

Tema 4. Centrales termoeléctricas convencionales



Descripción de una central termoeléctrica clásica.

Generadores de vapor.

Configuración del sistema térmico.

Influencia de la fuente energética y de las condiciones del vapor.

Tipos de centrales térmicas.

**Turbinas de vapor y de gas: Parámetros de diseño. Curvas características.
Elementos constructivos.**

Descripción de una central termoeléctrica clásica.

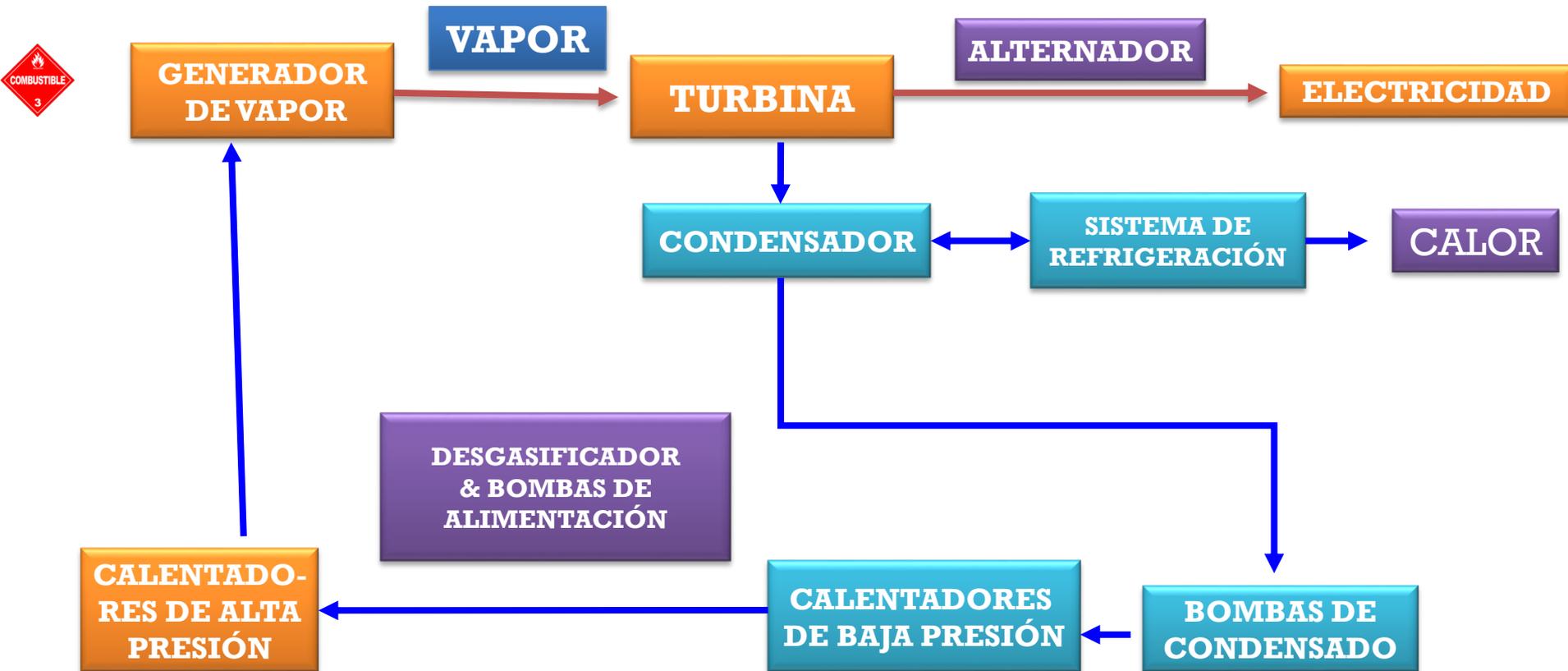
Centrales térmicas convencionales

**Conversión energética
química-térmica-mecánica-eléctrica**

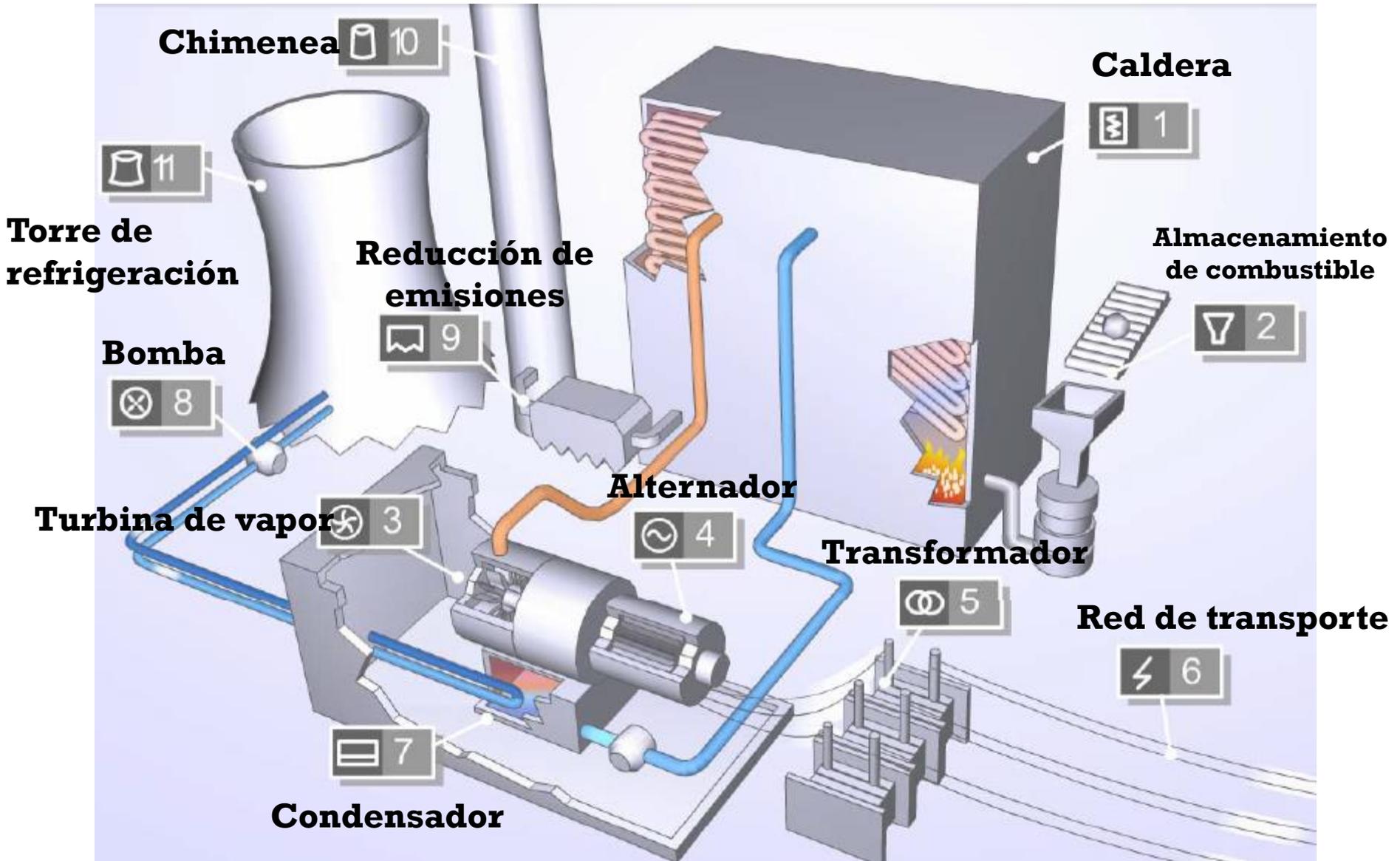
**Turbina de vapor \Rightarrow Energía
mecánica a partir del vapor a alta
presión (expansión adiabática)**

**Combustible (carbón, fuel, gas) se
quema en la caldera \Rightarrow Vapor de agua**

**Generador \Rightarrow Conversión energía
mecánica en eléctrica**



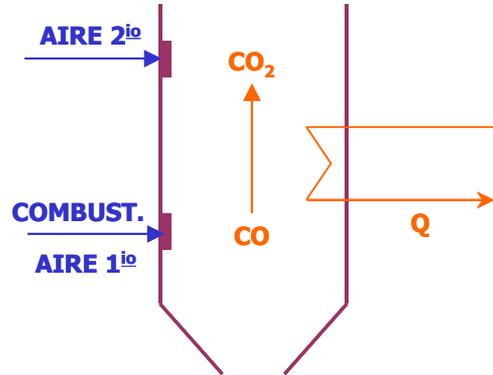
Descripción de una central termoeléctrica clásica.



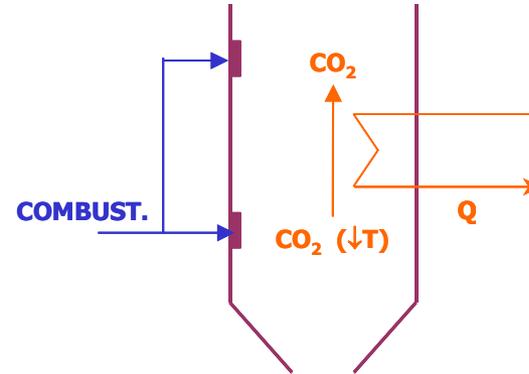
Control emisiones

Medidas primarias

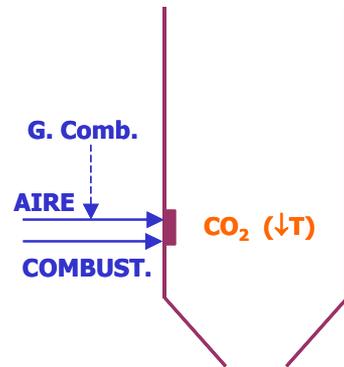
INTRODUCCIÓN DE AIRE EN DOS ETAPAS



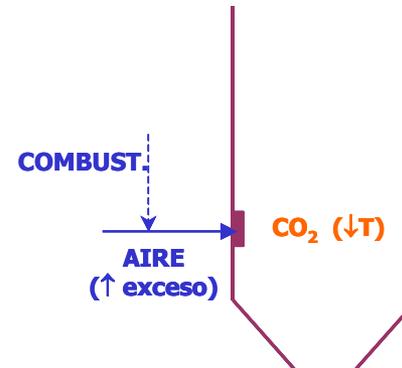
INTRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLE EN DOS ETAPAS



RECIRCULACIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN



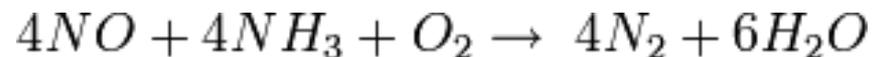
COMBUSTIÓN EN EXCESO DE AIRE



Control emisiones

Medidas secundarias

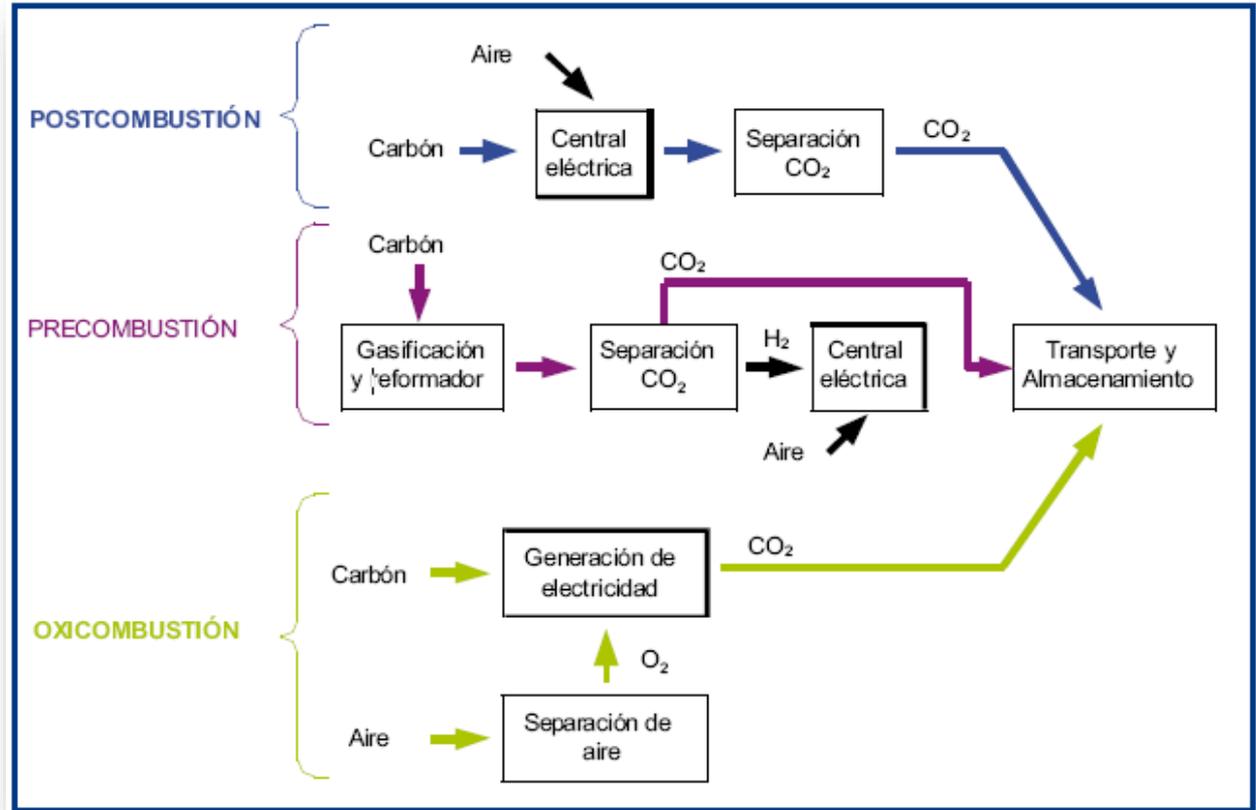
- ✓ **SO_x**: lavado de gases con disoluciones alcalinas (p.e. lechada de cal)
- ✓ **Partículas**: ciclones, filtros y precipitadores electrostáticos
- ✓ **NO_x**: se usan unidades SCR (Selective Catalytic Reduction). Se realiza la reducción de los NO_x con NH₃ en presencia de un catalizador heterogéneo (entre otros V₂O₅), produciéndose N₂ y H₂O (elimina un 60-85% de las emisiones de NO_x)



Control emisiones

Captura de CO₂

- ✓ Pre-combustión
- ✓ Post-combustión
- ✓ Oxi-combustión



El uso de cada uno de estos métodos dependerá de la concentración de CO₂, la presión del gas y el tipo de combustible que se utiliza

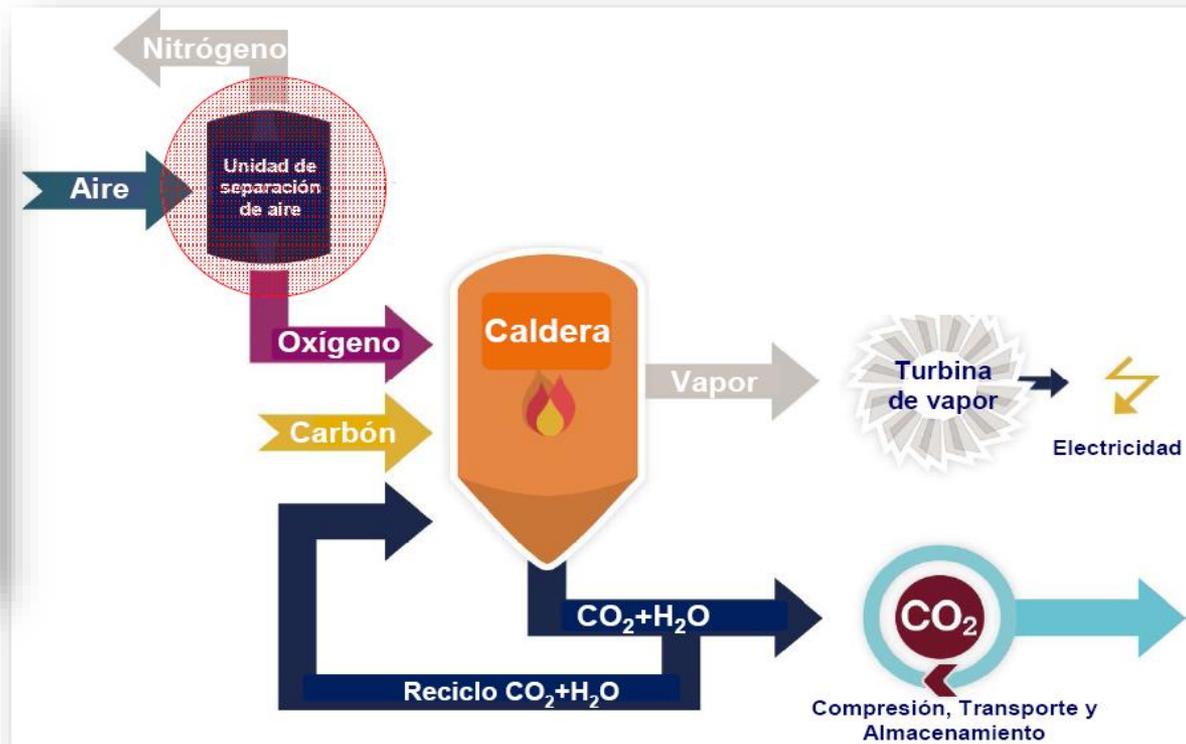
Control emisiones

Oxicombustión

Consiste en la utilización de oxígeno en lugar de aire para la combustión, de ahí que los gases de escape estén compuestos principalmente de H_2O y CO_2 , que puede separarse fácilmente del vapor de agua mediante condensación.



CIUDEN en Ponferrada (León)



Descripción de una central termoeléctrica clásica.

Circuitos

- **Circuito aire-combustible-gases-cenizas**
- **Circuito agua-vapor**
- **Circuito agua de refrigeración**
- **Circuitos eléctricos**
- **Circuitos auxiliares**

Inconvenientes

- **Dependencia del poder calorífico del combustible \Rightarrow Poco eficientes (45%)**
- **Rigidez en su conexión y desconexión**
- **Humos: desulfurizador de humos**
- **Partículas sólidas \Rightarrow Precipitador electrostático**

