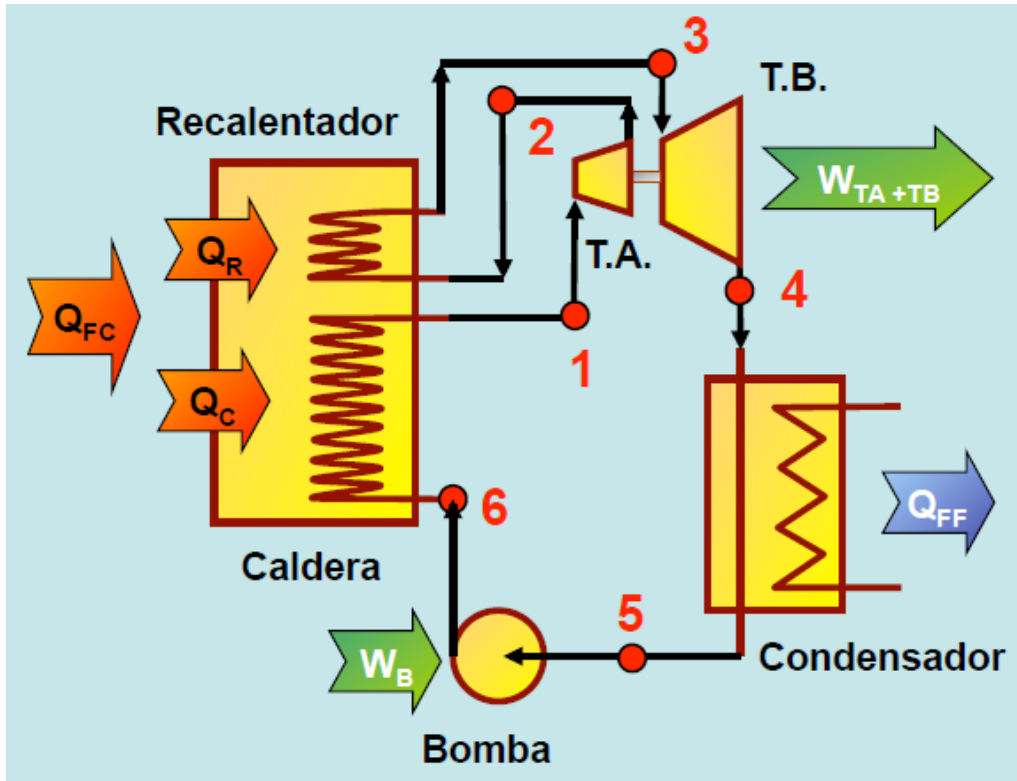


# Turbinas de Vapor: Clasificación de las turbinas de vapor

- Según el número de etapas o escalonamientos:
  - Turbinas monoetapa, son turbinas que se utilizan para pequeñas y medianas potencias.
  - Turbinas multietapa, aquellas en las que la demanda de potencia es muy elevada, y además interesa que el rendimiento sea muy alto.
- Según la presión del vapor de salida:
  - Contrapresión, en ellas el vapor de escape es utilizado posteriormente en el proceso.
  - Escape libre, el vapor de escape va hacia la atmósfera. Este tipo de turbinas no utiliza toda la energía pues no se aprovecha el vapor de escape en otros procesos como calentamiento, etc.
  - Condensación, en las turbinas de condensación el vapor de escape es condensado con agua de refrigeración. Son turbinas de gran rendimiento y se emplean en máquinas de gran potencia.
- Según la forma en que se realiza la transformación de energía térmica en energía mecánica:
  - Turbinas de acción, en las cuales la transformación se realiza en los álabes fijos.
  - Turbinas de reacción, en ellas dicha transformación se realiza a la vez en los álabes fijos y en los álabes móviles.
- Según la dirección del flujo en el rodete.
  - Axiales, el paso de vapor se realiza siguiendo un con que tiene el mismo eje que la turbina. Es el caso más normal.
  - Radiales, el paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina.
- Turbinas con y sin extracción.
  - En las turbinas con extracción se extrae una corriente de vapor de la turbina antes de llegar al escape.

<https://www.youtube.com/watch?v=M2bjwjgWHEs>

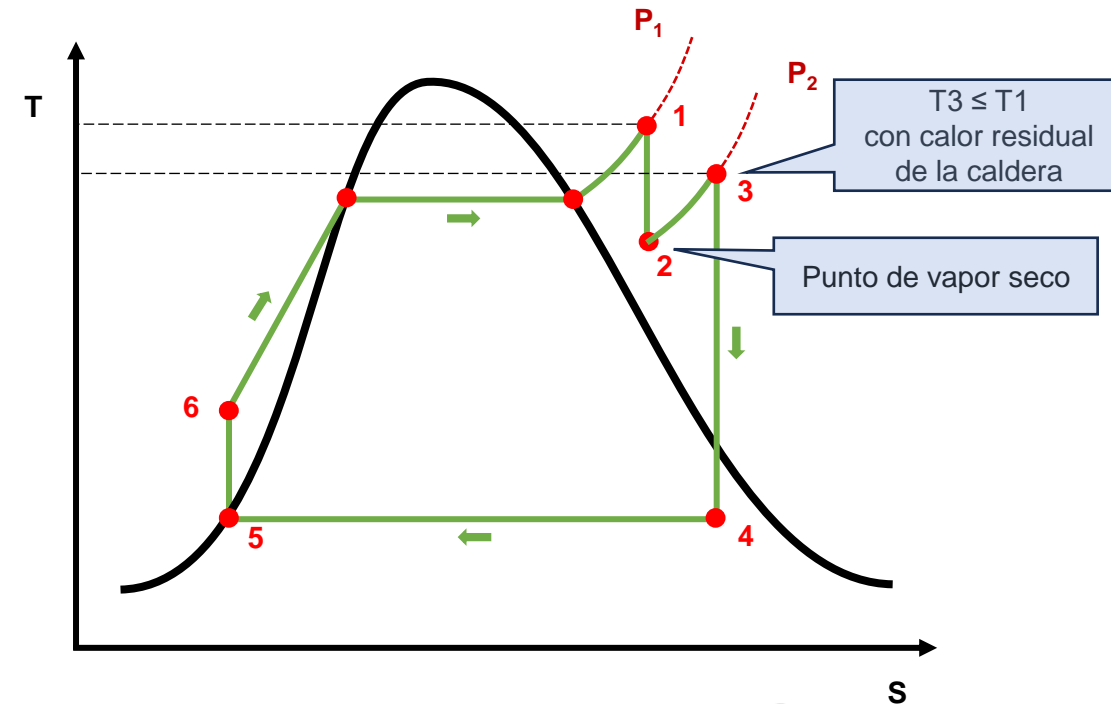
# CICLO RANKINE. REAL. CON RECALENTAMIENTO



$\uparrow W$ , pero no  $\eta$ , ya que también  $\uparrow Q_{FC}$

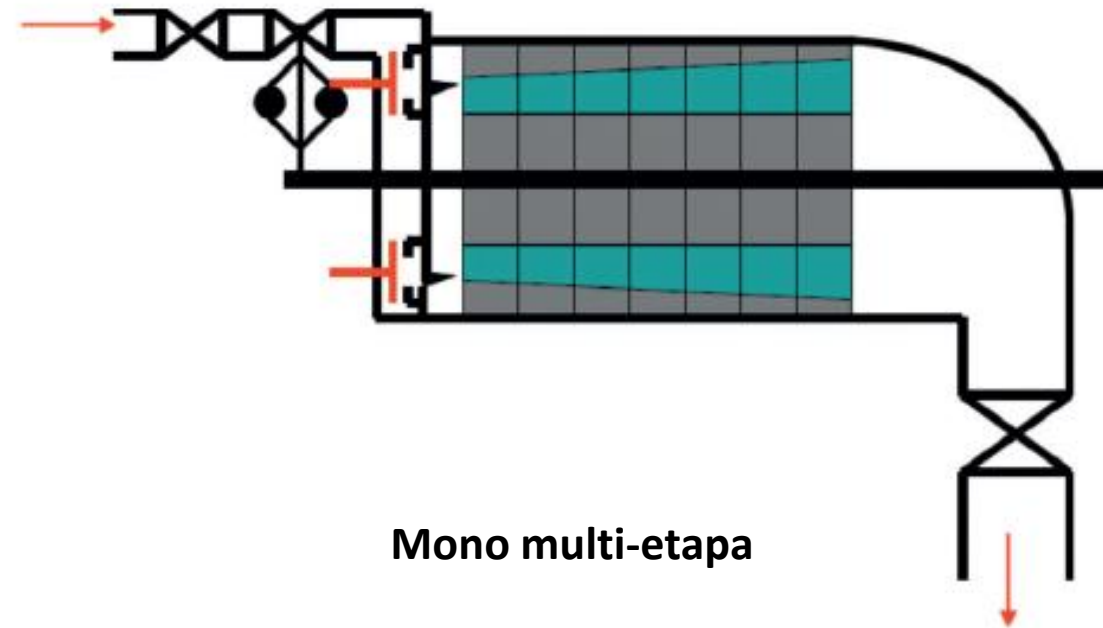
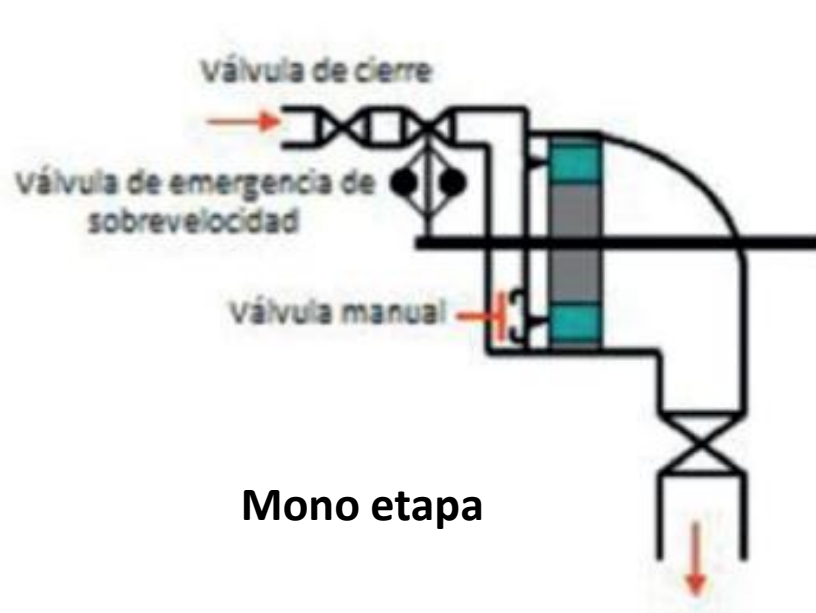
$$\eta_{Rankine\ Recal} \approx \frac{W_{TA} + W_{TB}}{Q_{Cald+Rec}}$$

