tipo, seco.
- el agua sale como líquido subenfriado a una temperatura cercana a la de saturación del vapor extraído (puede ser menor, mayor o igual, según el área de intercambio)
- el vapor condensado (drenaje) se puede enviar aguas abajo mediante una bomba (poco usado) o aguas arriba (precalentador previo o condensador) mediante una válvula
- tienen peores coeficientes de transferencia de calor que los abiertos, pero no requieren bomba (si son de aguas arriba)
- suelen colocarse varios (hasta 9)

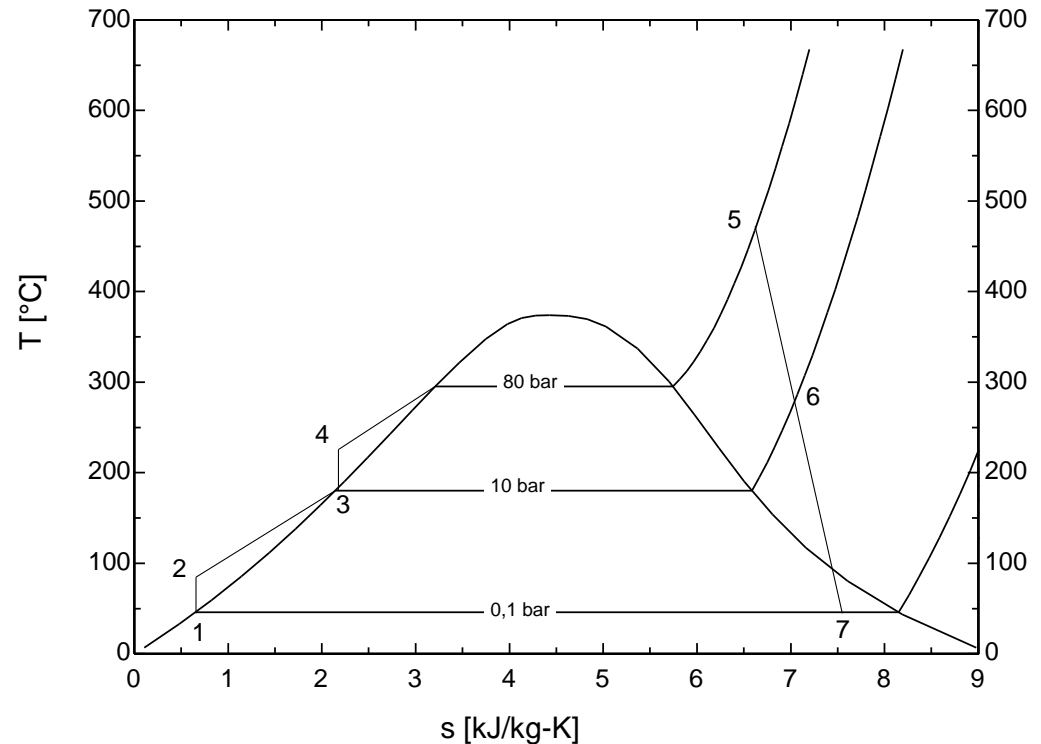
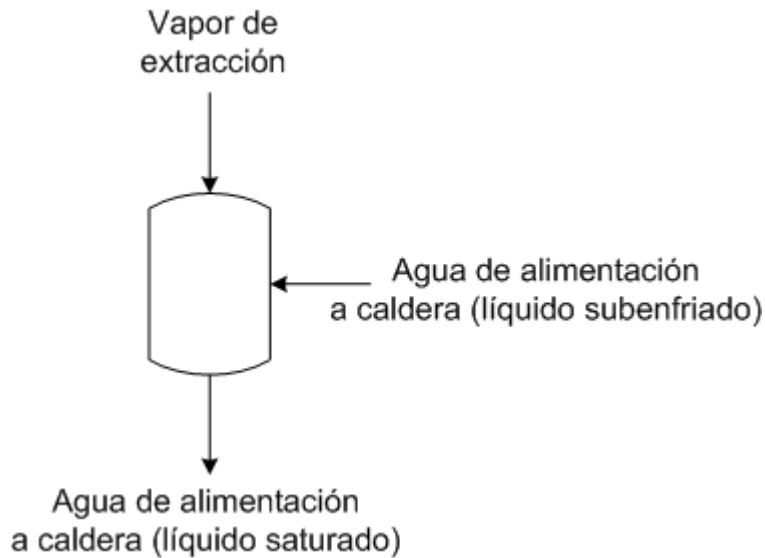
Calentador abierto



Calentador: $\alpha h_6 + (1-\alpha)h_2 = h_3$



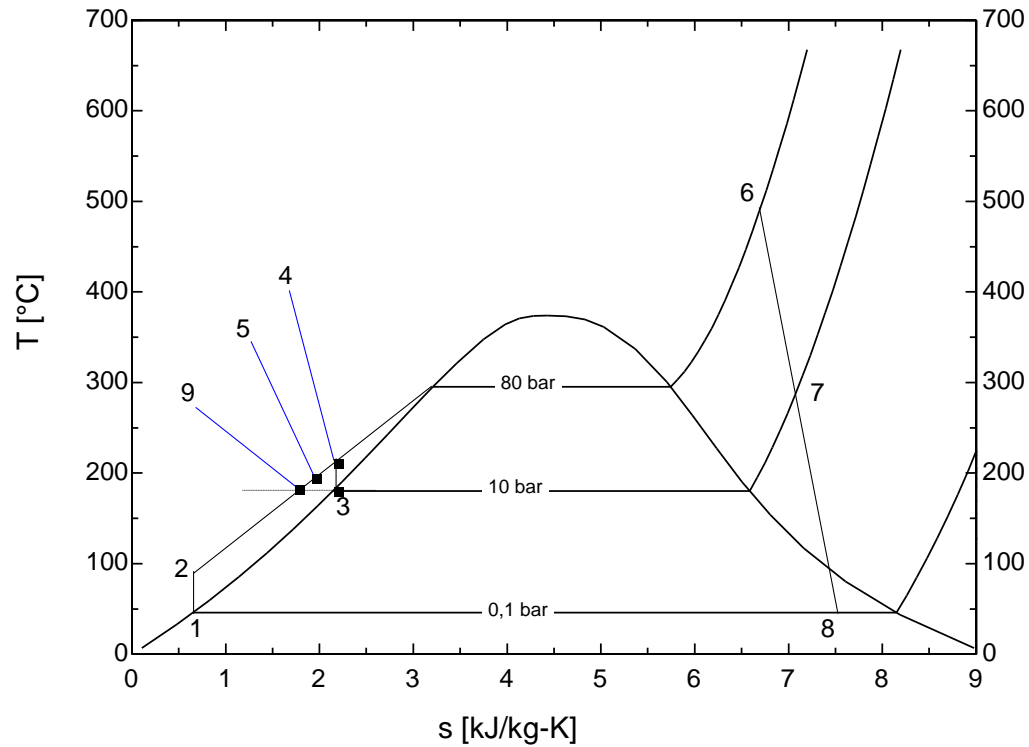
Calentador abierto: notación y condiciones de salida