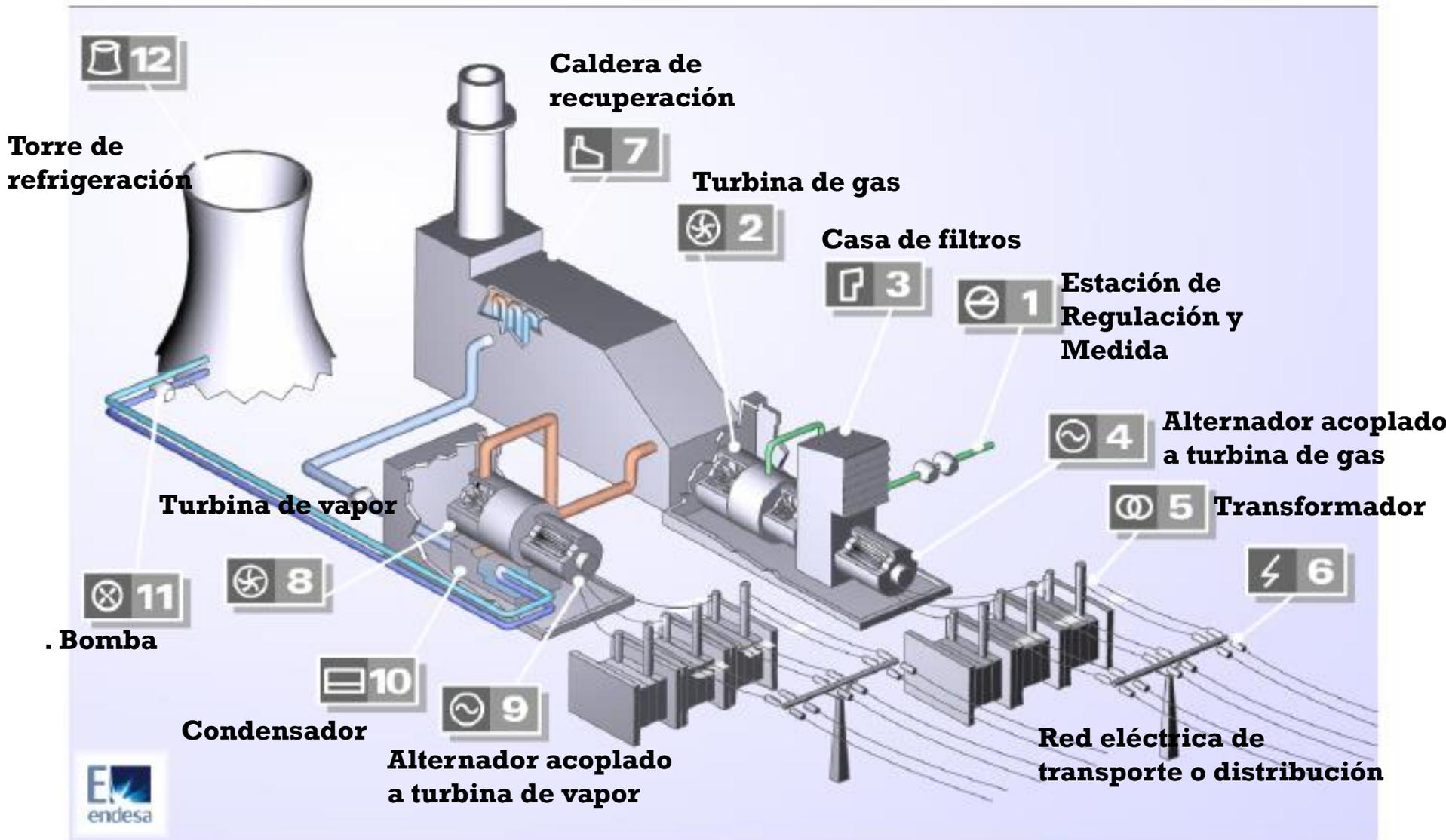
Centrales con turbina de gas

- **Compresor \Rightarrow Aspira y comprime aire \Rightarrow Inyección a cámara de combustión**
- **Se quema combustible \Rightarrow Chorro de gases calientes (1300 °C) a alta presión (30 bar) \Rightarrow Movimiento turbina de gas (ciclo Brayton) \Rightarrow Alternador gira**
- **Combustible líquido, gaseoso (gas natural) e incluso sólido (carbón pulverizado)**
- **\uparrow costes de operación, \downarrow costes de inversión**

Turbina de gas vs. turbina de vapor

- **Cámara de combustión sustituye a caldera**
- **Turbina accionada por gases de combustión en lugar de vapor**
- **Mecánicamente más sencilla que la de vapor**
- **Menor contaminación**
- **No requiere un motor eléctrico o de combustión interna para el arranque**
- **Apenas consume agua de refrigeración**
- **Tiempo de arranque \leq 50 segundos**
- **Puesta en marcha en 15-20 segundos tras arranque**

Descripción de una central termoeléctrica especial



- **CÁMARA DE COMBUSTIÓN (HOGAR)**

- **CAMBIADORES DE CALOR**

- ✓ **CALDERA o VAPORIZADOR:**

**CALDERA
ACUOTUBULAR**

- ✓ Agua (tubos)

- ✓ Humos por el exterior

Cambiador de calor en el que se produce vapor saturado

- ✓ **SOBRECALENTADOR:** Cambiador de calor en el que se recalienta el vapor anterior hasta 540°C (aprox.).

- ✓ **RECALENTADOR:** Cambiador en el que se recalienta el vapor de turbinas.

- ✓ **ECONOMIZADOR:** Cambiador en el que se precalienta el agua de caldera.

- ✓ **PRECALENTADOR:** Cambiador en el que se precalienta el aire de combustión.

- **EQUIPOS AUXILIARES**

- ✓ **RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO**

- ✓ **PREPARACIÓN DEL COMBUSTIBLE**

- ✓ **IMPULSIÓN DE GASES (ventiladores, ...)**

- ✓ **CONTROL DE EMISIONES**

- ✓ **ALMACENAMIENTO Y RETIRADA DE CENIZAS**

- ✓ **CHIMENEA**

Diseño de un generador de vapor.

Iteración múltiple (difícil encontrar una solución directa: interacciones).

Se definen condiciones tales como:

- Requisitos de flujo de vapor
- Fuentes de combustibles
- Dinámica funcional
- Límites de emisiones, etc.

Evalúa el generador de vapor

Caldera que queme carbón

- Los requisitos de **suministro de vapor**.
- El cálculo de los **balances térmicos**.
- El cálculo de la **combustión** para definir el aporte de calor y los flujos de gases, (aire y humos) y configuración del sistema de combustión para completar el proceso.
- La configuración **del hogar** de las superficies de transferencia térmica.
- El dimensionado de los demás componentes, tanto del lado del agua, como del lado del vapor.
- Las zonas de recuperación de calor en los intercambiadores finales, como los economizadores y los calentadores de aire.
- La comprobación de las características funcionales del sistema generador de vapor para asegurar que se cumplen los criterios de diseño de todos sus equipos auxiliares
- La repetición de los pasos anteriores, para todo el campo de cargas especificado, hasta que se alcancen el flujo y las condiciones de presión y temperatura del vapor
- La utilización, en el diseño de las partes a presión, de las normas del Código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*).
- El equipo de protección medioambiental necesario para alcanzar los niveles obligados de emisiones.

Rendimiento de una caldera

$$\dot{H}_f + \dot{H}_a + \dot{H}_w = \dot{H}_v + \dot{H}_h + \dot{H}_{inq} + \dot{H}_{cen} + \dot{H}_{pur} + |\dot{Q}_{VC}|$$

$$\dot{m}_f PC + \dot{m}_w h_1 + \sum \dot{m}_e h_{e,s} = \dot{m}_v h_2 + \dot{m}_h h_h + \dot{m}_{inq} h_{inq} + \dot{m}_{cen} h_{cen} + \dot{m}_{pur} h_{pur} + |\dot{Q}_{VC}|$$

$$\dot{m}_f PC + \sum \dot{m}_e h_{e,s} = \dot{m}_v (h_2 - h_1) + \dot{m}_h h_h + \dot{m}_{inq} h_{inq} + \dot{m}_{cen} h_{cen} + \dot{m}_{pur} (h_{pur} - h_1) + |\dot{Q}_{VC}|$$

Directo

$$\eta_{PCS} = \frac{\dot{m}_v (h_2 - h_1)}{\dot{m}_f \cdot PCS}$$

Indirecto

$$1 = \eta + p_h + p_{inq} + p_{cen} + p_{pur} + p_{VC}$$

$$\eta = 1 - \sum p = 1 - (p_h + p_{inq} + p_{cen} + p_{pur} + p_{VC})$$

$$p_h = \frac{\dot{m}_h \Delta h_h}{\dot{m}_f PCI}; \quad p_{inq} = \frac{\dot{m}_{inq} h_{inq}}{\dot{m}_f PCI};$$

$$p_{cen} = \frac{\dot{m}_{cen} h_{cen}}{\dot{m}_f PCI}$$

$$p_{VC} = \frac{|\dot{Q}_{VC}|}{\dot{m}_f PCI}; \quad p_{pur} = \frac{\dot{m}_{pur} \Delta h_{pur}}{\dot{m}_f PCI}$$

$$\Delta h_h = c_{ph} (T_h - T_a)$$

$$\Delta h_{pur} = h_{pur} - h_1$$

Configuración del sistema térmico. Refrigeración de la central

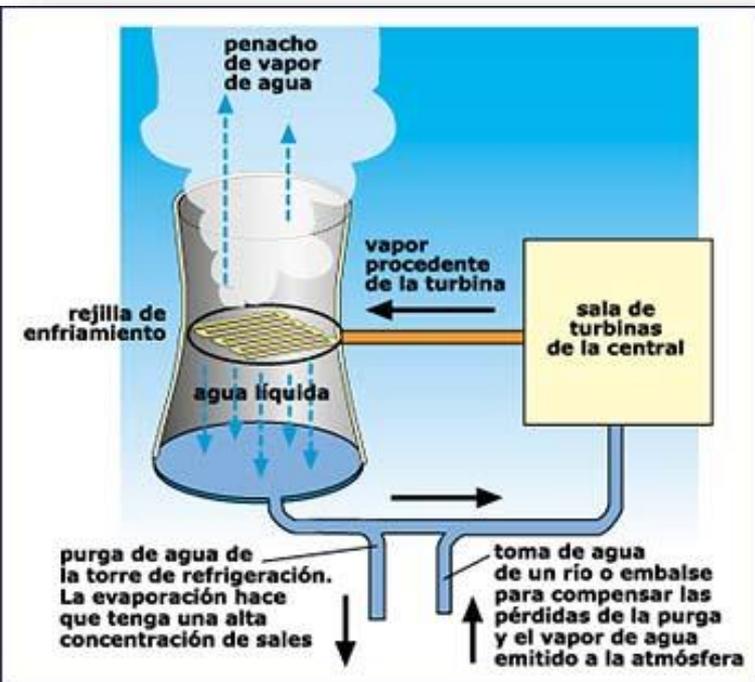
CIRCUITO ABIERTO

La refrigeración en circuito abierto consiste simplemente en hacer pasar el agua de un río, embalse o el mar por el circuito del condensador. Una vez transferido el calor, se devuelve íntegramente a la masa de agua.

CIRCUITO CERRADO

El circuito cerrado requiere un volumen de agua mucho menor. El vapor pasa primero a una torre de enfriamiento, donde circula por finas rejillas que aseguran la transferencia de calor a la atmósfera.

El proceso no es completamente cerrado, porque parte del agua se pierde por evaporación en la atmósfera.