$$\approx \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

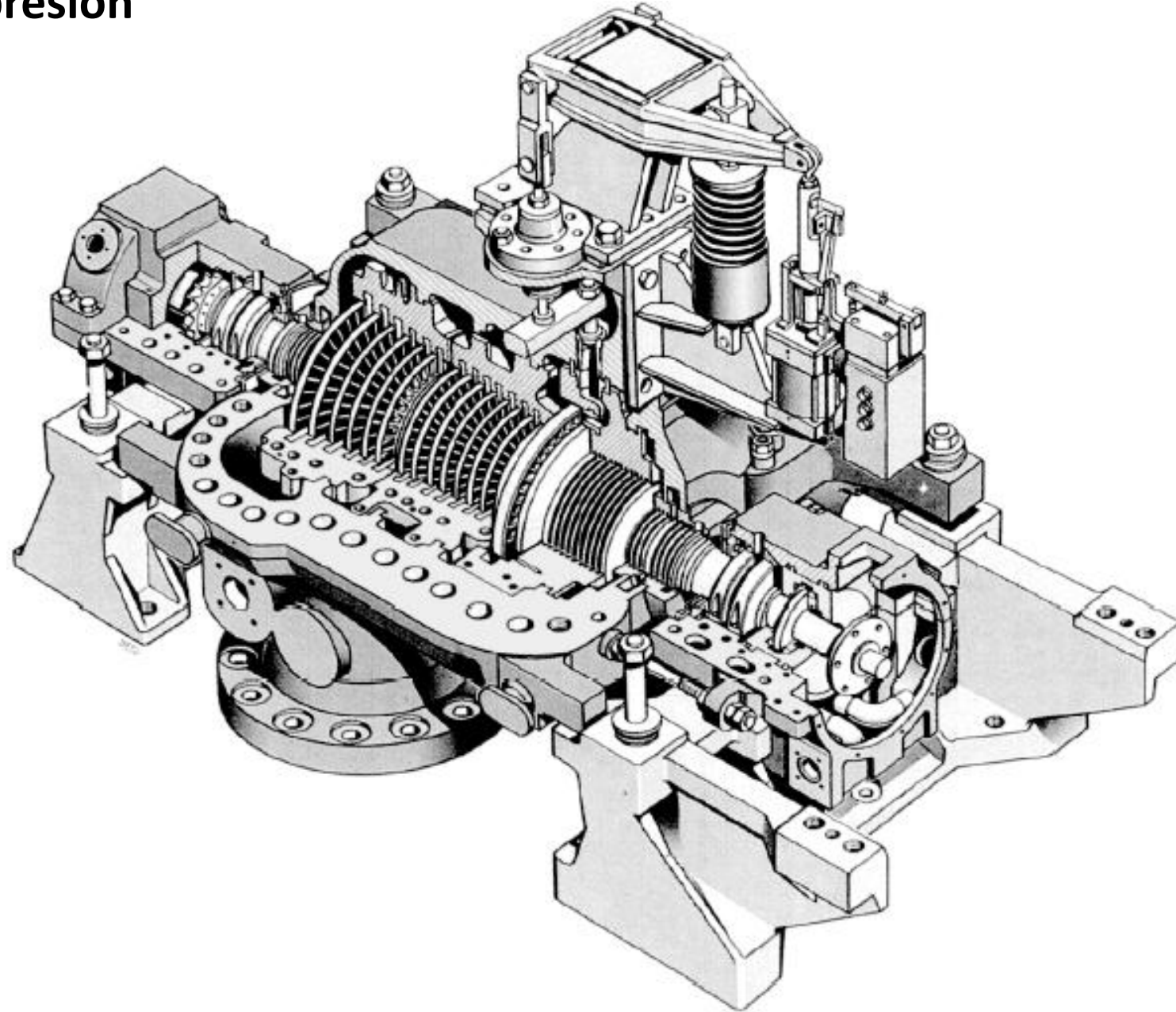


## Turbinas a contrapresión

Estas turbinas expanden vapor que llega a un nivel de presión mayor a la atmosférica y entrega el escape de vapor a otro nivel de presión, menor al de ingreso pero también por encima de la atmosférica. Normalmente son utilizadas en estaciones de reducciones de presión, dispuestas en paralelo entre dos niveles de presión. Las turbinas de contrapresión pueden ser de una etapa o multietapas, siendo las segundas más eficientes.

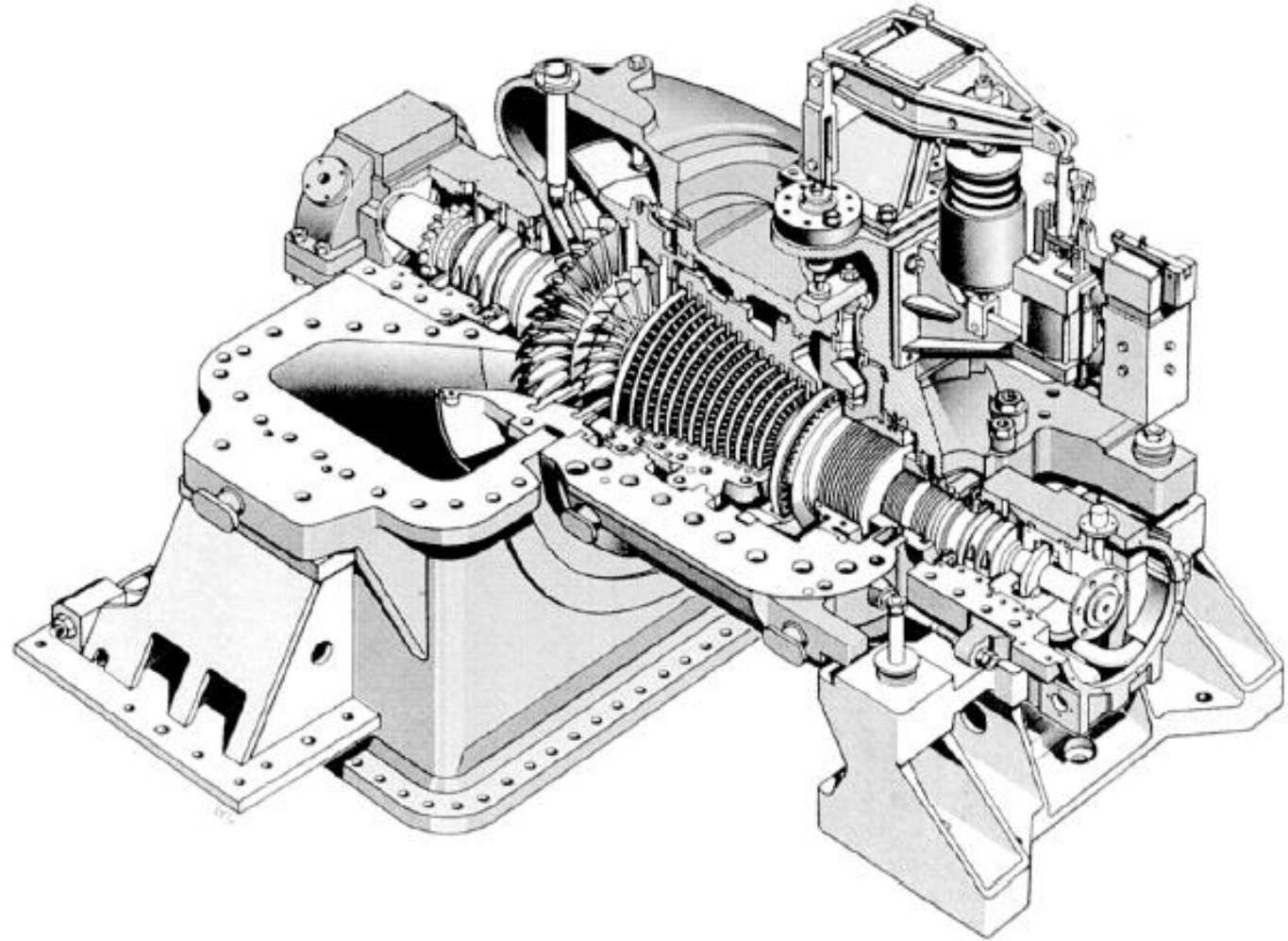
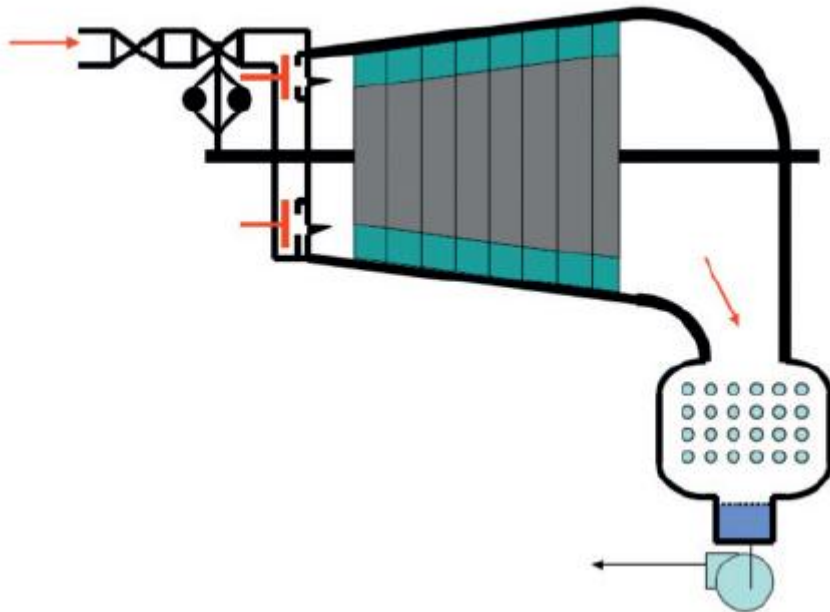