Idealmente la salida del agua de alimentación debería de ser líquido saturado, lo que dependerá de las proporciones de los caudales de vapor y agua. Si la proporción no fuese la adecuada:

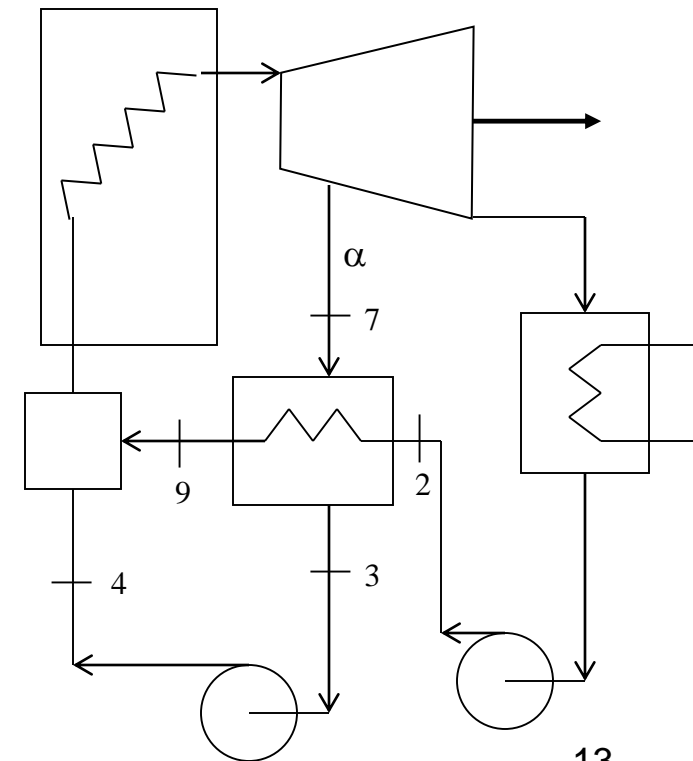
- el agua podría salir como vapor húmedo o incluso sobrecalentado, lo que provocaría un mal funcionamiento de la bomba
- el agua podría salir como subenfriada, lo que significaría que no se ha realizado la máxima regeneración posible

Calentador cerrado "hacia delante"

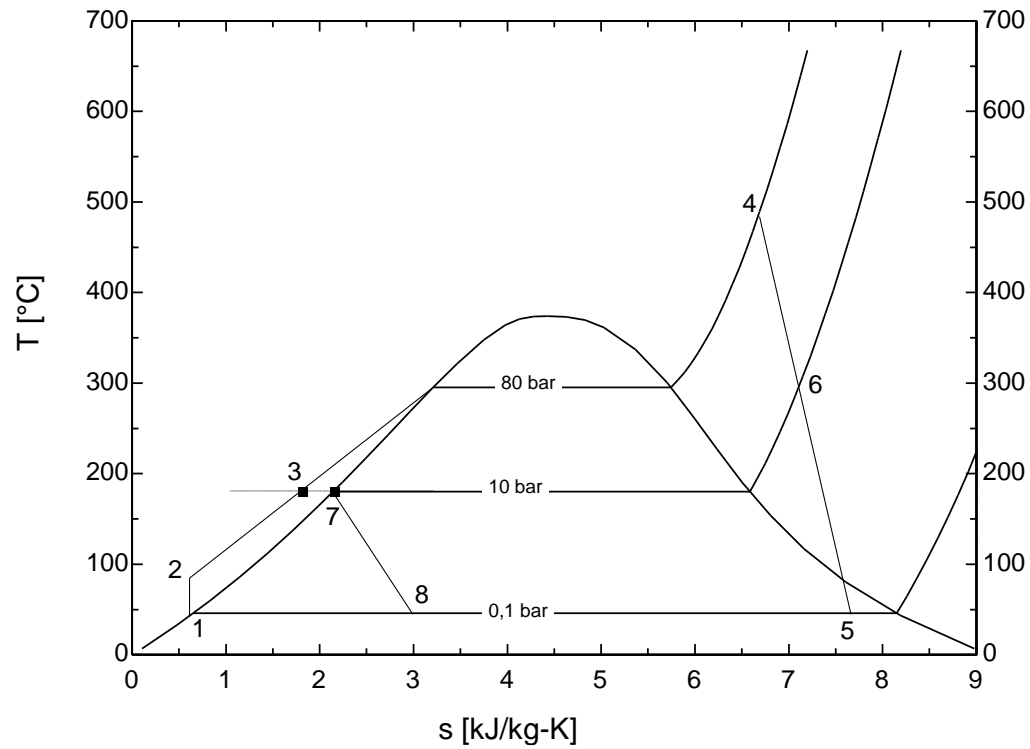


Cámara de mezcla: $\alpha h_4 + (1-\alpha)h_9 = h_5$

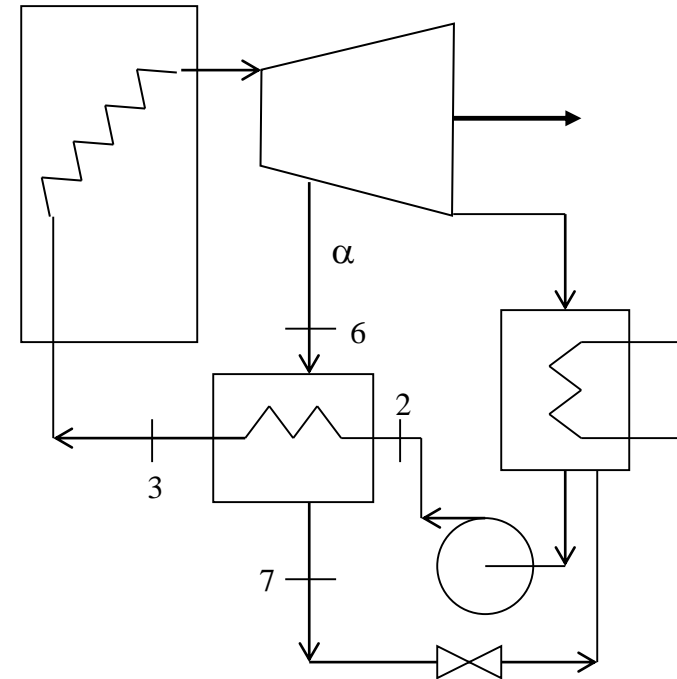
Calentador: $\alpha h_7 + (1-\alpha)h_2 = (1-\alpha)h_9 + \alpha h_3$