La refrigeración en circuito abierto origina **contaminación térmica** en el medio receptor, mientras que la de circuito cerrado reduce este problema

Configuración del sistema térmico

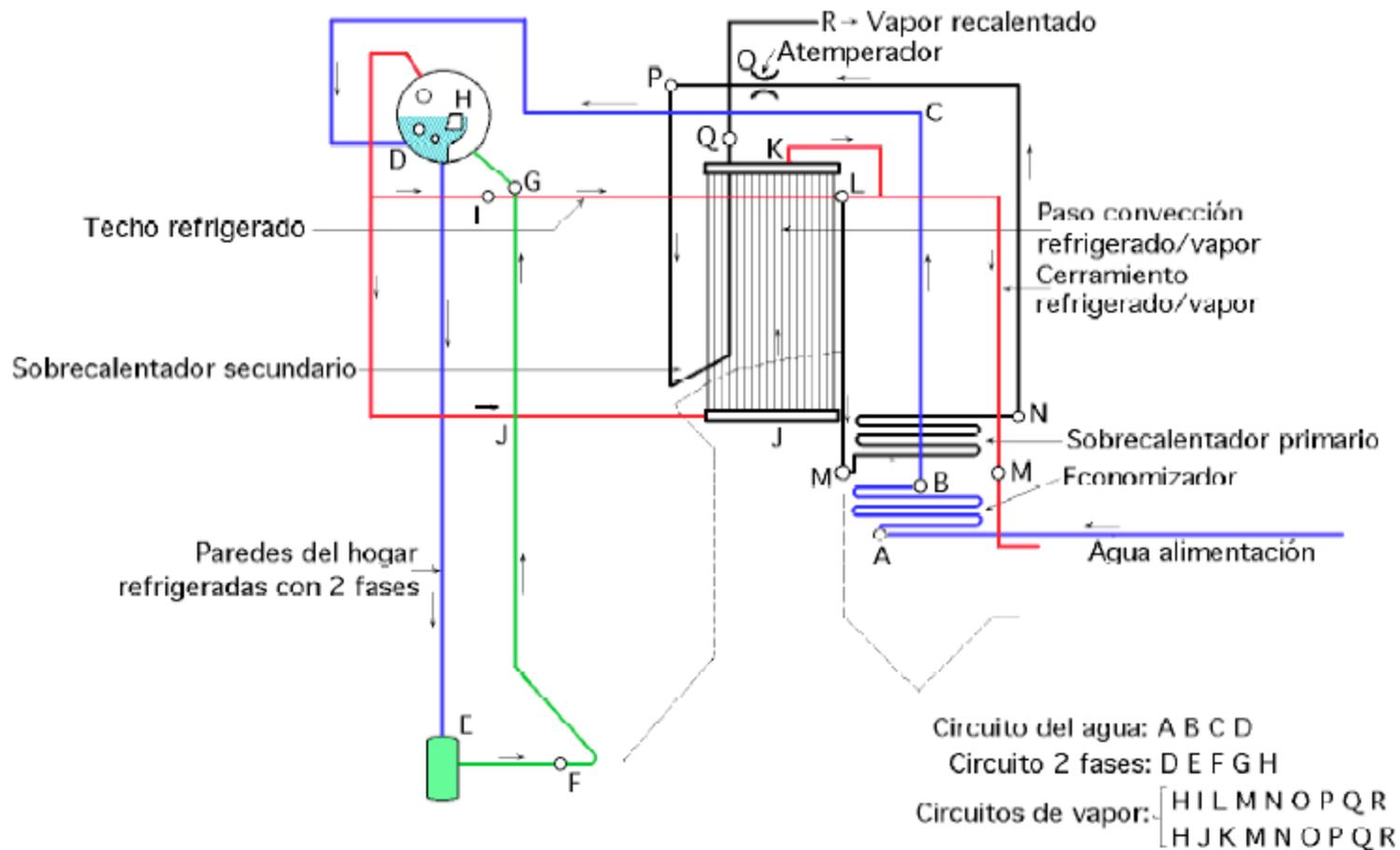


Fig I.15.- Esquema de circulación del agua-vapor en la caldera que quema carbón

Configuración del sistema térmico

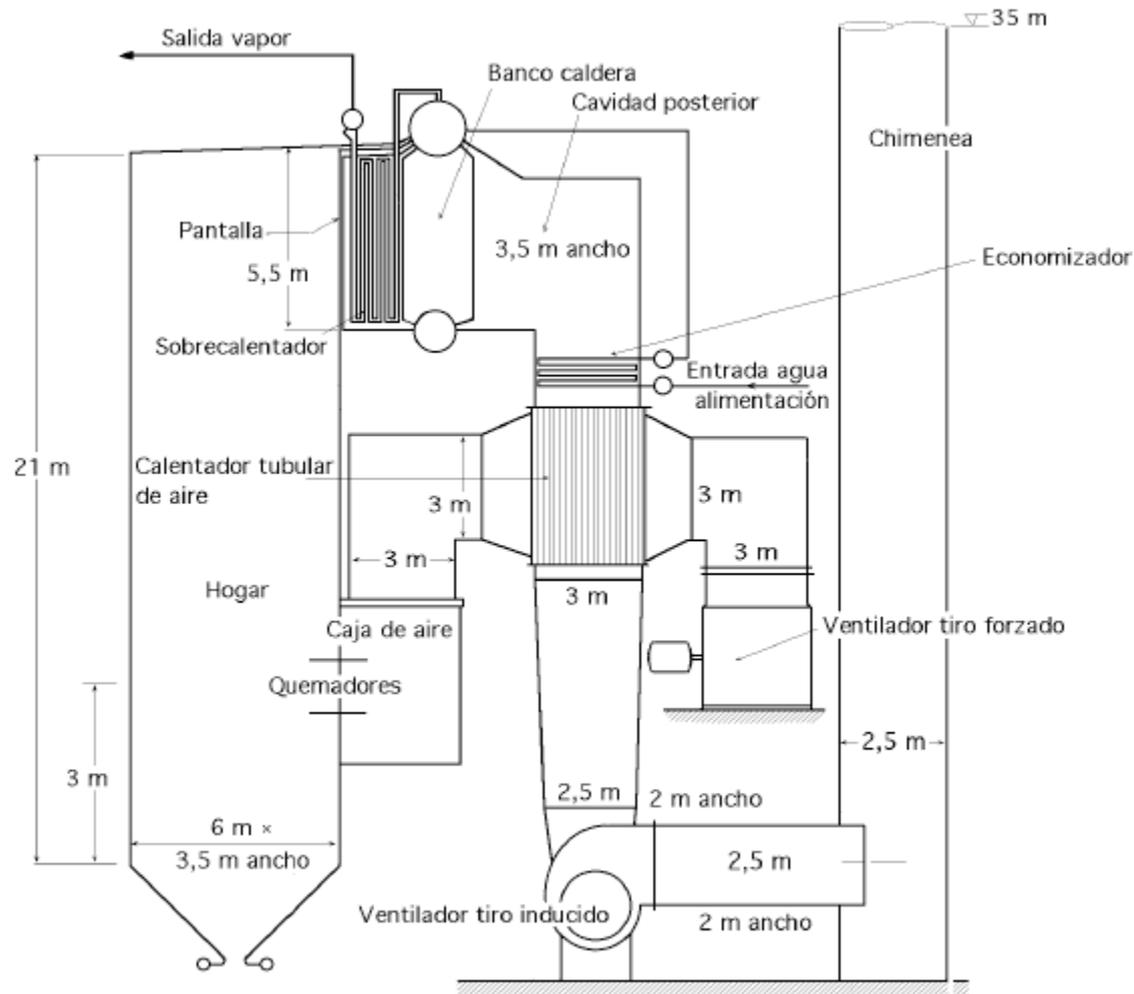
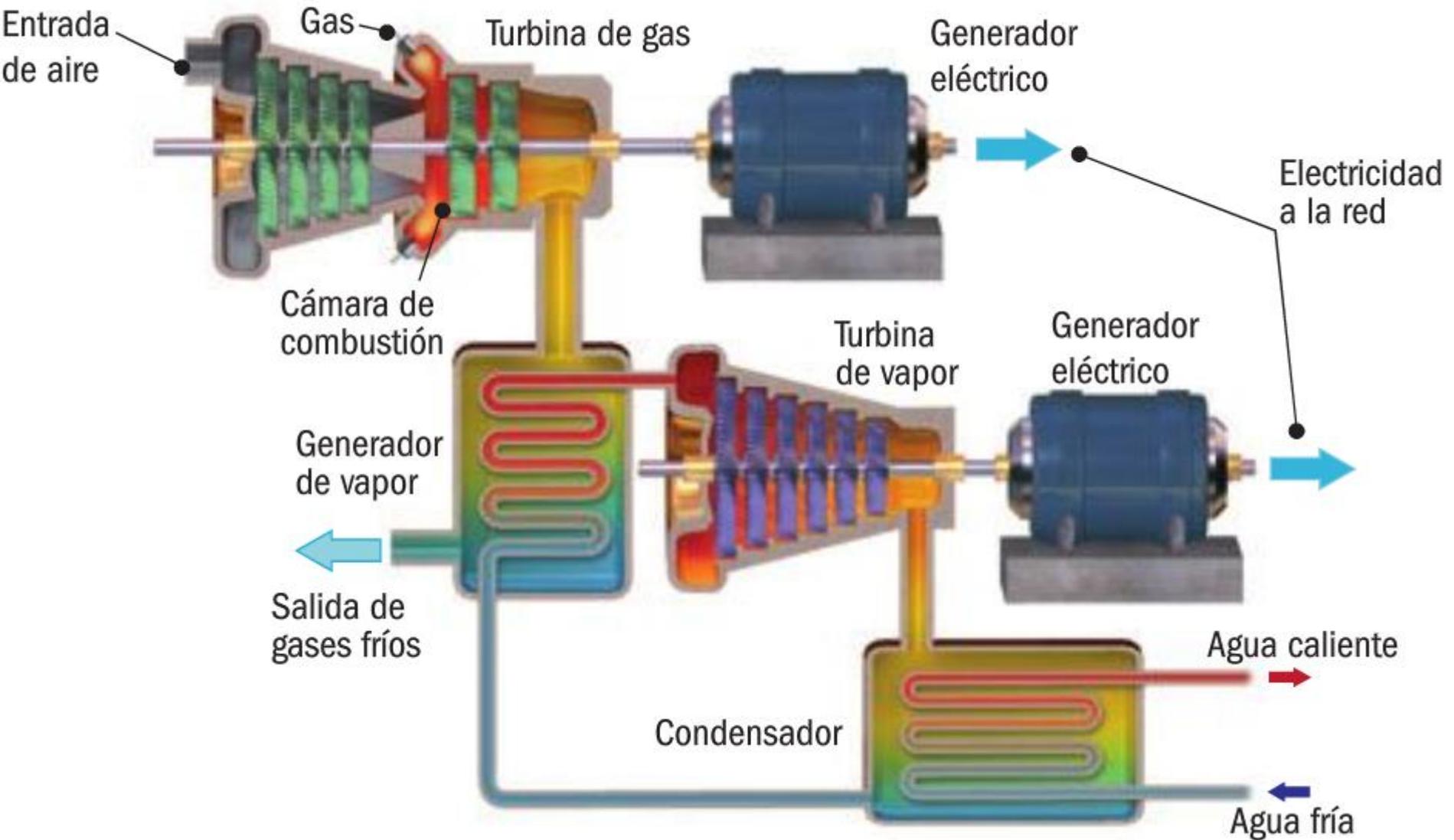