# Turbinas a contrapresión



## Turbinas a condensación total

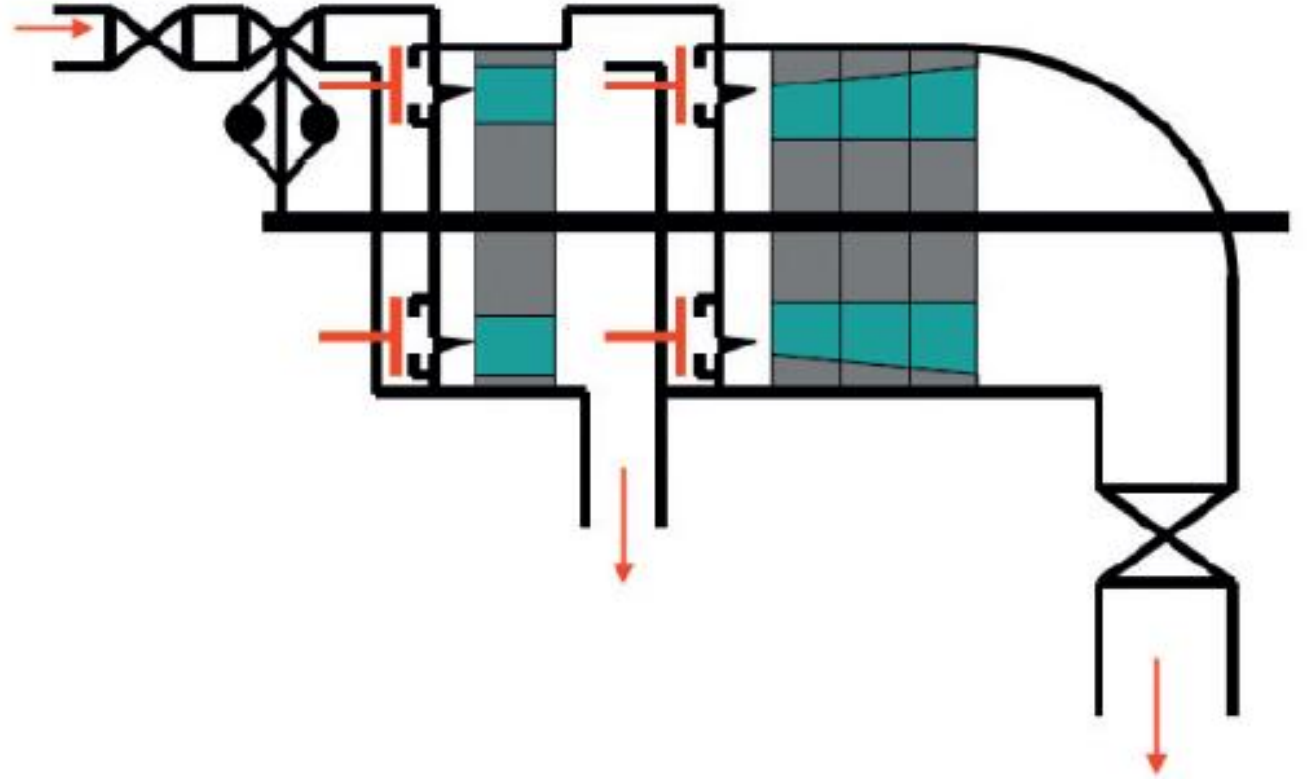
Las turbinas de condensación no brindan vapor a una presión intermedia, sino que descargan vapor por debajo de la presión atmosférica hacia un condensador de superficie. Son poco eficientes debido a que emulan los primeros ciclos termoeléctricos, que ronda el 30%. Las turbinas de condensación son unidades grandes que se usan principalmente para generar energía mecánica o para impulsar equipos mecánicos grandes, como enfriadores centrífugos, compresores de proceso o de aire, etc.



## Turbinas a extracción

Las turbinas de vapor de extracción a contrapresión se pueden concebir como varias turbinas que operan en un mismo eje, poseen una salida de vapor a presión intermedia entre la entrada y el escape de vapor. El vapor es liberado en diversas etapas y aprovechado en distintos procesos industriales.

El trabajo mecánico más barato es el obtenido a través de una turbina a contrapresión, siempre y cuando el vapor que sale de la turbina no se ventee, caso contrario es mejor emplear una turbina de extracción.