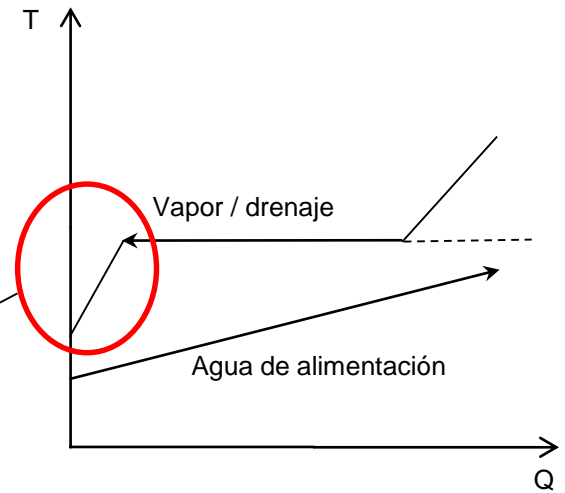
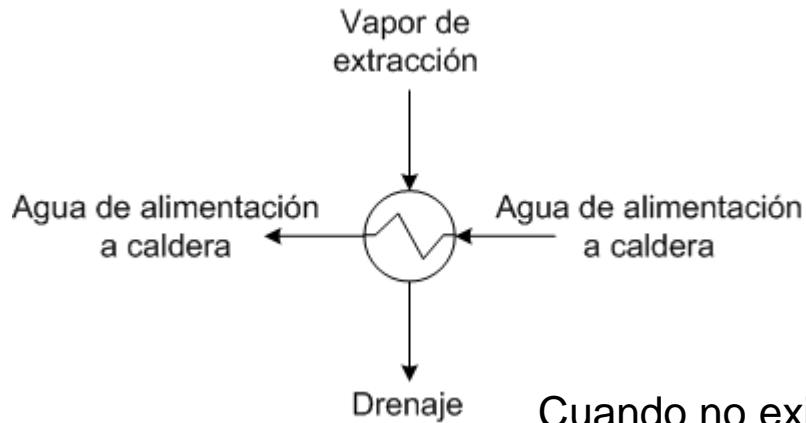
Calentador cerrado "hacia atrás"



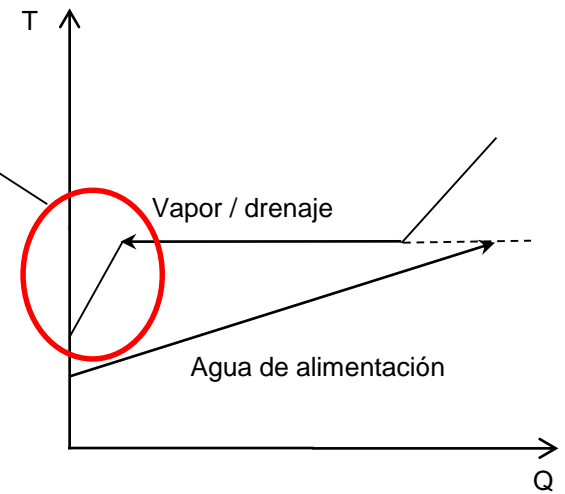
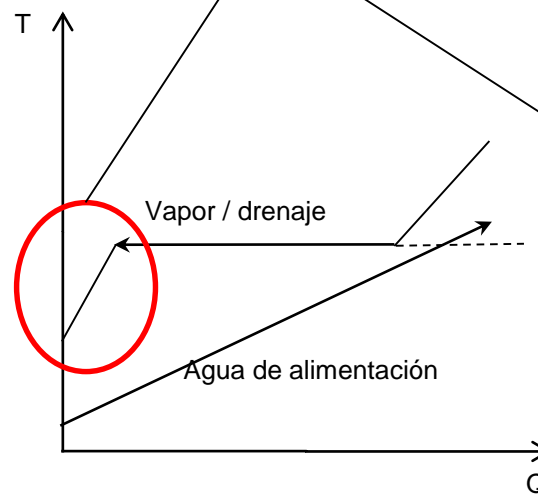
Calentador: $\alpha h_6 + h_2 = \alpha h_7 + h_3$



Calentador cerrado: notación y condiciones de salida



Cuando no existe este tramo el calentador no tiene zona de enfriamiento de drenajes y se dice que es “seco”