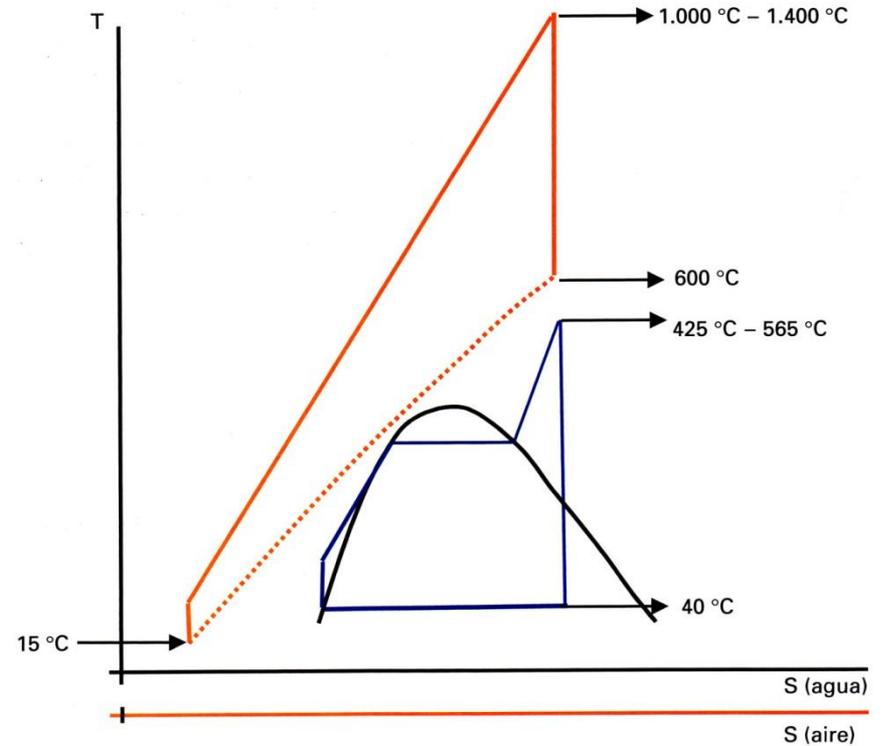
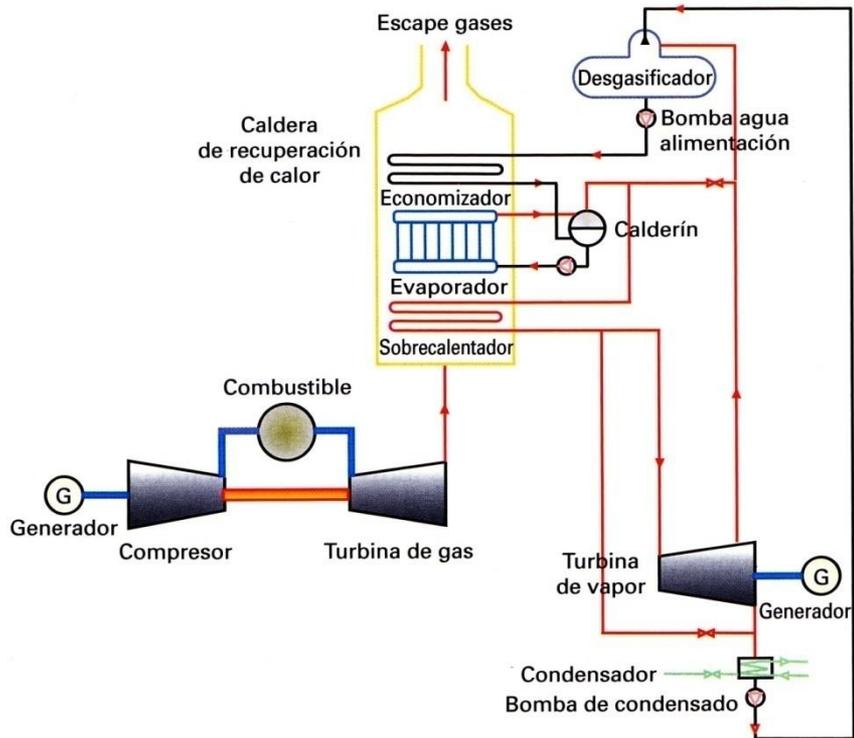
Fig XXI.1a.- Caldera industrial de carbón

Tipos de centrales térmicas.

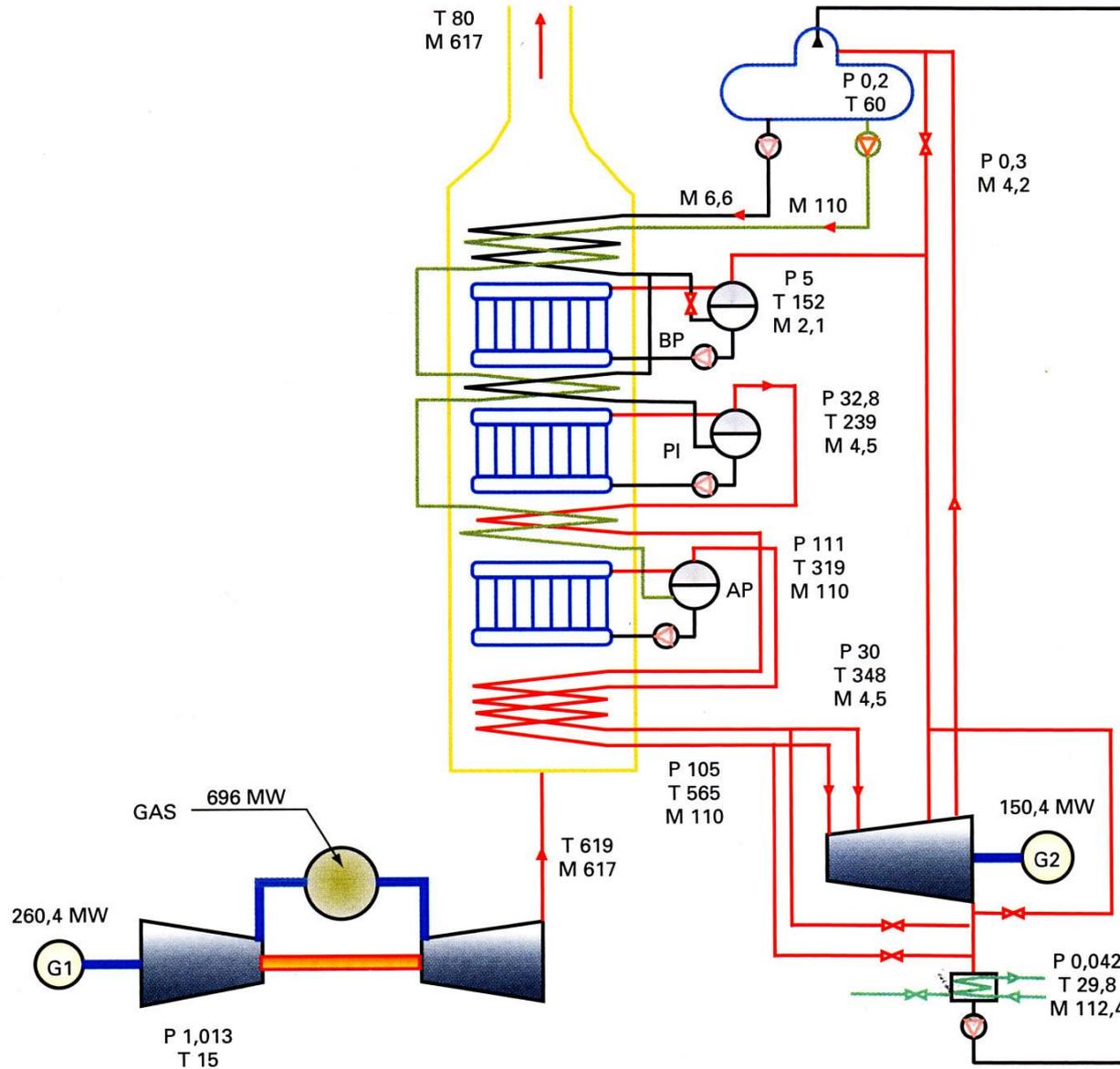
Esquema de una central térmica de ciclo combinado