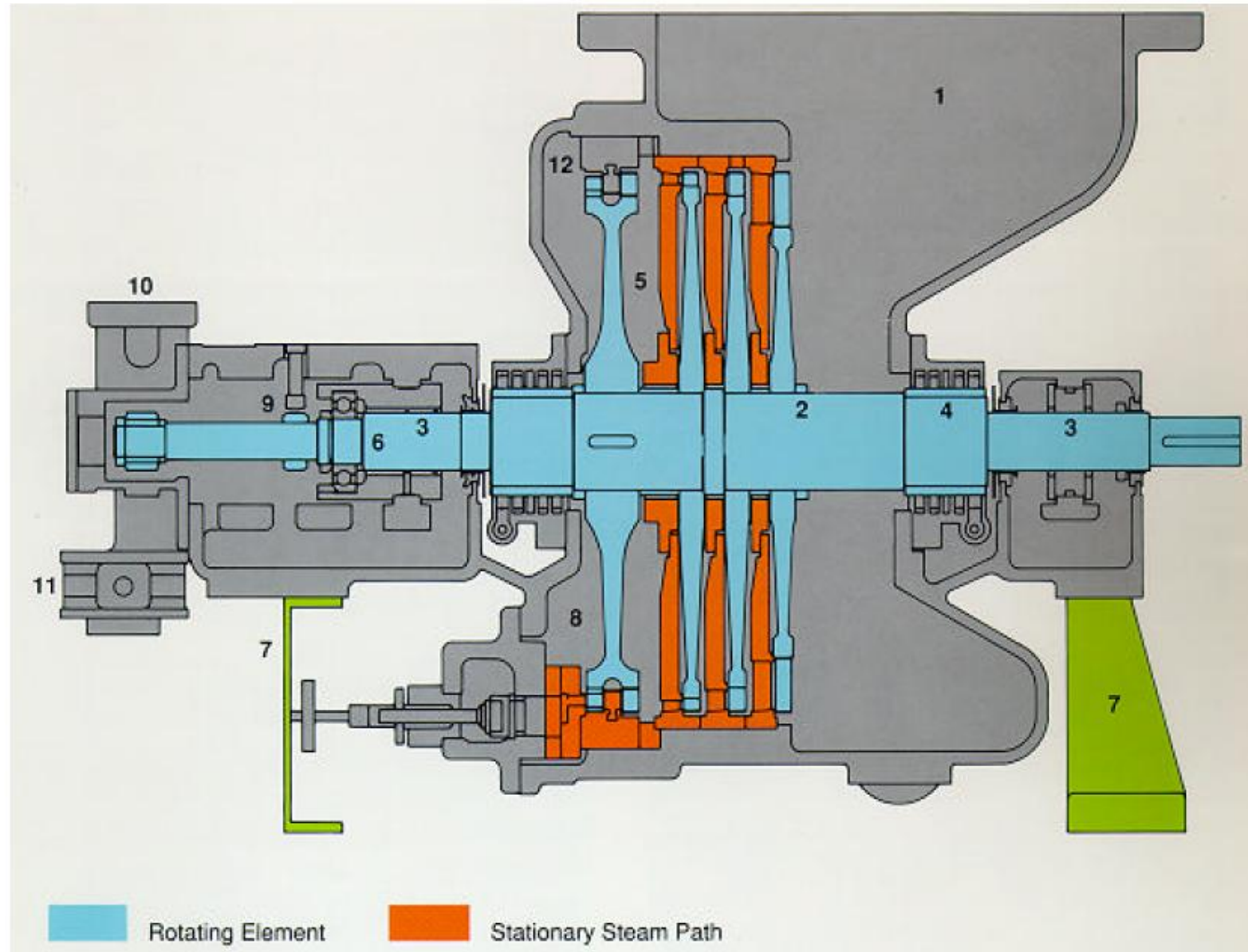


# Partes constitutivas de las turbinas de vapor

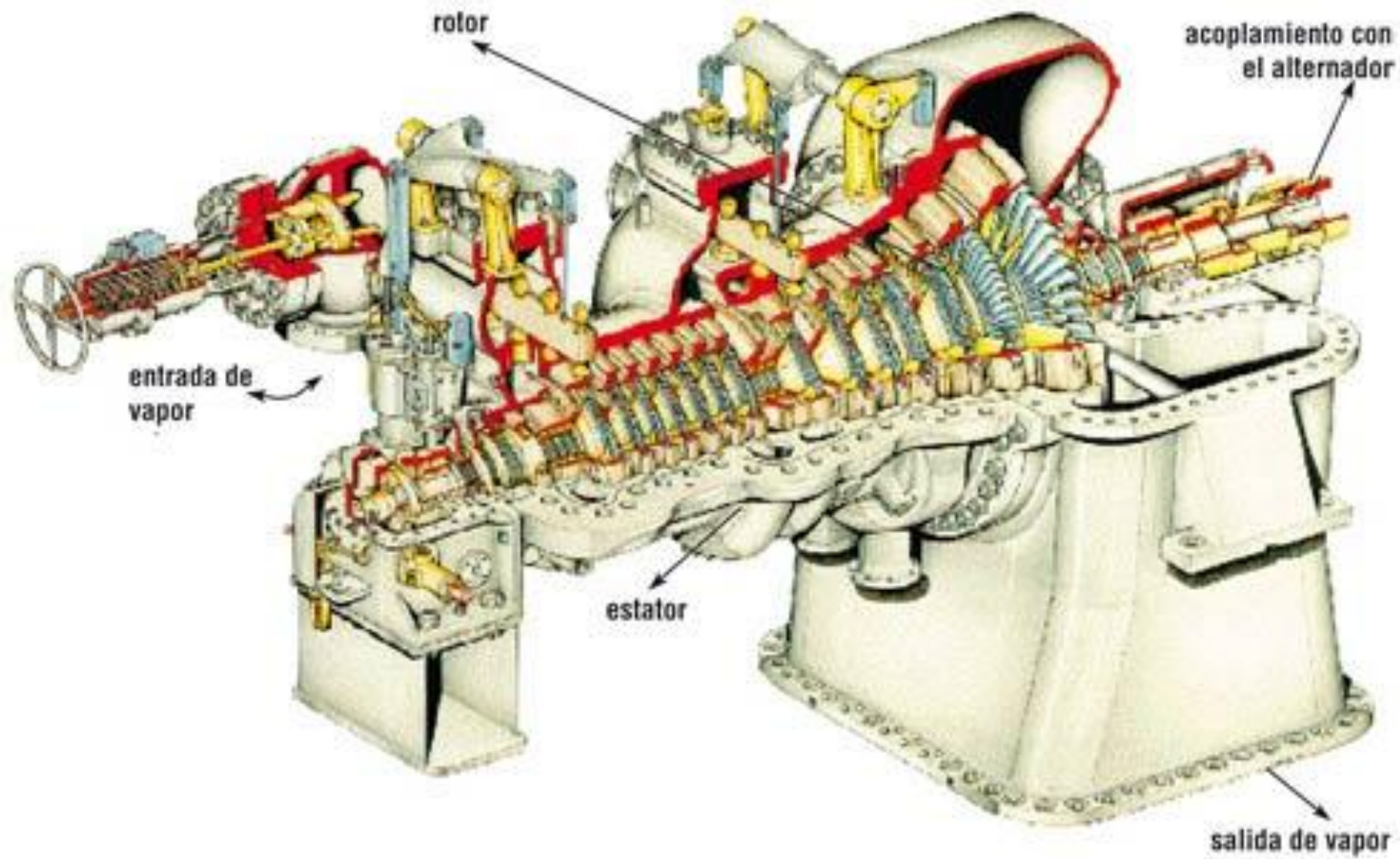
- Rotor, es la parte móvil de la turbina.
- Estator o carcasa, parte fija que aloja el rotor y sirve de armazón y sustentación a la turbina.
- Álabes, órganos de la turbina donde tiene lugar la expansión del vapor.
- Álabes fijos, van ensamblados en los diagramas que forman parte del estator. Sirven para darle la dirección adecuada al vapor y que empuje sobre los álabes móviles.
- Diafragmas, son discos que van dispuestos en el interior de la carcasa perpendicularmente al eje y que llevan en su periferia los álabes fijos.
- Cojinetes, son los elementos que soportan los esfuerzos y el peso del eje de la turbina. Los cojinetes pueden ser radiales, que son aquellos que soportan los esfuerzos verticales y el peso del eje, o axiales, soportan el esfuerzo en la dirección longitudinal del eje.
- Sistemas de estanqueidad, son aquellos sistemas de cierre situados a ambos extremos del eje de la turbina que evitan que escape el vapor de la turbina.
  - Sellados del rotor, son elementos mecánicos que evitan que escape vapor de la turbina al exterior, por los lados del eje en las carcasas de alta y de media presión y además evitan la entrada de aire en las carcasas de baja presión. Pueden ser de metal o de grafito. Normalmente en las máquinas de gran potencia los cierres son metálico.
  - Regulación del sistema de sellado en una turbina de condensación.
- Estanqueidad interior, son los mecanismos que evitan la fuga de vapor entre los álabes móviles y fijos en las etapas sucesivas de la turbina.

# Partes constitutivas de las turbinas de vapor

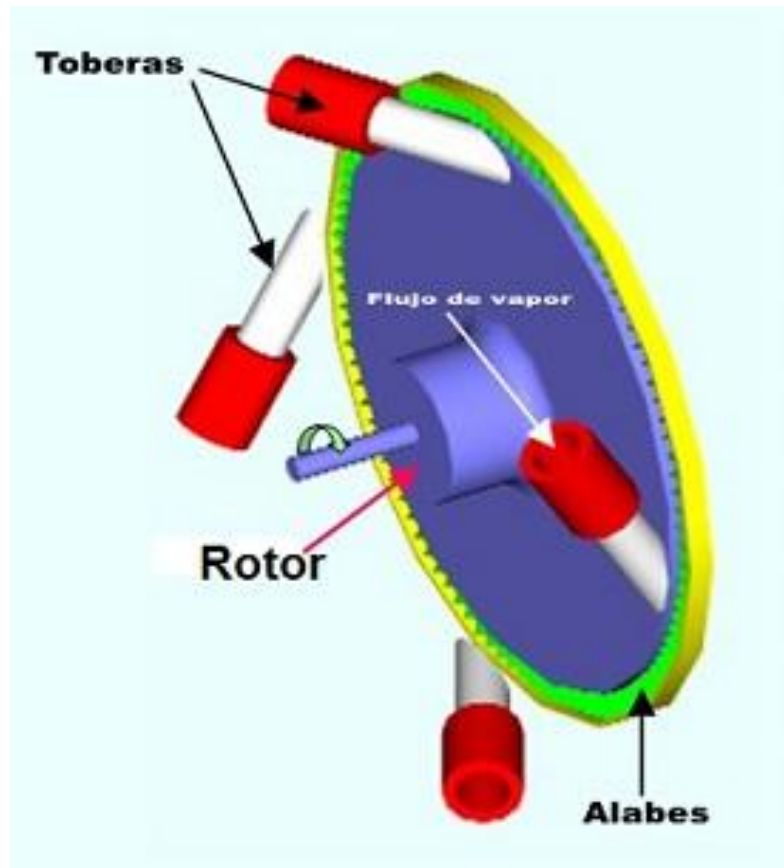
1. **Carcasa:** acero, hierro fundido/hierro maleable.
2. **Rotor:** diseño de eje rígido o flexible.
3. **Cojinete liso** - Rodamientos con una carcasa de acero. con bajo contenido de carbono y un bi/trimetal.
4. **Empaquetadura** –Tipo Laberinto o anillo de carbono.
5. **Diafragmas** - Hierro fundido/hierro maleable.
6. **Cojinete de empuje:** tipo almohadilla basculante o bola.
7. **Soportes:** permite la expansión térmica.
8. **Boca de boquilla** - CS, SS, DI, FS/jets.
9. **Sistema de disparo** - Cierre positivo (mostrado parcialmente).
10. **Control de velocidad:** (no se muestra).  
Gobernador NEMA Clase D
11. **Lubricación:** bomba de aceite accionada por eje.
12. **Anillo de resistencia al soplado**



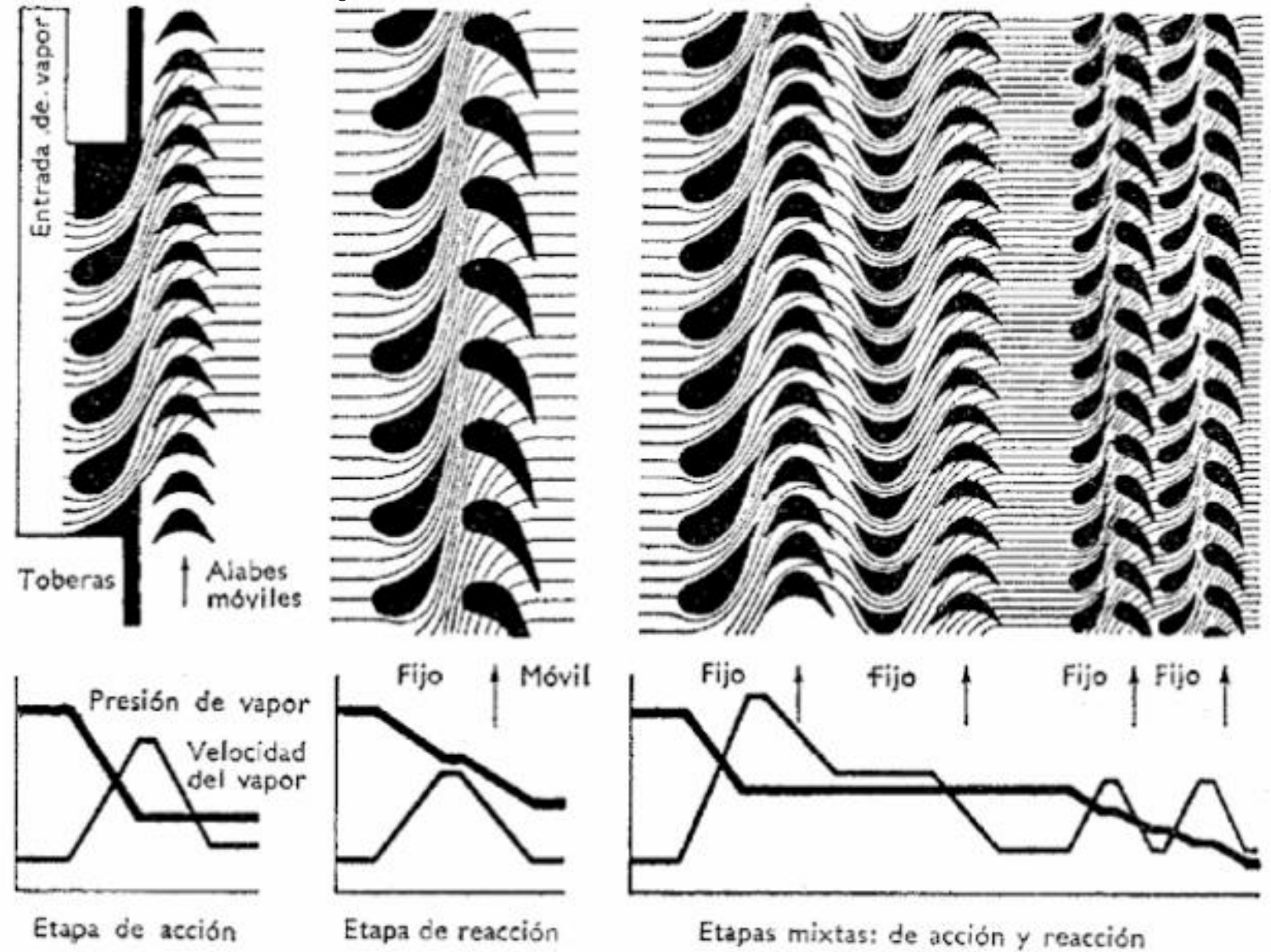




# Principio de funcionamiento de las turbinas de vapor



**Acción: álabes móviles.**  
**Reacción: álabes fijos**



# Métodos de regulación del funcionamiento de la turbina de vapor

## Regulación por estrangulación o laminación

- Turbinas de gran potencia. En ellas, las válvulas de parada y de regulación son independientes entre sí.
- Regulación por variación del grado de admisión o del número de toberas de entrada.