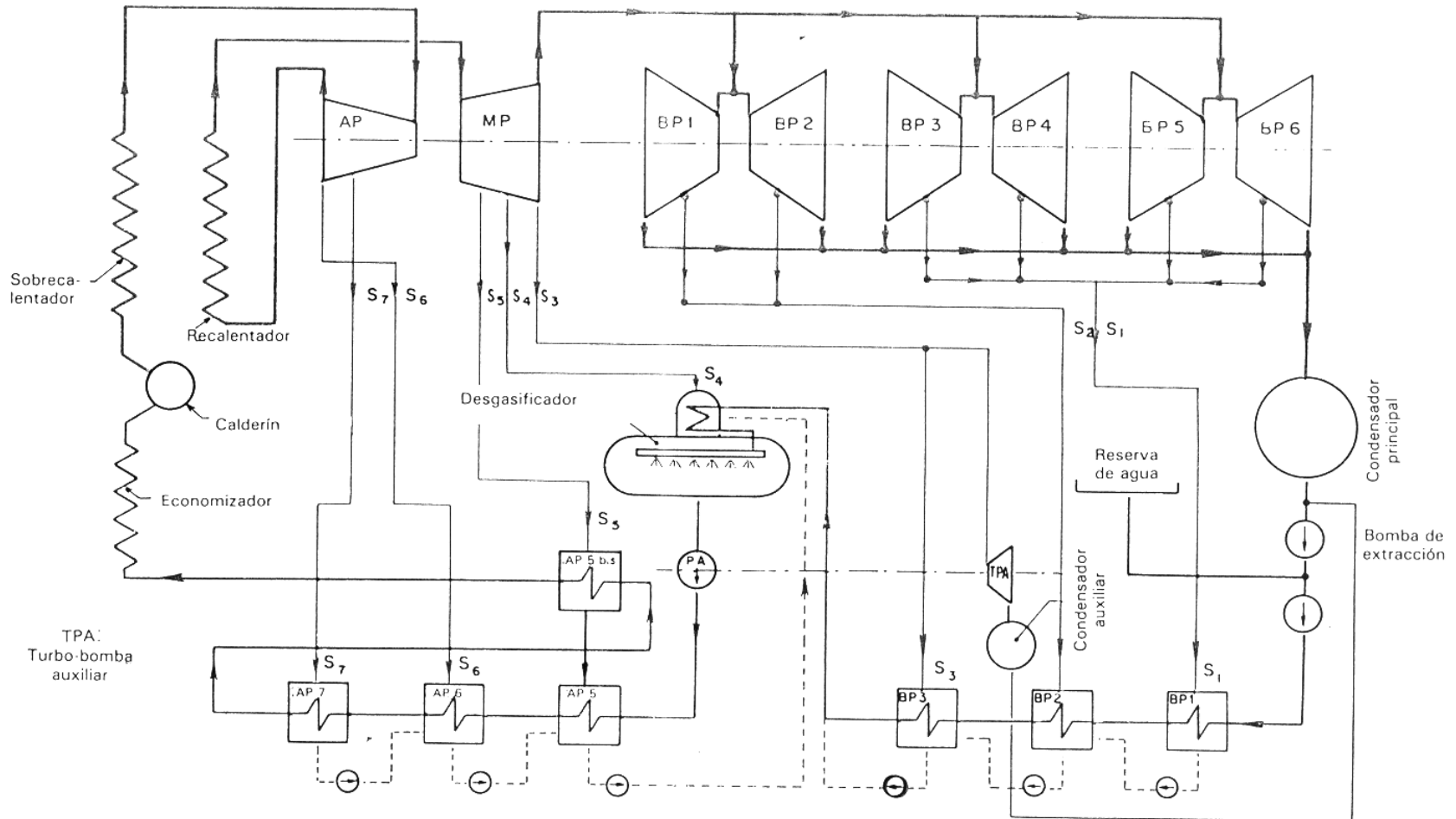


6.2.2. Ciclos de Rankine reales

Centrales de combustible fósil

Características del vapor

Sobrecalentado $P_1 = 163 \text{ bar. } T = 565^\circ\text{C.}$
 Recalentado $P_2 = 34 \text{ bar. } T = 565^\circ\text{C.}$



Central de Porcheville. Grupo de 600 MW.

Evolución de las centrales de vapor (combustible fósil)

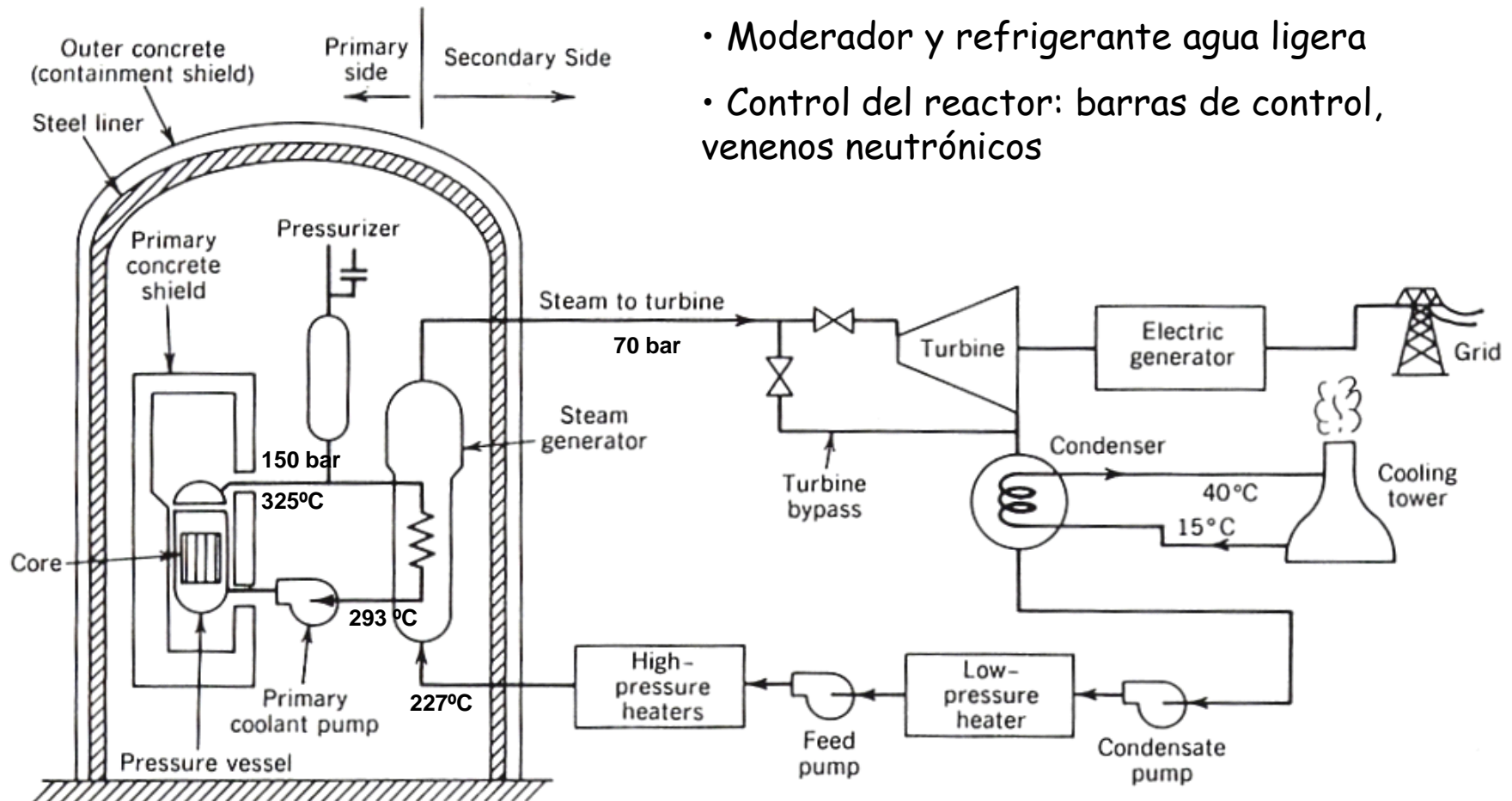
| | GB | | | | | | | | supercríticas | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|------|-------|
| | 1907 | 1919 | 1938 | 1950 | 1958 | 1959 | 1966 | 1973 | GB | USA | Japón |
| Potencia (MW) | 5 | 20 | 30 | 60 | 120 | 200 | 500 | 660 | 450 | 800 | 700 |
| P. caldera (bar) | 13 | 14 | 41 | 62 | 103 | 162 | 159 | 159 | 241 | 241 | 310 |
| T. inicial (°C) | 260 | 316 | 454 | 482 | 538 | 566 | 566 | 565 | 566 | 538 | 566 |
| T. Prim. Rec (°C) | - | - | - | - | 538 | 538 | 566 | 565 | 566 | 552 | 566 |
| T. Seg. Rec (°C) | - | - | - | - | - | - | - | - | 566 | 538 | 566 |
| T. sal. prec (°C) | - | 79 | 171 | 196 | 224 | 238 | 252 | 252 | 286 | 287 | |
| # precalentadores | - | 2 | 3 | 4 | 6 | 6 | 7 | 8 | 9 | 7 | |
| P. Cond. (kPa) | 13.5 | 4 | 3.7 | 3.7 | 4.4 | 5.4 | 5.1 | 5.1 | | | |
| Rendimiento (%) | 17 | 27.6 | 30.5 | 35.6 | 37.5 | 39.8 | 39.5 | 40 | 40 | 41.7 | |

| País | Grupo | Combustible | Potencia (MW) | P (bar) | T (C) | P _{cond} (bar) | η (PCI) | Año |
|-----------|---------------|-------------|---------------|---------|-------------|-------------------------|---------|------|
| Japón | Kawagoe-1 | GNL | 700 | 320 | 566/566/566 | --- | 46.6 | 1989 |
| Japón | Kawagoe-2 | GNL | 700 | 320 | 566/566/566 | --- | 46.6 | 1990 |
| Japón | Kawagoe-3 | Carbón | 700 | 250 | 540/593 | --- | --- | 1993 |
| Japón | Matsuura-2 | --- | 1000 | 240 | 540/593 | --- | --- | 1997 |
| Dinamarca | Shaerbaek-3 | Carbón | 400 | 300 | 580/580/580 | 0.023 | 47.0 | 1997 |
| Dinamarca | Nordjylland-1 | Gas Natural | 400 | 300 | 580/580/580 | 0.023 | 49.0 | 1998 |