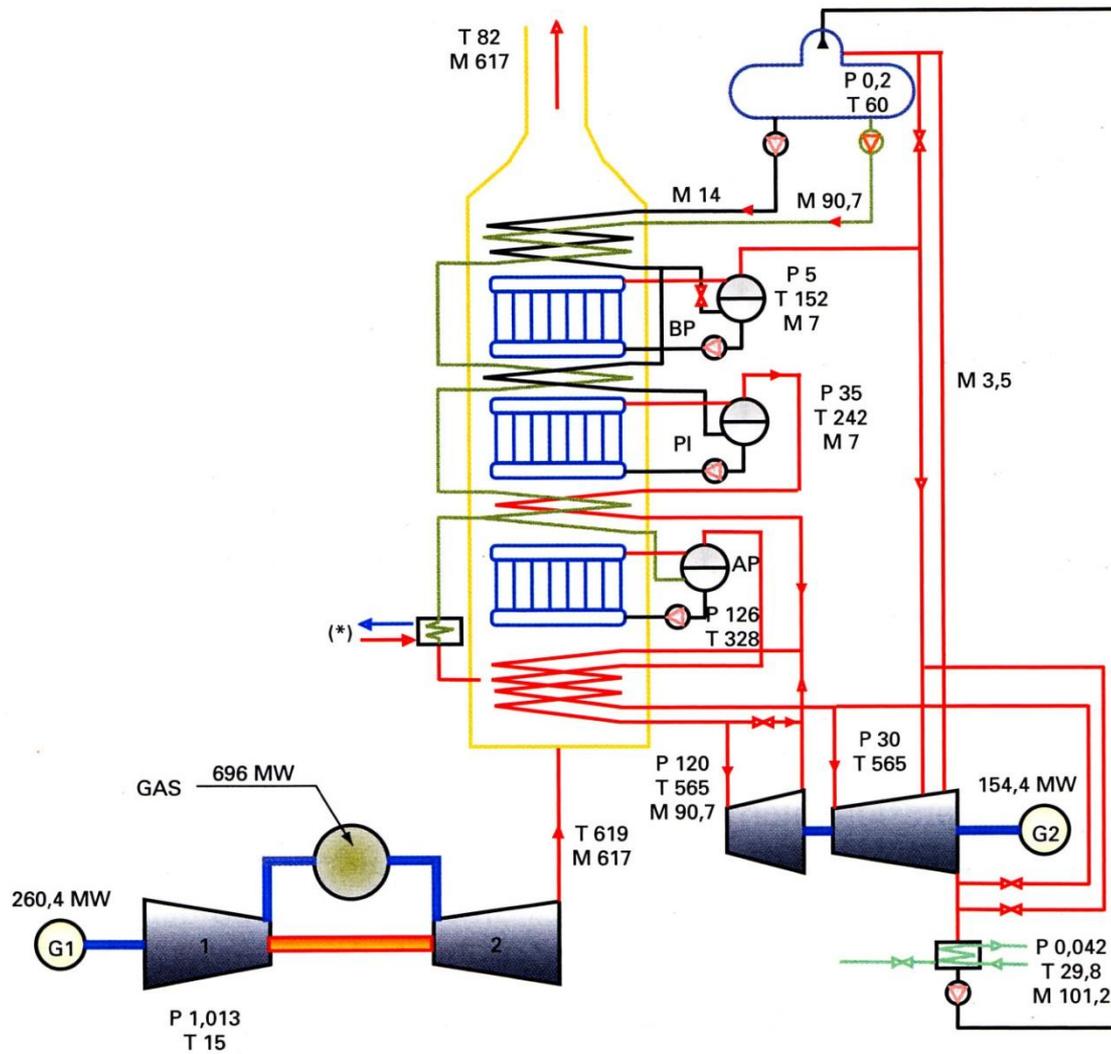
Tipos de centrales térmicas.



Tipos de centrales térmicas.



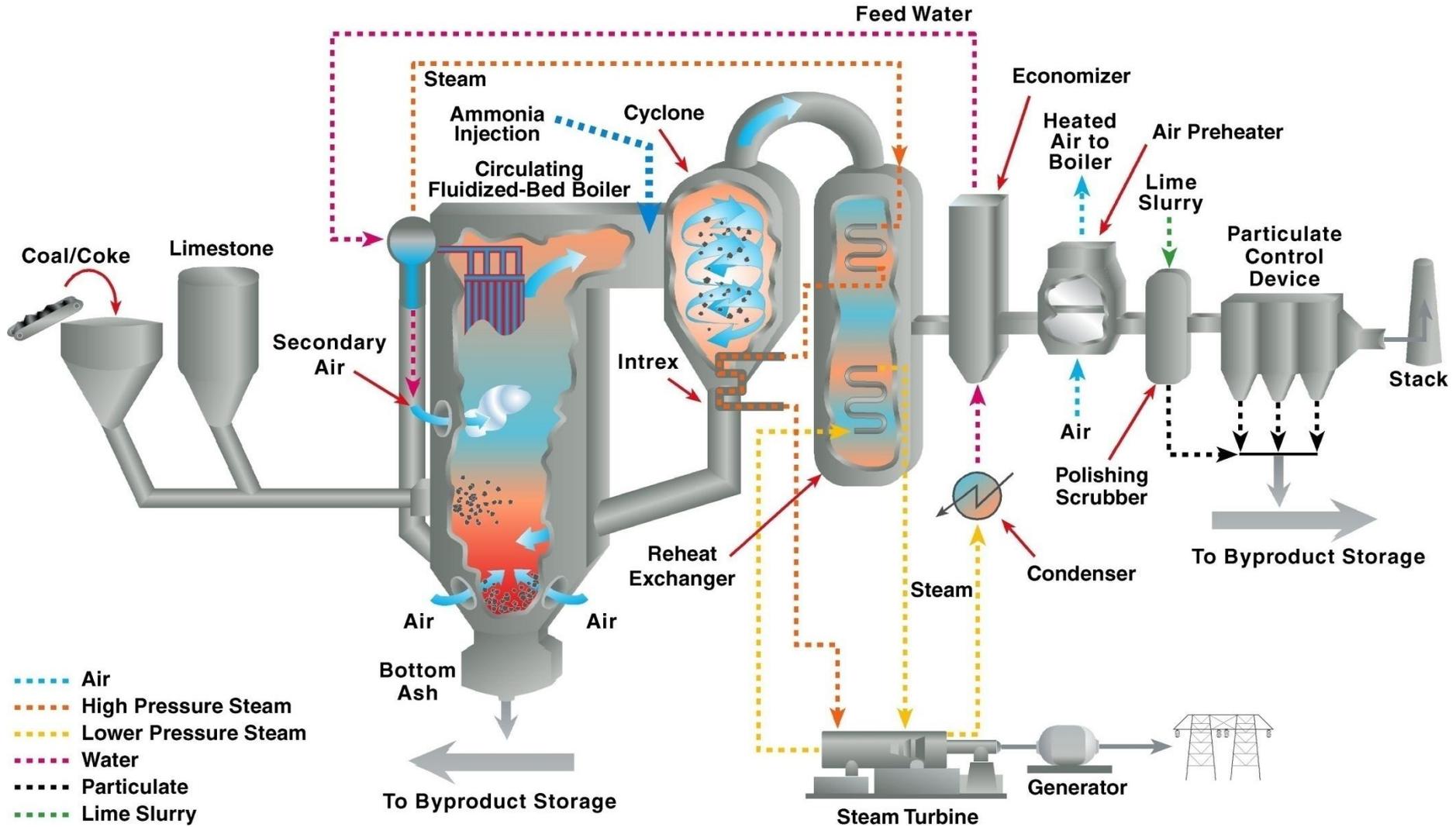
Tipos de centrales térmicas.



(*) Enfriamiento aire últimas etapas del compresor para refrigerar la turbina de gas.

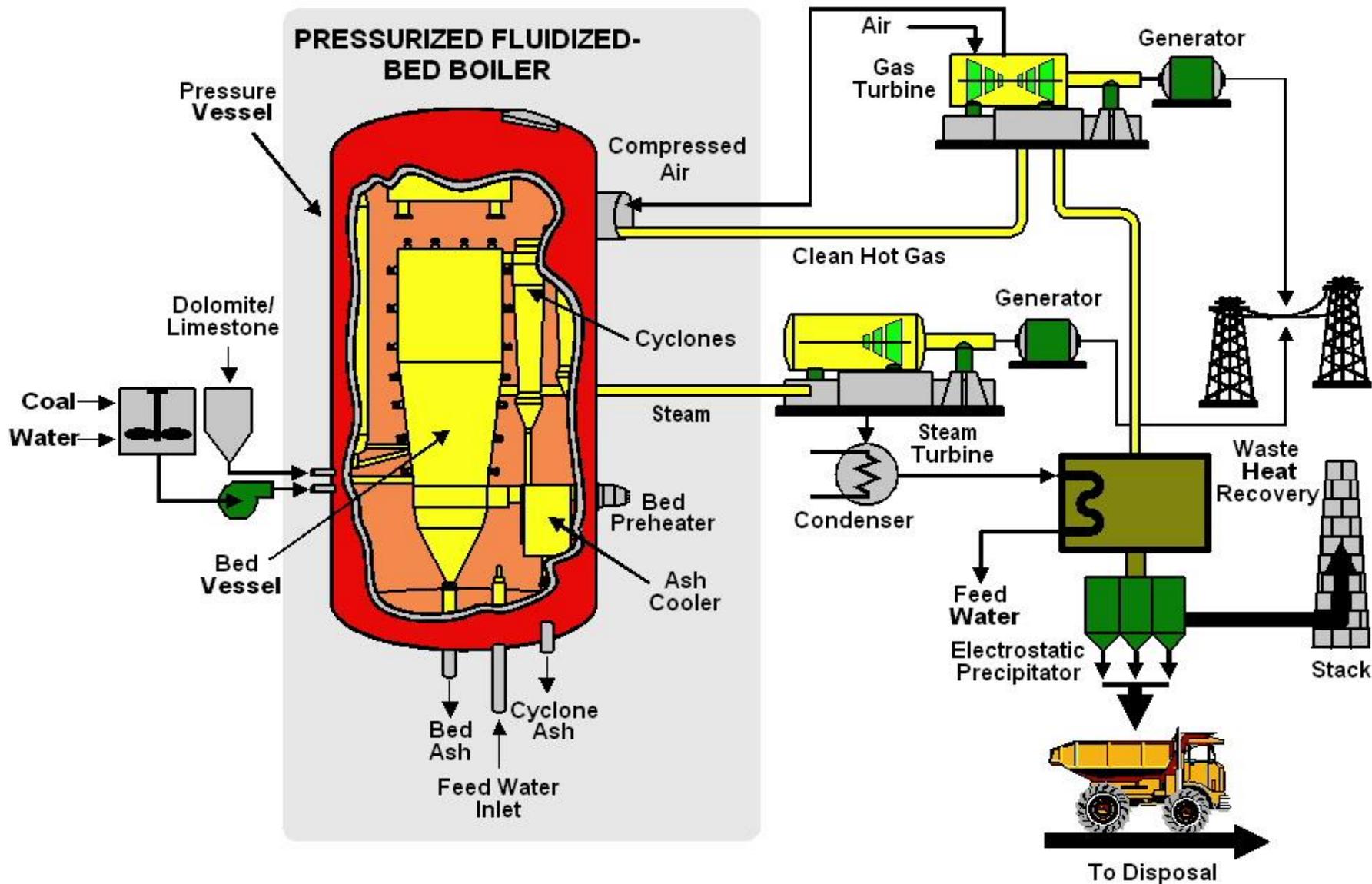
Tipos de centrales térmicas.