## Regulación de velocidad en una turbina de extracción y condensación.

- **Aumento de potencia sin modificar el caudal de extracción.** Cualquier aumento o disminución de potencia demandada por la turbina se traduce en un aumento o disminución del caudal que pasa a través de ella cumpliéndose en cada caso que el caudal que aumenta o disminuye a través de las válvulas de entrada de vapor del cuerpo de alta es el mismo que aumenta o disminuye a través de las válvulas del cuerpo de baja, permaneciendo constante el caudal de extracción.
- **Aumento del caudal de extracción permaneciendo constante la potencia de la turbina.** Cualquier aumento del caudal de extracción demandado por el proceso se traduce por un aumento del caudal a través de las válvulas del cuerpo de alta y una disminución del caudal a través de las válvulas del cuerpo de baja, cumpliéndose en cada caso que el aumento de potencia que da el cuerpo de alta presión es compensado por una disminución de potencia en el cuerpo de baja presión, permaneciendo constante la potencia total de la turbina.

# Gobierno de la turbina de vapor

La regulación de la turbina de vapor es el procedimiento de controlar el caudal de vapor a una turbina de vapor para mantener la velocidad de la turbina constante, independientemente de la carga variable en la turbina.

La variación en la carga (potencia de salida) durante el funcionamiento de una turbina de vapor puede tener un impacto significativo en su rendimiento y su eficiencia.

## Métodos de gobierno

**Acelerar el gobierno:** el objetivo principal de las válvulas de control es reducir el caudal de vapor. Para reducir la tasa de flujo másico, el vapor experimenta una caída de presión creciente a través de la válvula de control.

**Gobierno de la tobera:** en el control de la tobera, el suministro de vapor desde la válvula principal se divide en dos, tres o más líneas. El caudal de vapor se regula abriendo y cerrando conjuntos de toberas en lugar de regular su presión. Dado que no se aplica ninguna regulación a la presión, la ventaja de este método radica en el aprovechamiento de la presión y la temperatura de la caldera.

**Control bypass:** el control bypass de la turbina de vapor es un método en el que se proporciona una línea de derivación para el vapor. Esto se usa especialmente cuando la turbina está funcionando en condiciones de sobrecarga. La línea de derivación se proporciona para pasar el vapor de la caja de toberas de la primera etapa a una etapa posterior donde aumenta la producción de trabajo.



## Dispositivos de seguridad en las turbinas de vapor.

Son mecanismos que protegen a la turbina contra anomalías propias de la máquina, del proceso o bien de la máquina arrastrada por la turbina.

- Ejemplos de disparo en turbinas de contrapresión.
  - *Disparo por sobrevelocidad.* Evita el sobregiro de la turbina al faltarle la carga que arrastra.
  - *Disparo por baja presión de aceite de lubricación.* Protege a la máquina para evitar el roce entre el eje y el estator.
  - *Disparo manual de emergencia.* Para que el operador pueda parar a voluntad la máquina ante cualquier anomalía, como pueden ser vibraciones o ruidos anormales, fuga de aceite al exterior, etc.
- Ejemplos de disparo en turbinas de gran potencia (condensación).
  - *Dispositivo de disparo de aceite del cierre rápido.* Dispositivo mecánico sobre el que actúan diferentes disparos mecánicos de la turbina.
    - *Sobrevelocidad.*
    - *Disparo manual de la turbina.*
    - *Disparo por desplazamiento axial.*
      - *Dispositivo de disparo por falta de vacío.* Dispositivo mecánico que dispara la máquina al subir la presión de escape de vapor en el condensador.
      - *Dispositivo de disparo a distancia mediante válvula electromagnética.* De este dispositivo de disparo cuelgan todas aquellas seguridades de la máquina, del proceso o de la máquina arrastrada. A la válvula electromagnética le llega una señal eléctrica que energiza una válvula solenoide que enviara al tanque el aceite del cierre rápido cerrando las válvulas de parada y de regulación de vapor de la turbina.





## Dispositivos de seguridad en las turbinas de vapor.

*Dispositivo de disparo a distancia mediante válvula electromagnética.* Entre los disparos mencionados que afectan a este dispositivo están:

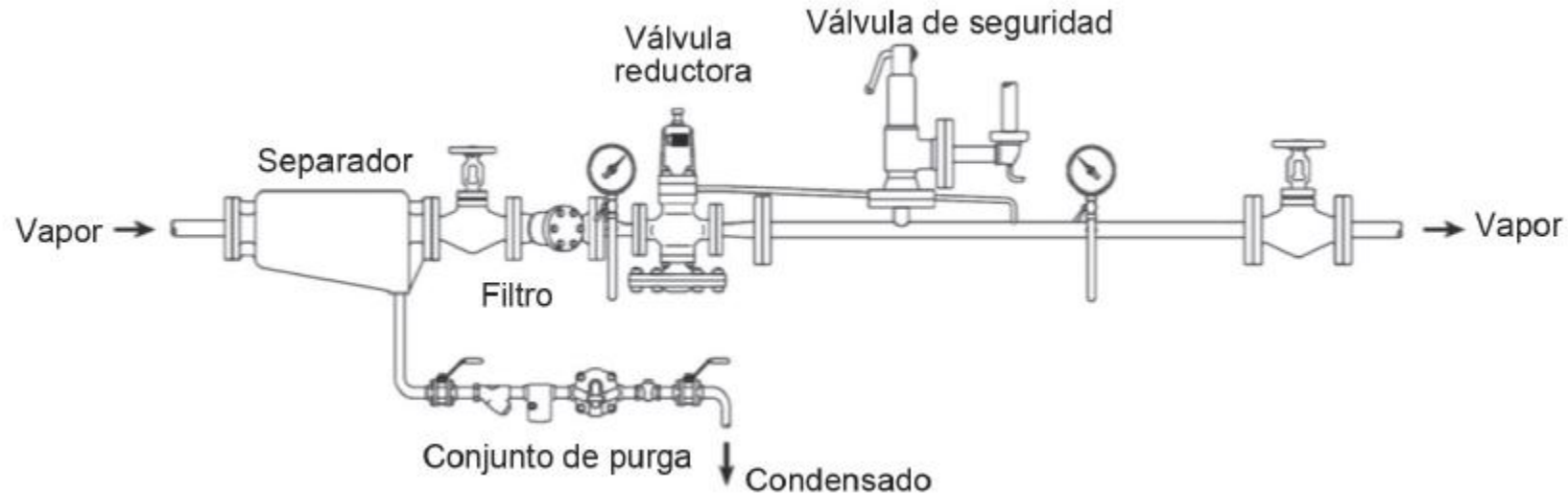
1. Paros manuales a distancia desde el panel principal y local.
2. Baja presión de aceite de lubricación.
3. Baja temperatura del vapor de entrada a la turbina.
4. Baja presión del vapor de ingreso a la turbina.
5. Disparo por alto valor de vibraciones y de desplazamiento axial.
6. Disparos de la máquina arrastrada que también paran la turbina.
7. Disparo por bajo nivel de aceite de sello a los cierres del compresor.
8. Disparo por altos niveles de líquido en los depósitos de aspiración del compresor.

Otros dispositivos de seguridad en las turbinas.

- Válvula de seguridad del condensador.
- Válvulas de seguridad de la línea de extracción.

# Laminadoras o válvulas de reducción de presión

El método más común de reducir la presión es la utilización de una estación reductora de presión



Previo a la válvula reductora laminadora se instala un separador para eliminar el agua que arrastra el flujo de vapor. La válvula de seguridad actúa en caso de que la válvula reductora falle, cualquier exceso de presión que ocurra aguas abajo se descarga a través de esta, impidiendo daños en el equipo y accidentes.

Elementos que constituyen una estación reductora de laminación:

1. válvula de aislamiento: para cerrar el sistema y poder realizar tareas de mantenimiento
2. primer manómetro: para ver la presión de alimentación
3. filtro: para mantener limpio el sistema
4. segundo manómetro: para ajustar y ver la presión aguas abajo
5. segunda válvula de aislamiento – para establecer la presión aguas abajo en condiciones sin carga.



## Turbinas vs válvulas de laminación

Por la diversidad de procesos existentes puede ser necesario que una red de vapor deba suplir demandas a diferentes niveles de presión. Por esto, para operar se debe pasar de niveles de presión alta a niveles de media y/o baja presión. Esta reducción de presión puede lograrse mediante el empleo de válvulas o turbinas.

Dentro del ámbito de la eficiencia energética, al emplear turbinas, se genera trabajo mecánico a partir del salto de presión, en cambio, al emplear válvulas laminadoras, si bien se conserva la entalpía del fluido el salto de presión no es aprovechado.

Por esto, se recomienda maximizar el uso de turbinas de vapor en lugar de válvulas laminadoras para la reducción de presiones, siempre que la instalación y el proceso lo permitan.