Centrales nucleares

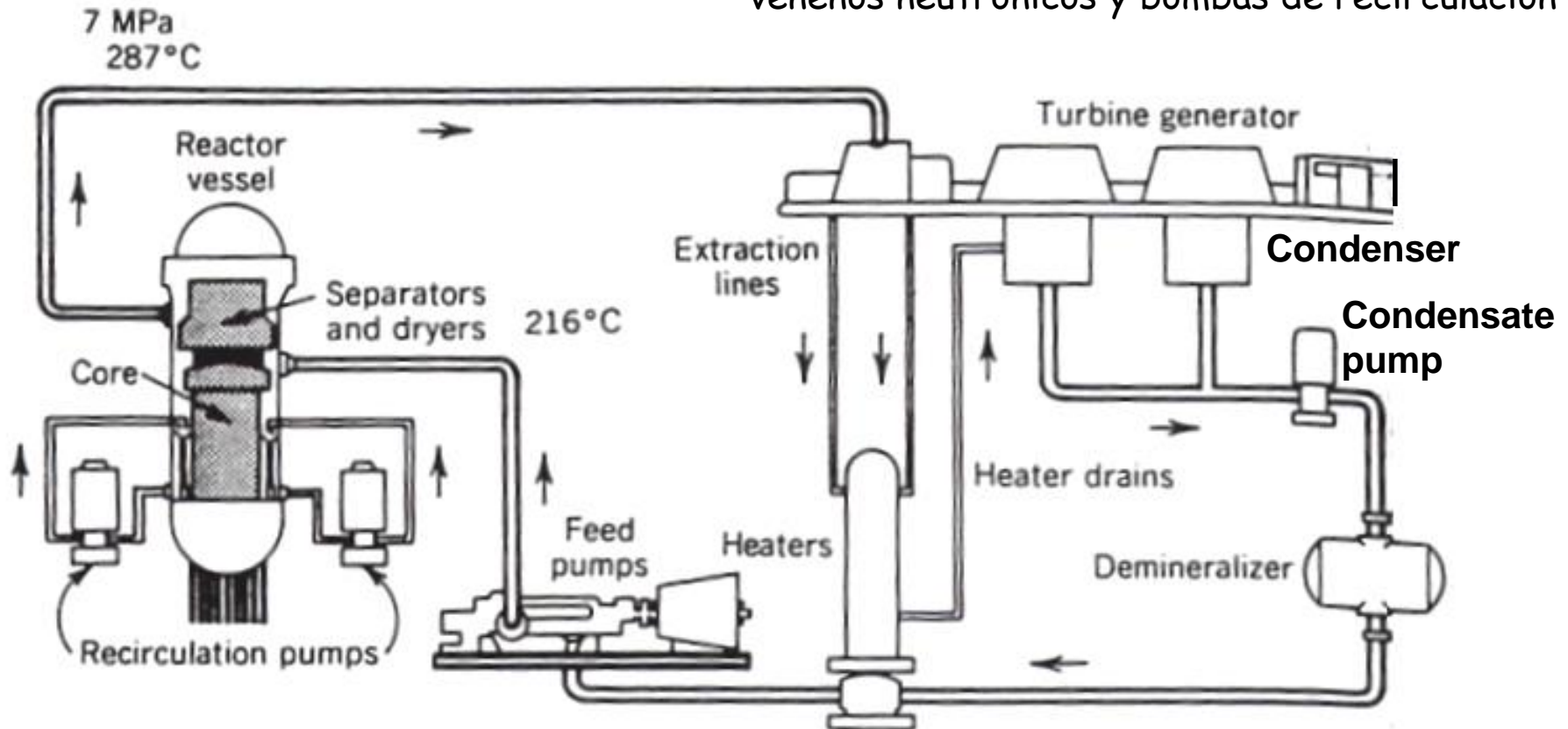
Central de agua ligera PWR

- Ciclo indirecto
- Moderador y refrigerante agua ligera
- Control del reactor: barras de control, venenos neutrónicos



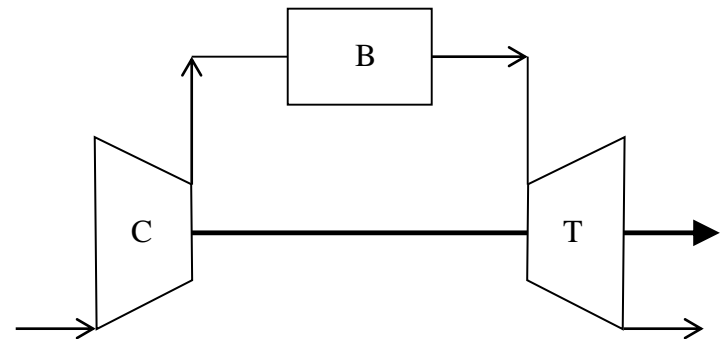
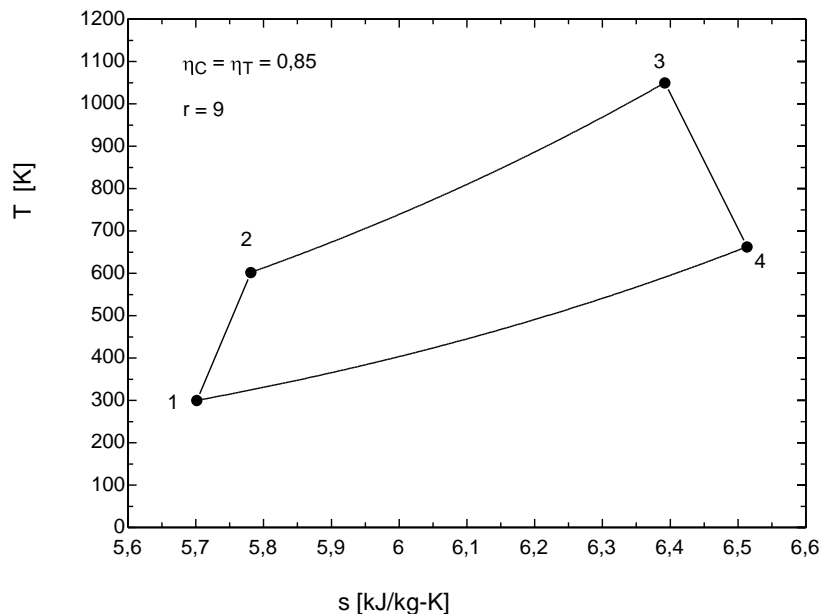
Central de agua ligera BWR