CENTRALES DE CARBON DE LECHO FLUIDIZADO

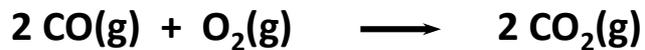


Tipos de centrales térmicas.

CENTRALES DE CARBON DE LECHO FLUIDIZADO PRESURIZADO



Gasificación integrada en ciclo combinado GICC



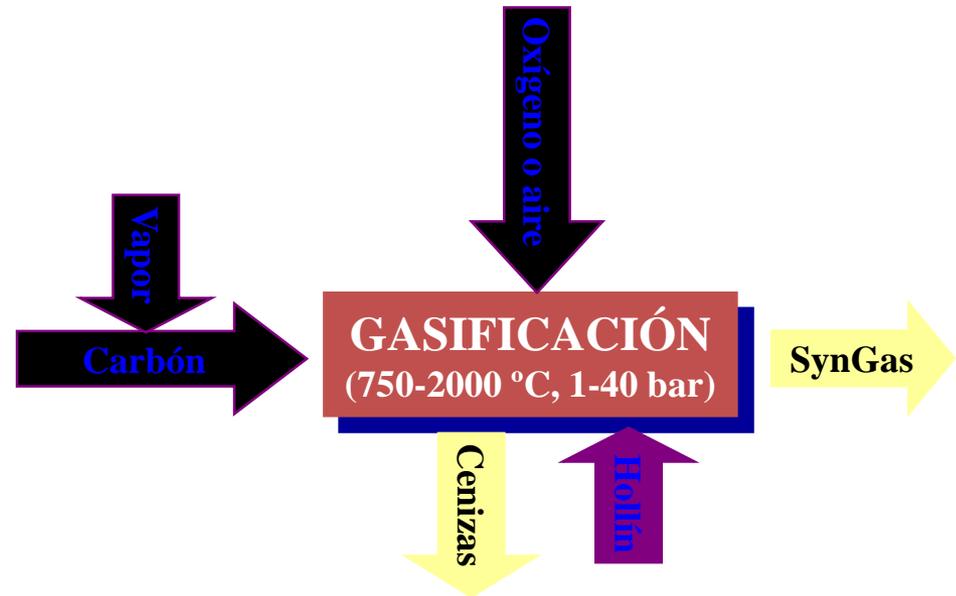
Etapas de la Gasificación del Carbón:

1. Pirólisis

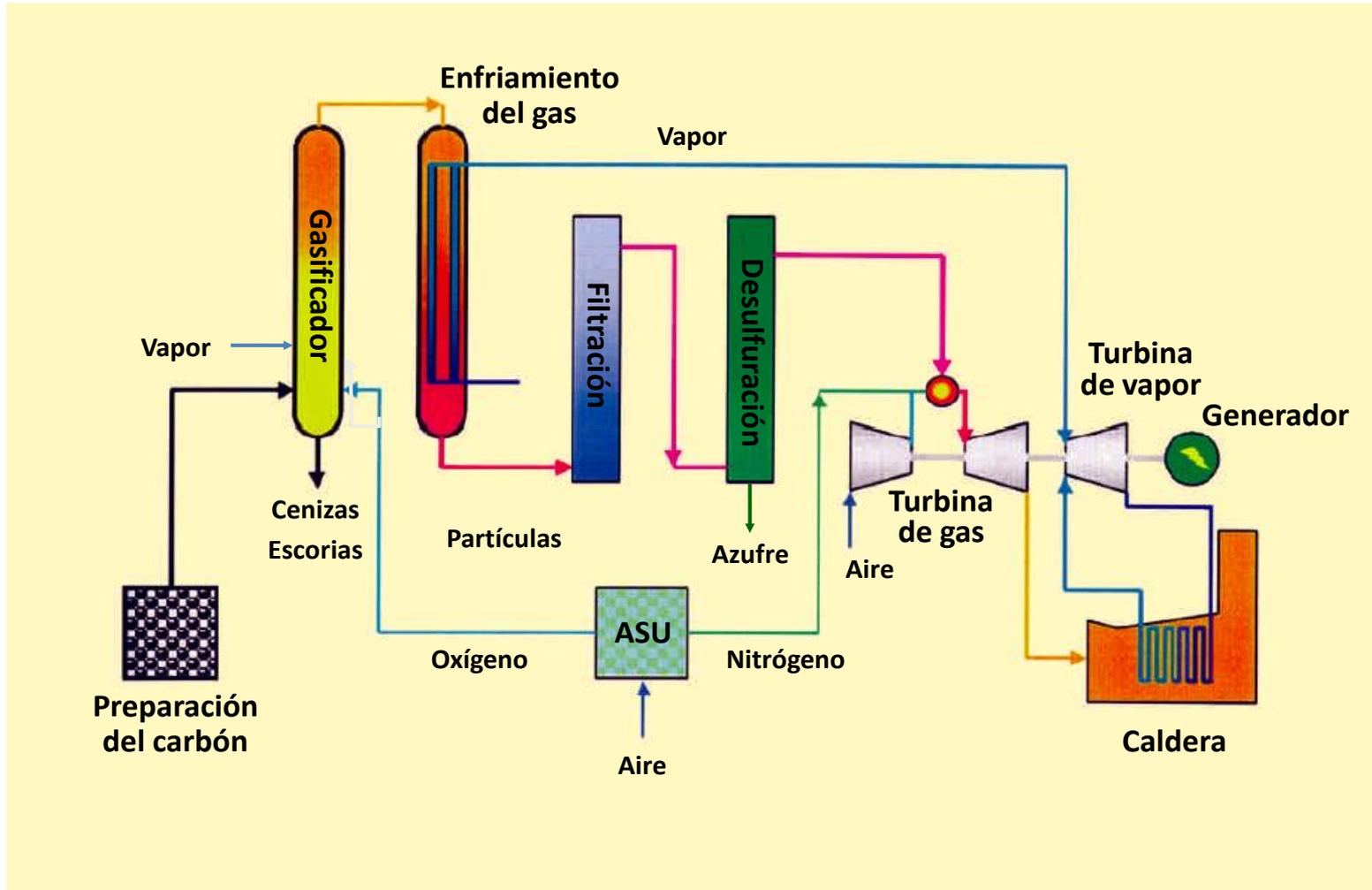
Carbón + calor → coque + líquidos + gases

2. Gasificación

Coque + agente gasificante + calor → gases + cenizas



Gasificación integrada en ciclo combinado GICC

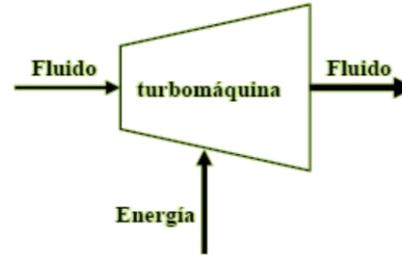


Turbomáquinas

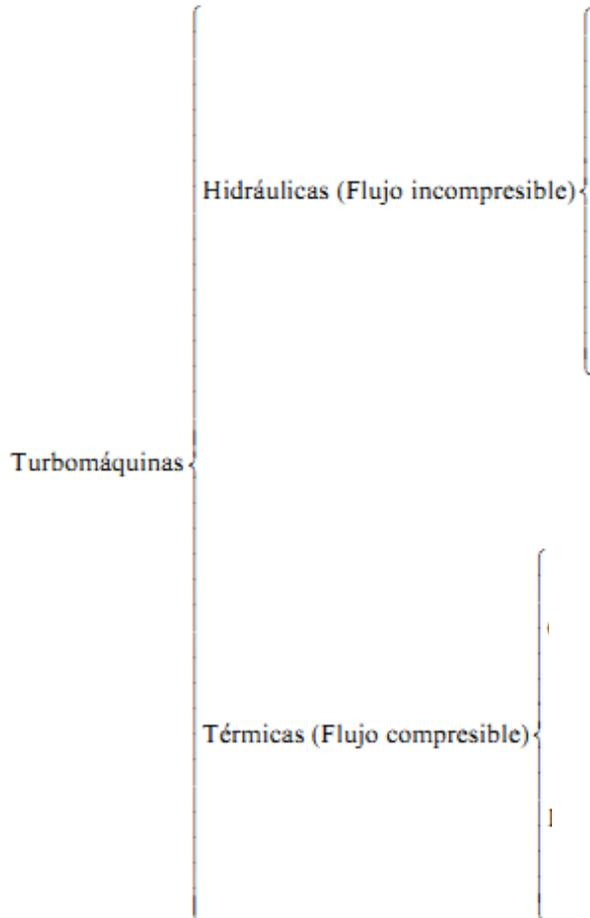
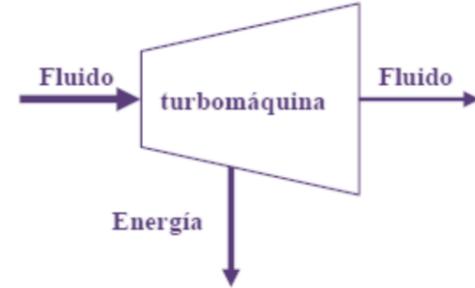
SEGÚN EL TIPO DE FLUIDO QUE MANEJAN

- Térmicas:** Cuando el cambio en la densidad del fluido es significativo dentro de la máquina.
- Hidráulicas:** Cuando el cambio en la densidad del fluido no es significativo dentro de la máquina.

MÁQUINAS GENERADORAS



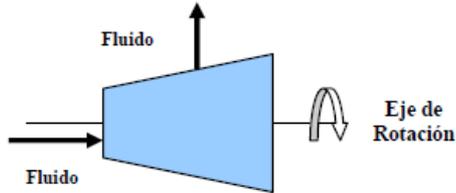
MÁQUINAS RECEPTORAS



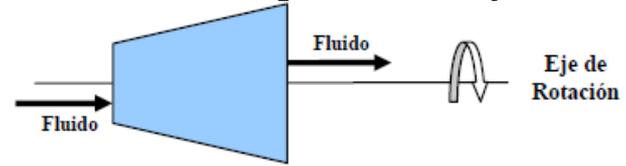
Turbomáquinas

CLASIFICACIÓN SEGÚN LA GEOMETRÍA (en función de la dirección del flujo de salida):

• **Radiales (o centrífugas):** la trayectoria que sigue el fluido es principalmente normal al eje de rotación.