# PROBLEMA: TURBINA DE VAPOR

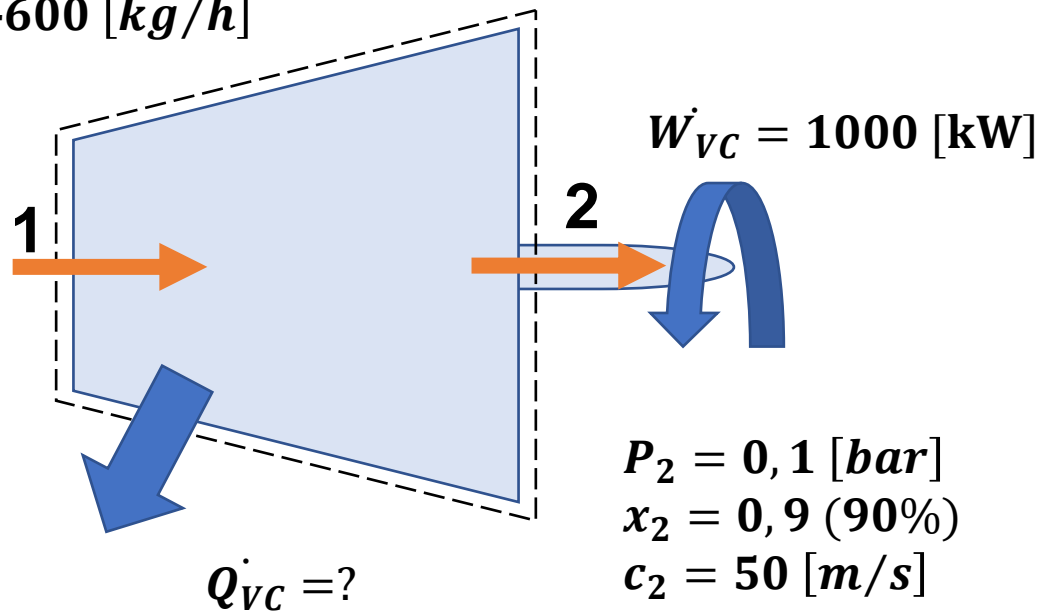
Un flujo másico de 4600 [kg/h] entra en una turbina que opera en situación estacionaria. La turbina desarrolla una potencia de 1000 [kW]. En la entrada la  $P$  es de 60 [bar], la  $T$  es de 400 [°C] y la velocidad de 10 [m/s].

A la salida la presión es de 0,1 [bar], el título 0,9 (90%) y la velocidad 50 [m/s].

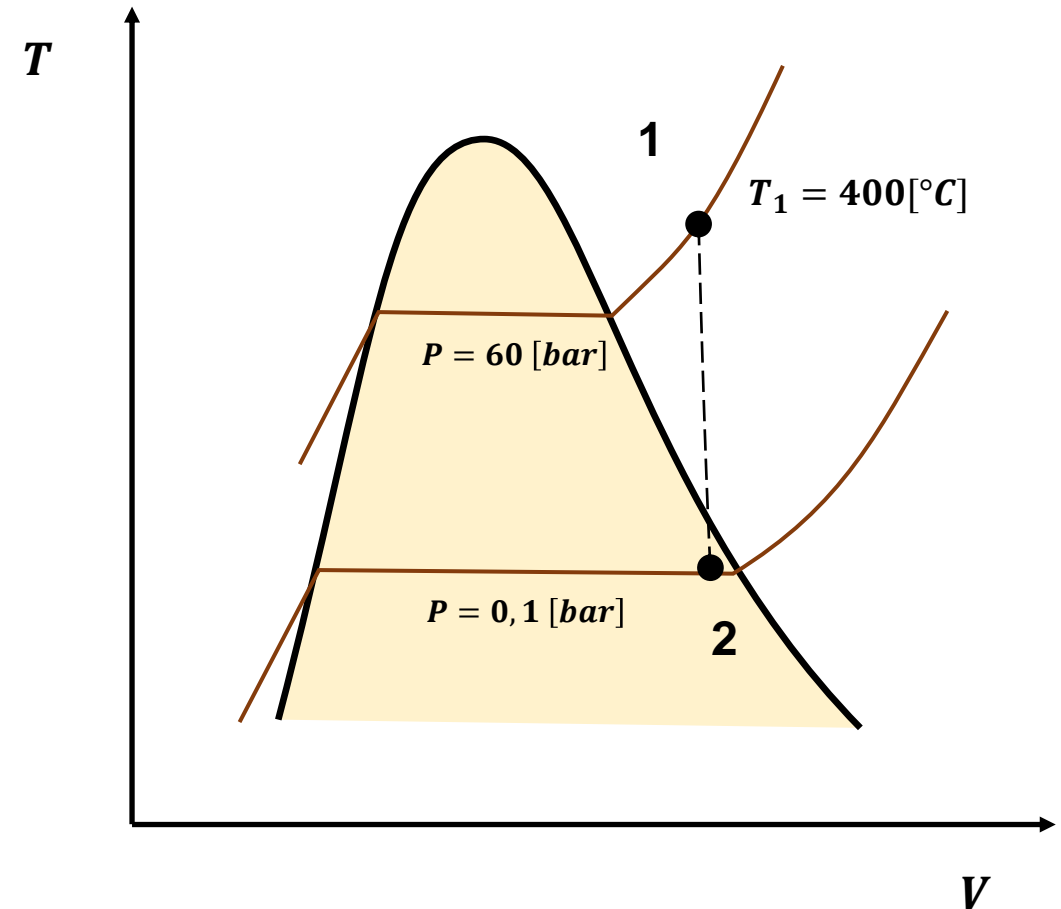
Calcular la transferencia de calor entre la turbina y su entorno, en [kW].

# PROBLEMA:

$$\begin{aligned}P_1 &= 60 \text{ [bar]} \\T_1 &= 400 \text{ [}^\circ\text{C]} \\c_1 &= 10 \text{ [m/s]} \\\dot{m}_1 &= 4600 \text{ [kg/h]}\end{aligned}$$



*Cómo es el recorrido?*





# PROBLEMA:

## Paso 1. Conocido

- Turbina de vapor, que funciona en situación estacionaria.
- Se conoce el flujo másico, la potencia, los estados termodinámicos a la entrada y a la salida

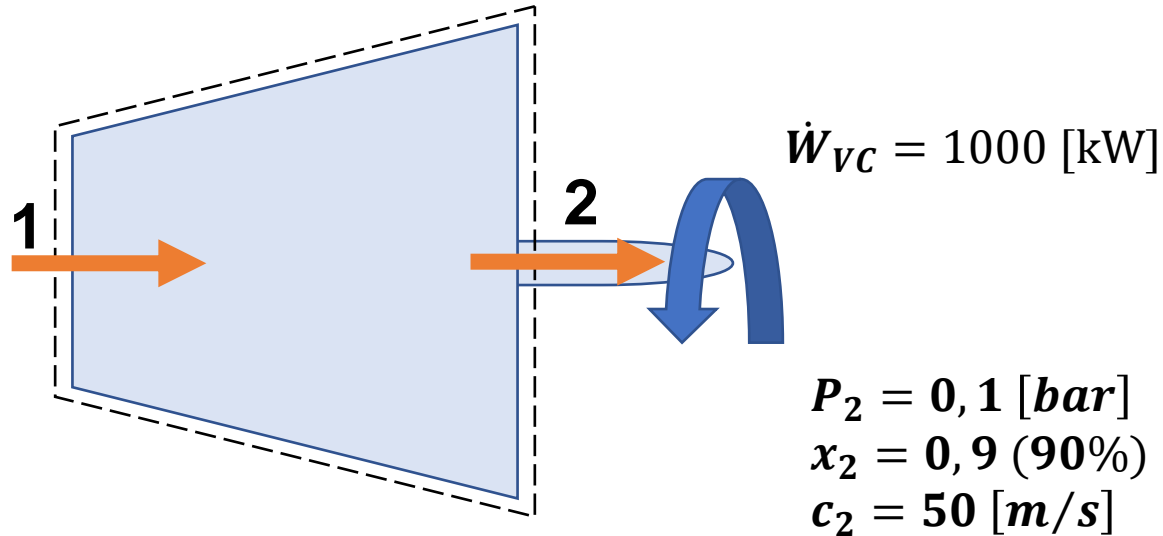
## Paso 2. Hallar

**$\dot{Q} = ?$  [kW] Transferencia de calor por unidad de tiempo**

# PROBLEMA:

## Paso 3. Datos conocidos y diagramas

$$\begin{aligned}P_1 &= 60 \text{ [bar]} \\T_1 &= 400 \text{ [}^\circ\text{C]} \\c_1 &= 10 \text{ [m/s]} \\\dot{m}_1 &= 4600 \text{ [kg/h]}\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}P_2 &= 0,1 \text{ [bar]} \\x_2 &= 0,9 \text{ (90\%)} \\c_2 &= 50 \text{ [m/s]}\end{aligned}$$

# PROBLEMA:

## Paso 4. Consideraciones e hipótesis

- Volumen de control en estado estacionario.
- Puede despreciarse la variación de energía potencial entre la entrada y la salida.