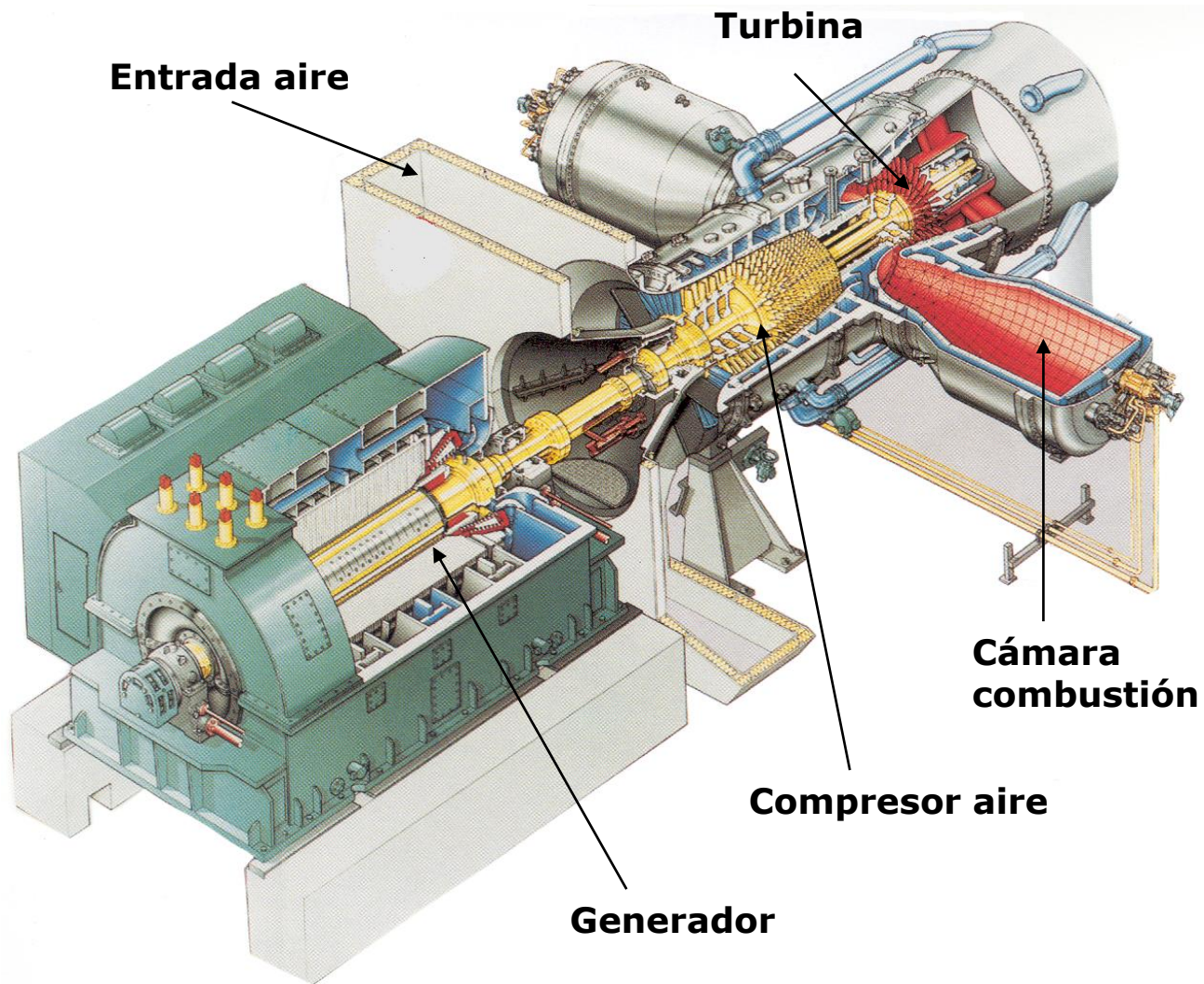
- Ciclo directo
- Moderador y refrigerante agua ligera
- Control del reactor: barras de control, venenos neutrónicos y bombas de recirculación



6.3. CICLO DE BRAYTON

- Conocido como ciclo Brayton o Joule
- Es un ciclo abierto donde el fluido de trabajo es aire atmosférico antes de la cámara de combustión y gases de escape tras ella
- Se puede suponer que el fluido siempre es aire, pues trabajan con mucho exceso para controlar la temperatura de entrada en turbina
- Aplicaciones:
 - Aviación: motor turbina de gas (turbo-hélice, turborreactor, turbo-fan)
 - Generación eléctrica: microturbinas de gas, ciclos combinados usando GN, turbinas de gas aisladas

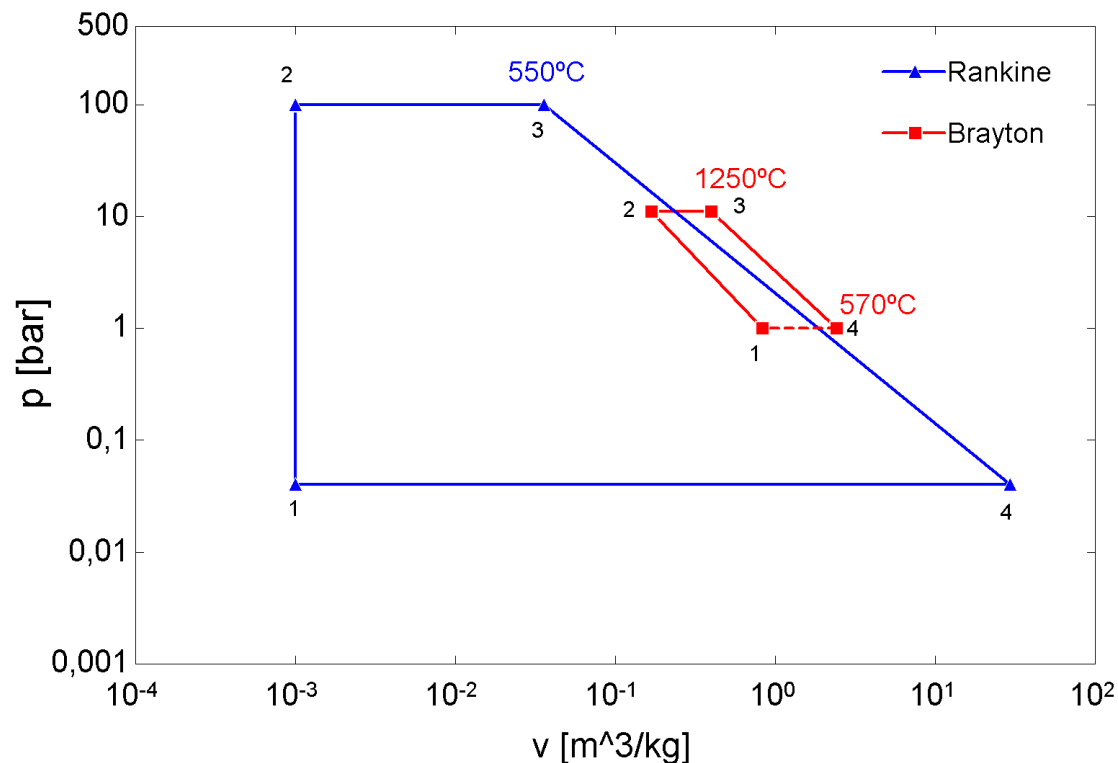




[Adaptado de : Treviño, Tecnologías de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC, Elcogas & Club español de la energía, 2003]