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

TABLA A-4 (Continuación)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 40 \text{ bar} = 4.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 250.4^\circ\text{C}$ )					$p = 60 \text{ bar} = 6.0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 275.64^\circ\text{C}$ )			
Sat.	0.04978	2602.3	2801.4	6.0701	0.03244	2589.7	2784.3	5.8892
280	0.05546	2680.0	2901.8	6.2568	0.03317	2605.2	2804.2	5.9252
320	0.06199	2767.4	3015.4	6.4553	0.03876	2720.0	2952.6	6.1846
360	0.06788	2845.7	3117.2	6.6215	0.04331	2811.2	3071.1	6.3782
400	0.07341	2919.9	3213.6	6.7690	0.04739	2892.9	3177.2	6.5408
440	0.07872	2992.2	3307.1	6.9041	0.05122	2970.0	3277.3	6.6853
500	0.08643	3099.5	3445.3	7.0901	0.05665	3082.2	3422.2	6.8803
540	0.09145	3171.1	3536.9	7.2056	0.06015	3156.1	3517.0	6.9999
600	0.09885	3279.1	3674.4	7.3688	0.06525	3266.9	3658.4	7.1677
640	0.1037	3351.8	3766.6	7.4720	0.06859	3341.0	3752.6	7.2731
700	0.1110	3462.1	3905.9	7.6198	0.07352	3453.1	3894.1	7.4234
740	0.1157	3536.6	3999.6	7.7141	0.07677	3528.3	3989.2	7.5190

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

- Aplicando el balance de energía (al sistema).
  - $\dot{W} - \dot{Q} = \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1 \right) - \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2 \right)$
  - $\dot{W} - \dot{Q} = \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{c_1^2}{2} + \cancel{g z_1} \right) - \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{c_2^2}{2} + \cancel{g z_2} \right)$
  - $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \therefore \dot{m}$
  - $\dot{Q} = \dot{W} + \dot{m} \left[ (h_1 - h_2) + \left( \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} \right) \right]$
- De tablas de vapor: (ingresando con  $P_1$  y  $T_1$ )
  - $h_1 = 3177,2 \text{ [kJ/kg]}$



# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

TABLA A-3 Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K		Presión bar
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. $v_g$	Líquido sat. $u_f$	Vapor sat. $u_g$	Líquido sat. $h_f$	Vapori- zación $h_{fg}$	Vapor sat. $h_g$	Líquido sat. $s_f$	Vapor sat. $s_g$	
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746	0.04
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304	0.06
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2402.1	2577.0	0.5926	8.2287	0.08
0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502	0.10
0.20	60.06	1.0172	7.649	251.38	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.9085	0.20

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

- El estado 2, es una mezcla de líquido-vapor . De tablas de vapor saturado y con el título:  
 $x = 0,9$ 
  - $h_2 = h_1 + x (h_g - h_f) \quad (x: \text{título} = m_{\text{vapor}} / (m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}))$
  - $h_2 = h_1 + x (h_g - h_f) = 191,83 + 0,9 (2392,8) [kJ/kg]$
  - $h_2 = 2345,5 [kJ/kg]$
- Entonces
  - $h_2 - h_1 = 2345,5 - 3177,2 = -831,8 [kJ/kg]$

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

- Variación de energía cinética

- $\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = \frac{(50^2 - 10^2)}{2} \left( \frac{1}{1000} \right) = 1,2 \text{ [kJ/kg]}$

- Calculando  $\dot{Q}$

- $\dot{Q} = \dot{W} + \dot{m} \left[ (h_1 - h_2) + \left( \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} \right) \right]$
  - $\dot{Q} = 1000 \text{ [kW]} + 1,28 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] (-831,8 + 1,2) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
  - $\dot{Q} = 1000 \text{ [kW]} + 1,53 \text{ [kW]} - 1062,85 \text{ [kW]}$
  - $\dot{Q} = -61,3 \text{ [kW]}$

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

### Conclusión:

- La variación de energía cinética entre la entrada y la salida es mucho menor que la variación de la entalpía específica.
- El valor negativo de  $\dot{Q}$  indica que existe una transferencia de calor desde la turbina hacia el entorno.
- El  $\dot{Q}$  es pequeño comparado con la potencia desarrollada

# PROBLEMA: CONDENSADOR DE UNA PLANTA DE POTENCIA

Al condensador de una central térmica entra vapor de agua a 0,1 [bar] con un título  $x=0,95$  y el condensado sale a 0,1 [bar] y 45°C.

El agua de refrigeración entra al condensador como una corriente independiente a 20 °C y sale como líquido a 35 °C sin cambio en la presión.

El calor transferido al entorno del condensador y las variaciones de las energías cinéticas y potencial de las corrientes pueden despreciarse.

Para la operación en estado estacionario, determinar:

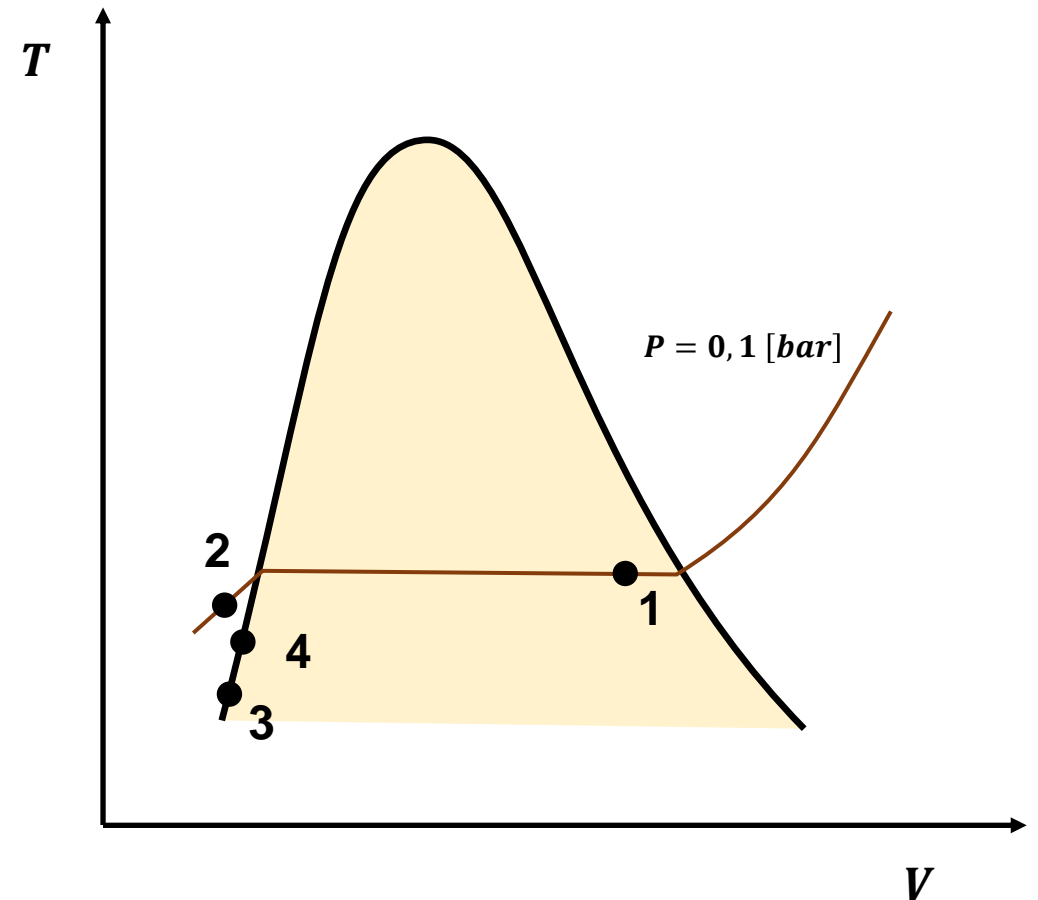
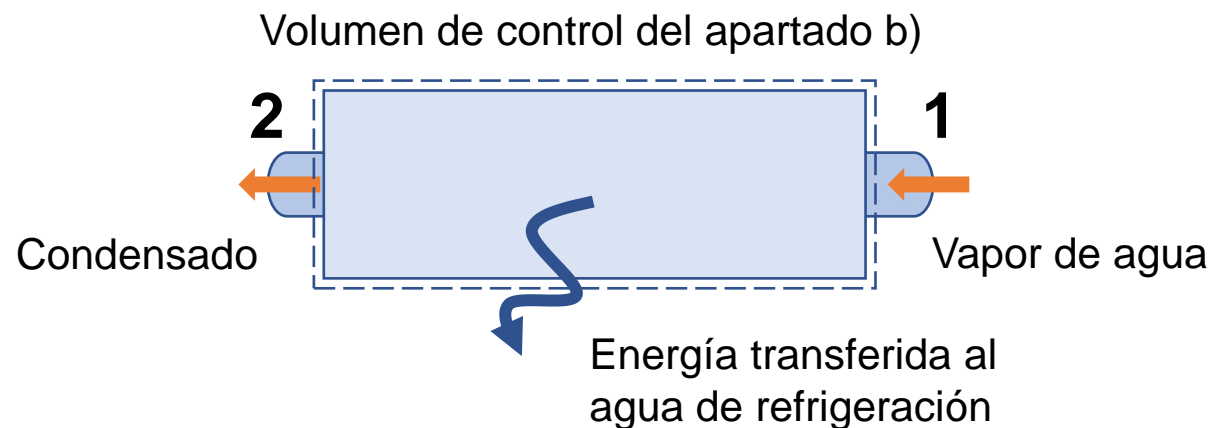
- a) Relación de caudal entre el agua y el vapor condensante.
- b) La velocidad de transferencia de energía desde el vapor condensante al agua de refrigeración, el [kJ/kg] de vapor que pasa por el condensador.



## PROBLEMA:



### Volumen de control del apartado a)



# PROBLEMA:

## Paso 1. Conocido

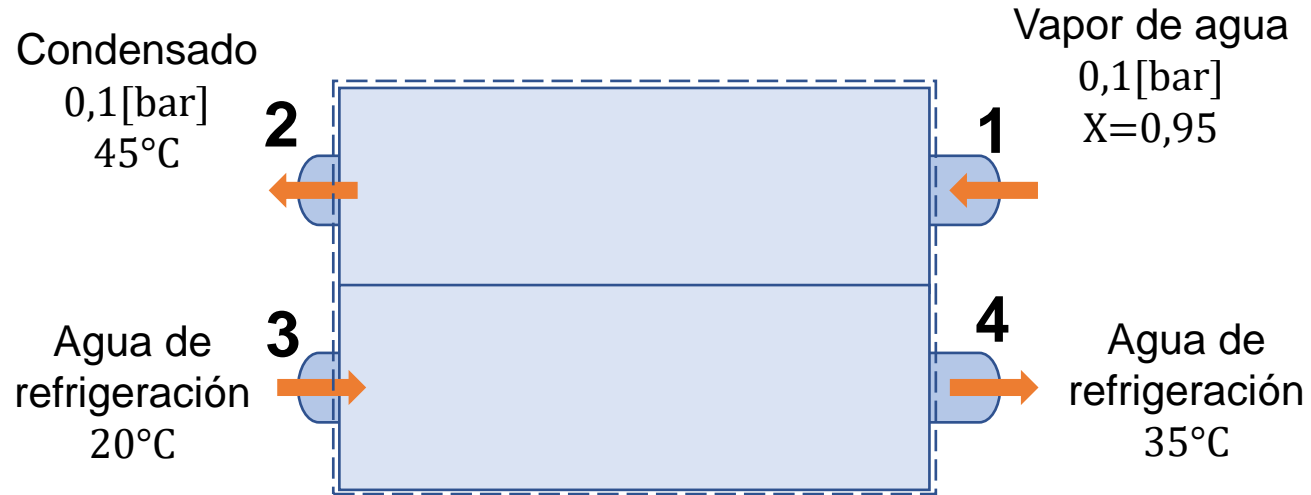
- Vapor condensa, en estado estacionario, por interacción con una corriente de agua líquida que no se mezcla con el vapor.

## Paso 2. Hallar

- $\dot{m}_3/\dot{m}_1 = ?$
- $\dot{Q}_{vap}/\dot{m}_1 = [kW/kg]$

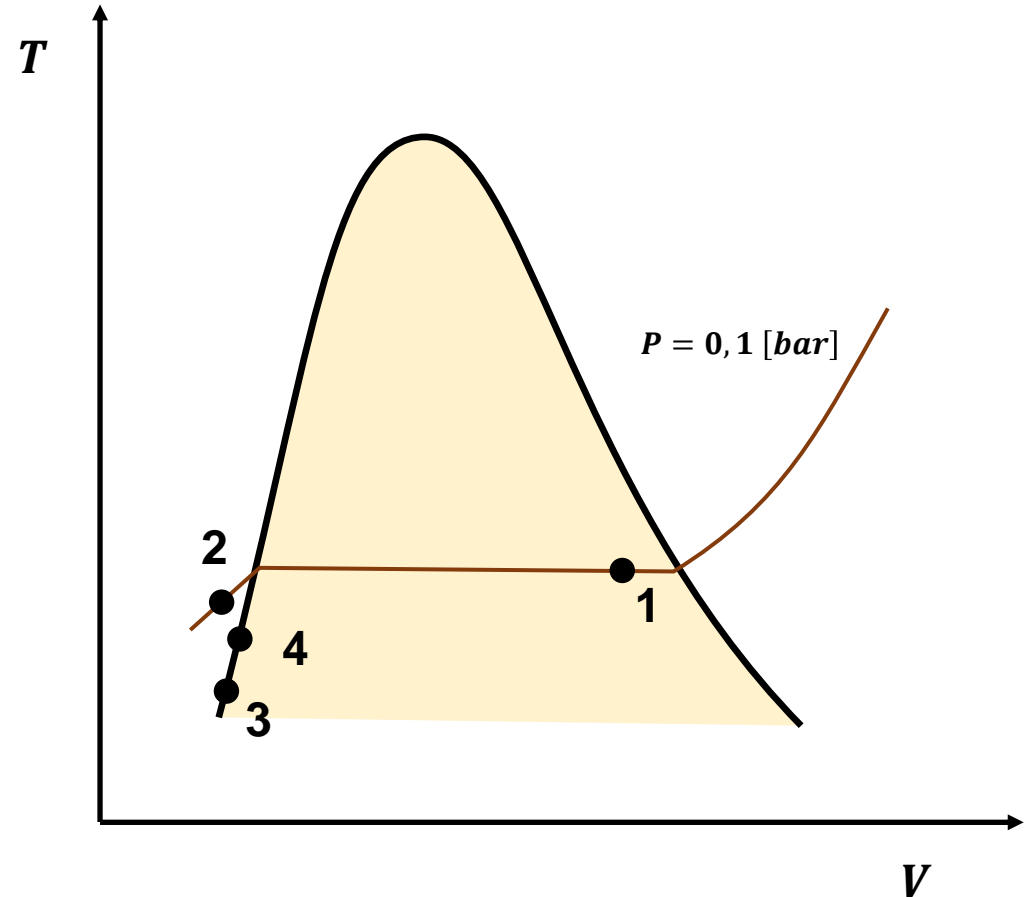
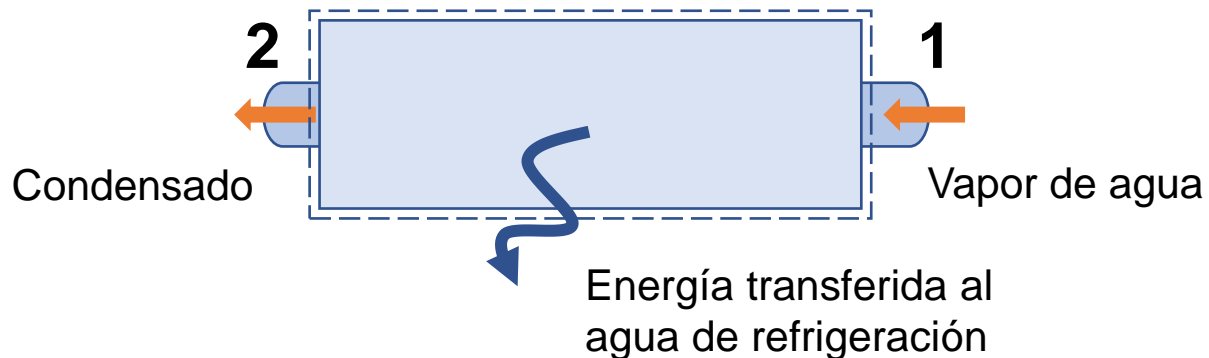
# PROBLEMA:

## Paso 3. Datos conocidos y diagramas



Volumen de control del apartado a)

Volumen de control del apartado b)



# PROBLEMA:

## Paso 4. Consideraciones e hipótesis

- Ambos volúmenes de control en estado estacionario.
- Puede despreciarse la variación de energía potencial y de energía cinética entre la entrada y la salida.
- Se aplicará el modelo de líquido incompresible al agua de refrigeración, a presión constante.

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

- Balance de materia:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$  y  $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$
- Aplicando el balance de energía (al sistema):

- $$\cancel{\dot{W}} - \cancel{\dot{Q}} = \dot{m}_1 \left( h_1 + \cancel{\frac{c_1^2}{2}} + \cancel{g z_1} \right) - \dot{m}_2 \left( h_2 + \cancel{\frac{c_2^2}{2}} + \cancel{g z_2} \right) \\ + \dot{m}_3 \left( h_3 + \cancel{\frac{c_3^2}{2}} + \cancel{g z_3} \right) - \dot{m}_4 \left( h_4 + \cancel{\frac{c_4^2}{2}} + \cancel{g z_4} \right)$$

- $0 = \dot{m}_1(h_1 - h_2) - \dot{m}_3(h_3 - h_4)$
- $\dot{m}_3/\dot{m}_1 = (h_1 - h_2)/(h_3 - h_4)$

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

TABLA A-3 Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K	
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. $v_g$	Líquido sat. $u_f$	Vapor sat. $u_g$	Líquido sat. $h_f$	Vapori- zación $h_{fg}$	Vapor sat. $h_g$	Líquido sat. $s_f$	Vapor sat. $s_g$
0.04	28.96	1.0040	34.800	121.45	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.4746
0.06	36.16	1.0064	23.739	151.53	2425.0	151.53	2415.9	2567.4	0.5210	8.3304
0.08	41.51	1.0084	18.103	173.87	2432.2	173.88	2403.1	2577.0	0.5926	8.2287
→ 0.10	45.81	1.0102	14.674	191.82	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	8.1502

$$h_1 = h_f + x (h_g - h_f) \quad (x: \text{título} = m_{\text{vapor}} / (m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}))$$

$$h_1 = 2465,1 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

TABLA A-2 Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas .

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg · K	
		Líquido sat. $v_f \times 10^3$	Vapor sat. $v_g$	Líquido sat. $u_f$	Vapor sat. $u_g$	Líquido sat. $h_f$	Vapori- zación $h_{fg}$	Vapor sat. $h_g$	Líquido sat. $s_f$	Vapor sat. $s_g$
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570
→ 45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648

$$h_2 = h_f = 188,45 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

$$h_2 - h_1 = c (T_2 - T_1) + V (P_2 - P_1)$$

$$h_4 - h_3 = c (T_4 - T_3) + V (P_4 - P_3)$$

$$h_4 - h_3 = c (T_4 - T_3) + V (\cancel{P_4} - \cancel{P_3})$$

$$h_4 - h_3 = 4,179 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right] (308 - 293)[K]$$

$$h_4 - h_3 = 62,68 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

TABLA A-13 Calores específicos de diversos líquidos y sólidos.

A. Líquidos	Estado	$c$ (kJ/kg · K)
Amoníaco	líq. sat., -20°C	4.52
	líq. sat., 10°C	4.67
	líq. sat., 50°C	5.10
Etanol	1 atm, 25°C	2.43
Glicerina	1 atm, 10°C	2.32
	1 atm, 50°C	2.58
Mercurio	1 atm, 10°C	0.138
	1 atm, 315°C	0.134
Refrigerante 12	líq. sat., -20°C	0.90
	líq. sat., 20°C	0.96
Agua	1 atm, 0°C	4.217
	1 atm, 27°C	4.179
	1 atm, 100°C	4.218
B. Sólidos	Temperatura (K)	$c$ (kJ/kg · K)
Aluminio	300	0.903
Cobre	300	0.385
	400	0.393
Hielo	200	1.56
	240	1.86
	273	2.11
Hierro	300	0.447
Plomo	300	0.129
Plata	300	0.235





# PROBLEMA:

## Paso 5. Análisis

- Balance de materia:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$  y  $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$
- Aplicando el balance de energía (al sistema):

$$a) \dot{m}_3/\dot{m}_1 = (h_1 - h_2)/(h_3 - h_4) = (2465,1 - 188,5)/62,7 = 3,3$$

$$b) \cancel{\dot{W}} - \dot{Q} = \dot{m}_1 \left( h_1 + \cancel{\frac{c_1^2}{2}} + \cancel{g z_1} \right) - \dot{m}_2 \left( h_2 + \cancel{\frac{c_2^2}{2}} + \cancel{g z_2} \right)$$

- $\dot{Q} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$

- $\dot{Q}/\dot{m}_1 = (h_2 - h_1) = 188,45 - 2465,1 = -2276,7 \text{ [kJ/kg]}$

- **Conclusión:** El signo negativo significa energía transferida desde el vapor hacia el agua de refrigeración.