- Comparación con el ciclo de Rankine

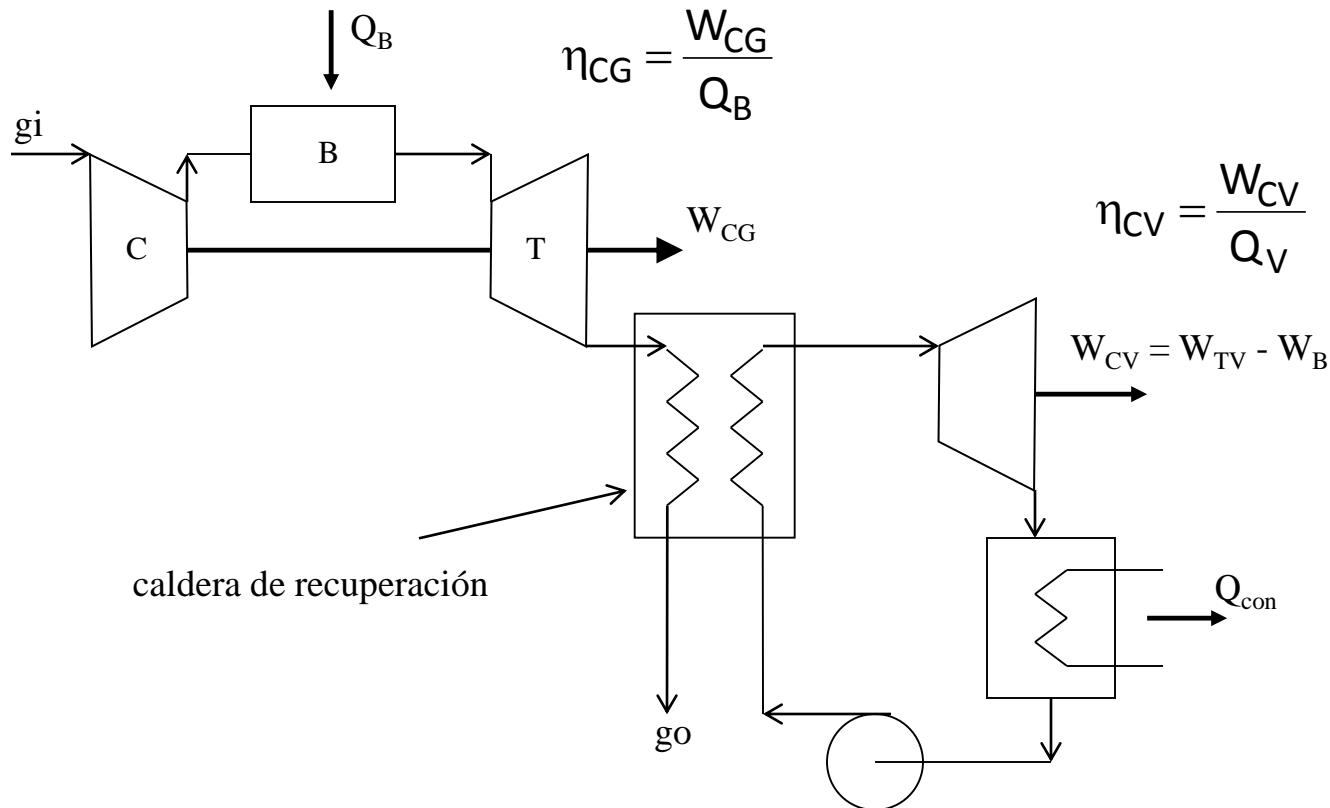
- Se comprime gas por lo que la temperatura de entrada en turbina ha de ser muy elevada para compensar el trabajo del compresor
- Carece de condensador: instalación más compacta
- El calor se disipa al ambiente, sin necesidad de torre: ideal para zonas con poca agua
- Las condiciones ambiente influyen muchísimo: altas temperaturas y bajas presiones reducen la densidad del aire a la entrada del compresor y con ello la potencia neta



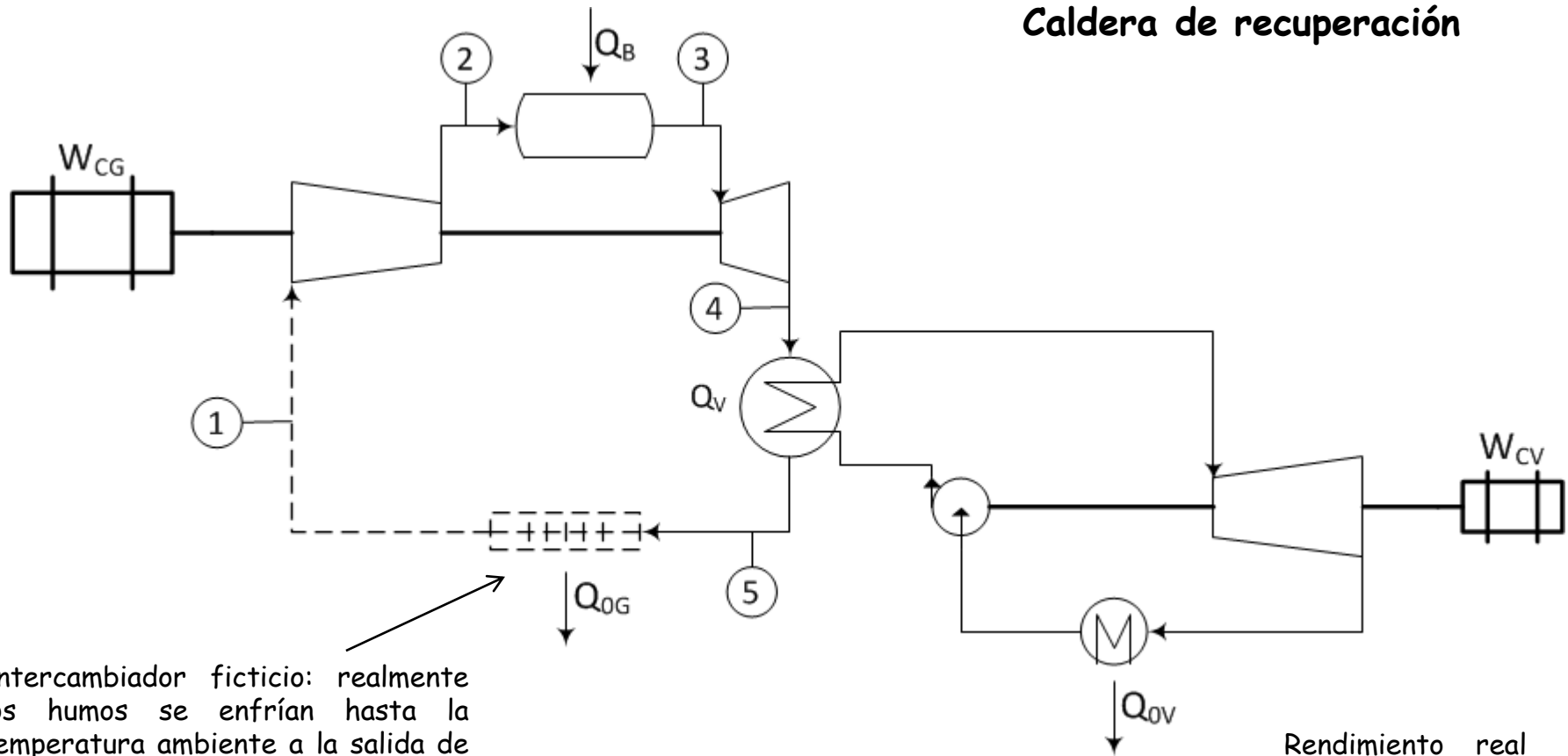
6.4. CICLO COMBINADO

- Integración del ciclo de gas para alta temperatura con el de vapor para baja
- Favorecen las estrategias medioambientales de control de emisiones

Esquema básico



Caldera de recuperación



Intercambiador ficticio: realmente los humos se enfrían hasta la temperatura ambiente a la salida de la caldera de recuperación

La eficiencia de la caldera de recuperación compara el calor recuperado con el disponible a la salida de la turbina de gas, respecto al ambiente:

$$\eta_{CR} = \frac{Q_V}{Q_V + Q_{0G}} = \frac{Q_V}{Q_{41}}$$

Rendimiento real del CV

$$\eta_{CV} = \frac{W_{CV}}{Q_V}$$

Rendimiento del CV si se recuperase todo el calor disponible a la salida de la TG

$$\eta'_{CV} = \frac{W_{CV}}{Q_{41}} = \eta_{CV} \cdot \eta_{CR}$$

Expresiones de la eficiencia

El ciclo de vapor amplifica la eficiencia del ciclo de gas. En un ciclo combinado típico (no repowering): $\times 1,5$

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} \cdot \left(1 + \frac{W_{CV}}{W_{CG}} \right)$$

La eficiencia de la caldera de recuperación limita el máximo rendimiento alcanzable (el que habría si el gas saliese de la caldera de recuperación a la temperatura de entrada al compresor, es decir, si $Q_{0G} = 0$)

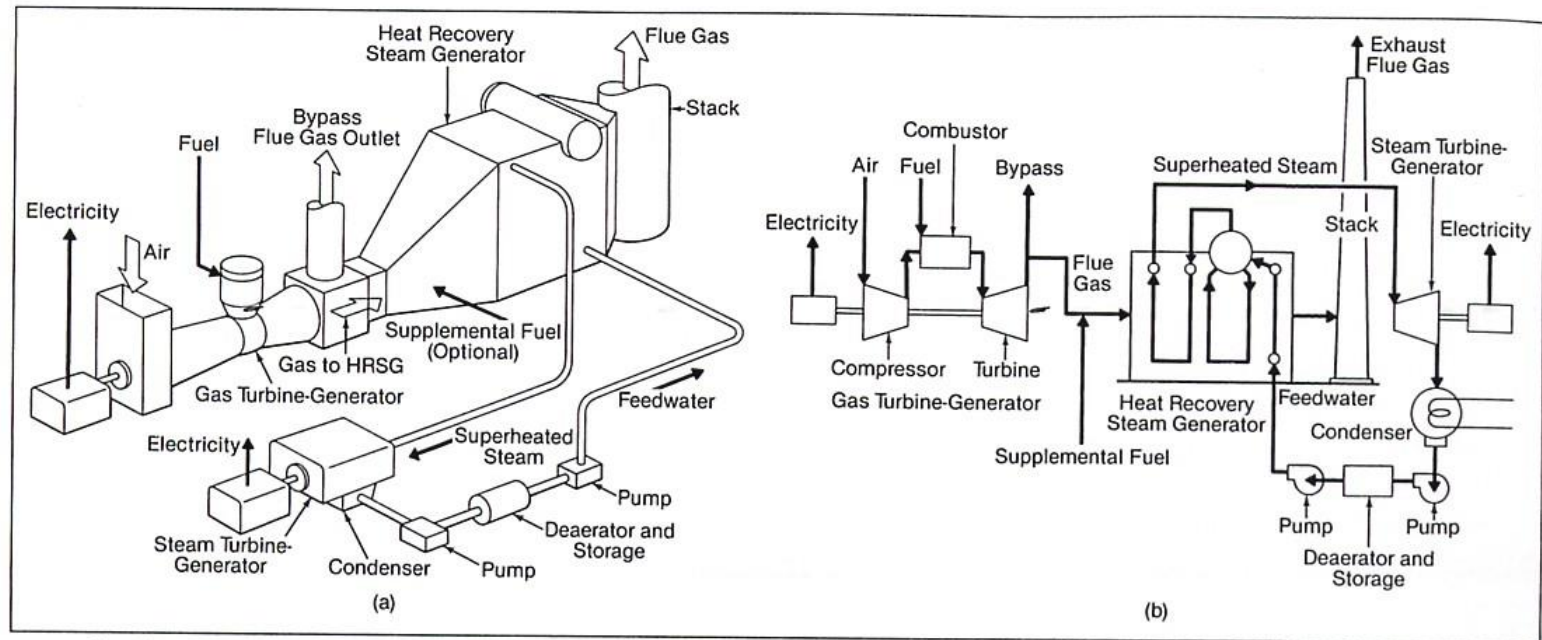
$$\eta_{CC}^{\text{máxrec}} = \eta_{CG} + \eta_{CV} - \eta_{CG} \cdot \eta_{CV}$$

- El rendimiento del ciclo de gas influye más sobre el CC
- No se debe realizar regeneración en ciclo de vapor:
 - aumenta el rendimiento del ciclo de vapor
 - reduce el de la caldera de recuperación

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} + \eta_{CV} \cdot (1 - \eta_{CG}) \cdot \eta_{CR}$$

$$\eta_{CC} = \eta_{CG} + \eta'_{CV} - \eta_{CG} \cdot \eta'_{CV}$$

- El rendimiento del ciclo combinado supera al de cada ciclo por separado
- La conexión entre ambos ciclos es la caldera de recuperación



Simplified combined cycle system schematics.

[Babcock, Wilcox, STEAM. Its generation and use, Babcock & Wilcox Company, Barberton (Ohio), 1992]