• **Axial:** cuando la trayectoria del fluido es fundamentalmente paralelo al eje de rotación.



• **De flujo cruzado:** el flujo de salida atraviesa dos veces el rodete de la máquina.

• **Mixtas:** o de flujo mixto. El flujo de salida, tiene tanto componente axial como radial.

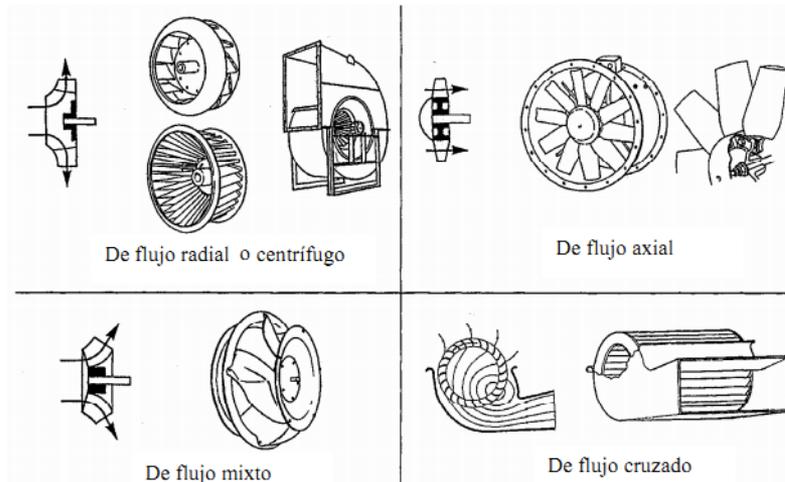


Figura 10.3.- Distintas geometrías de turbomáquinas (ventiladores).

5. Turbomáquinas

CLASIFICACIÓN SEGÚN LA COMPONENTE DE ENERGÍA FLUIDODINÁMICA MODIFICADA

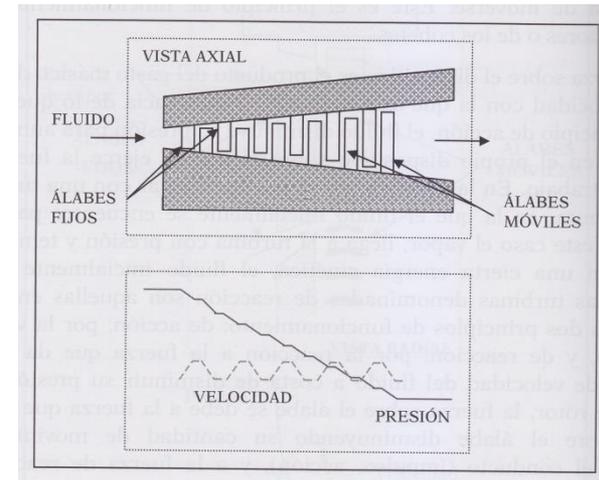
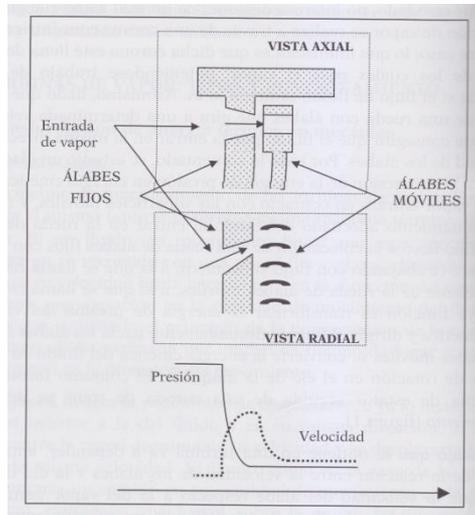
Variación de energía potencial

Turbinas de acción: Son aquellas en que el fluido no sufre ningún cambio de presión a través de su paso por el rodete. La presión que el fluido tiene a la entrada en la turbina se mantiene constante en todo el rodete. Su principal característica es que carecen de tubería de aspiración.

Variación de energía cinética

Variación de presión

Turbinas de reacción: Son aquellas en que el fluido sí sufre un cambio de presión considerable a través de su paso por el rodete. Se caracterizan por presentar una tubería de aspiración, la cual une la salida del rodete con la zona de descarga de fluido.



5. Turbinas de vapor y de gas.

Turbinas de vapor

- **Convierte la energía térmica almacenada en el vapor de agua (procedente de una caldera) en energía mecánica (giro del eje de la turbina con una cierta velocidad).**
- **La presión del vapor se invierte en incrementar su velocidad (chorro de vapor), y este chorro de vapor se hace incidir sobre los álabes de una turbina, haciendo que ésta gire.**
- **Las turbinas de vapor se diseñan para transferir la mayor cantidad posible de energía del vapor al eje de la turbina, lo cual significa que la presión y temperatura a la salida de la turbina debe ser lo más baja posible (respecto de los valores de entrada).**

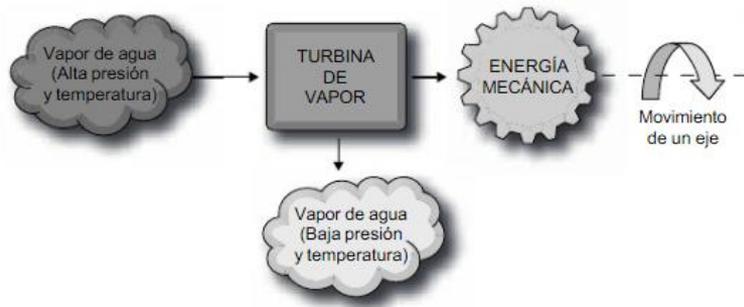


Figura 3.22. Esquema conceptual de una turbina de vapor.

Como es prácticamente imposible transferir toda la energía cinética del vapor a una sola turbina, lo que se hace en la práctica es colocar una serie de éstas (normalmente tres), unidas entre sí (sobre el mismo eje giratorio):

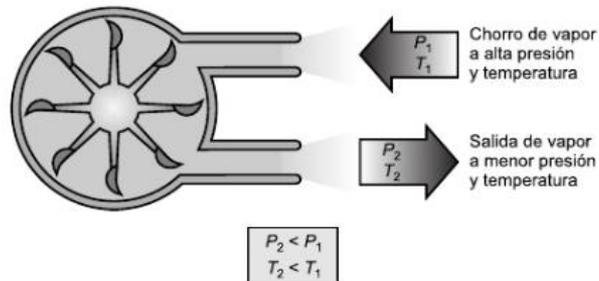


Figura 3.23. Esquema de funcionamiento de una turbina de vapor.

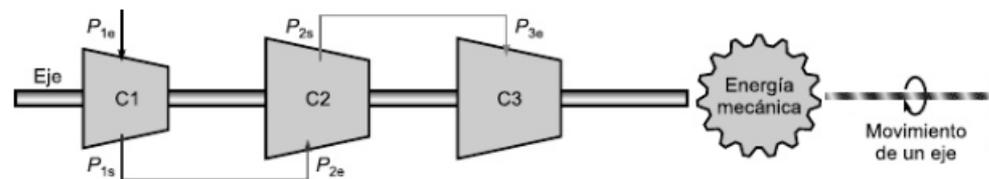
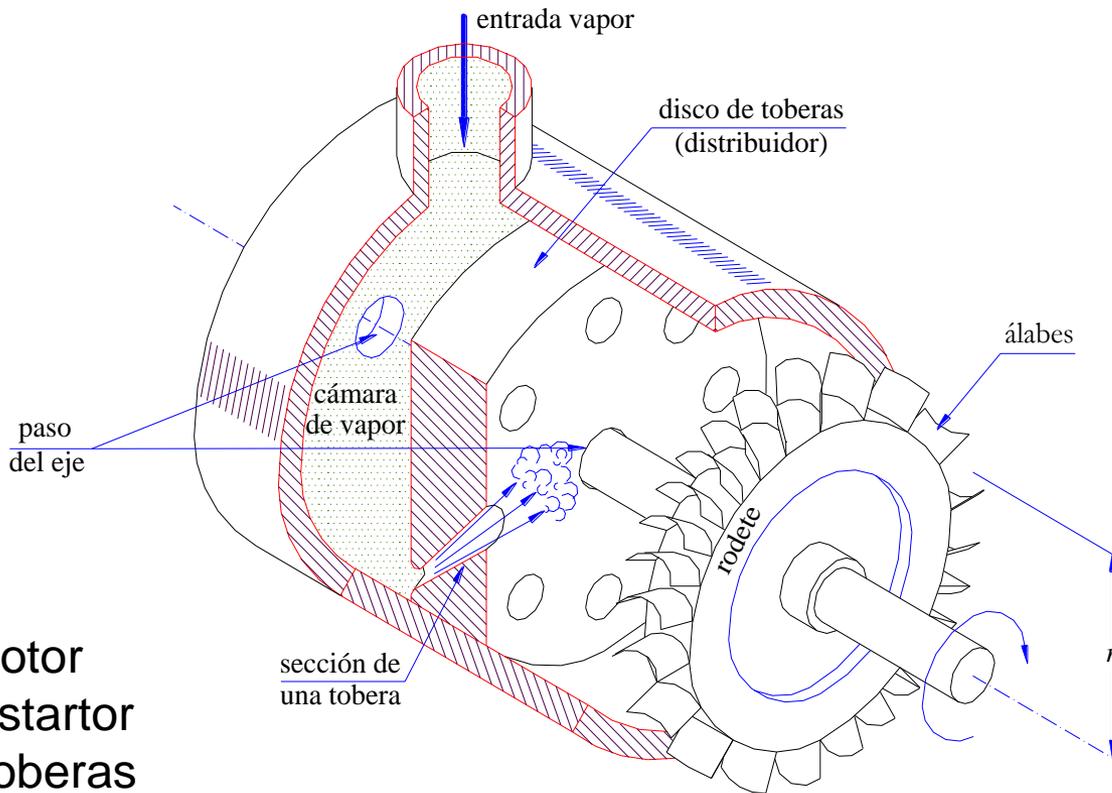


Figura 3.24. Esquema de una turbina de vapor multietapa.

Turbinas de vapor

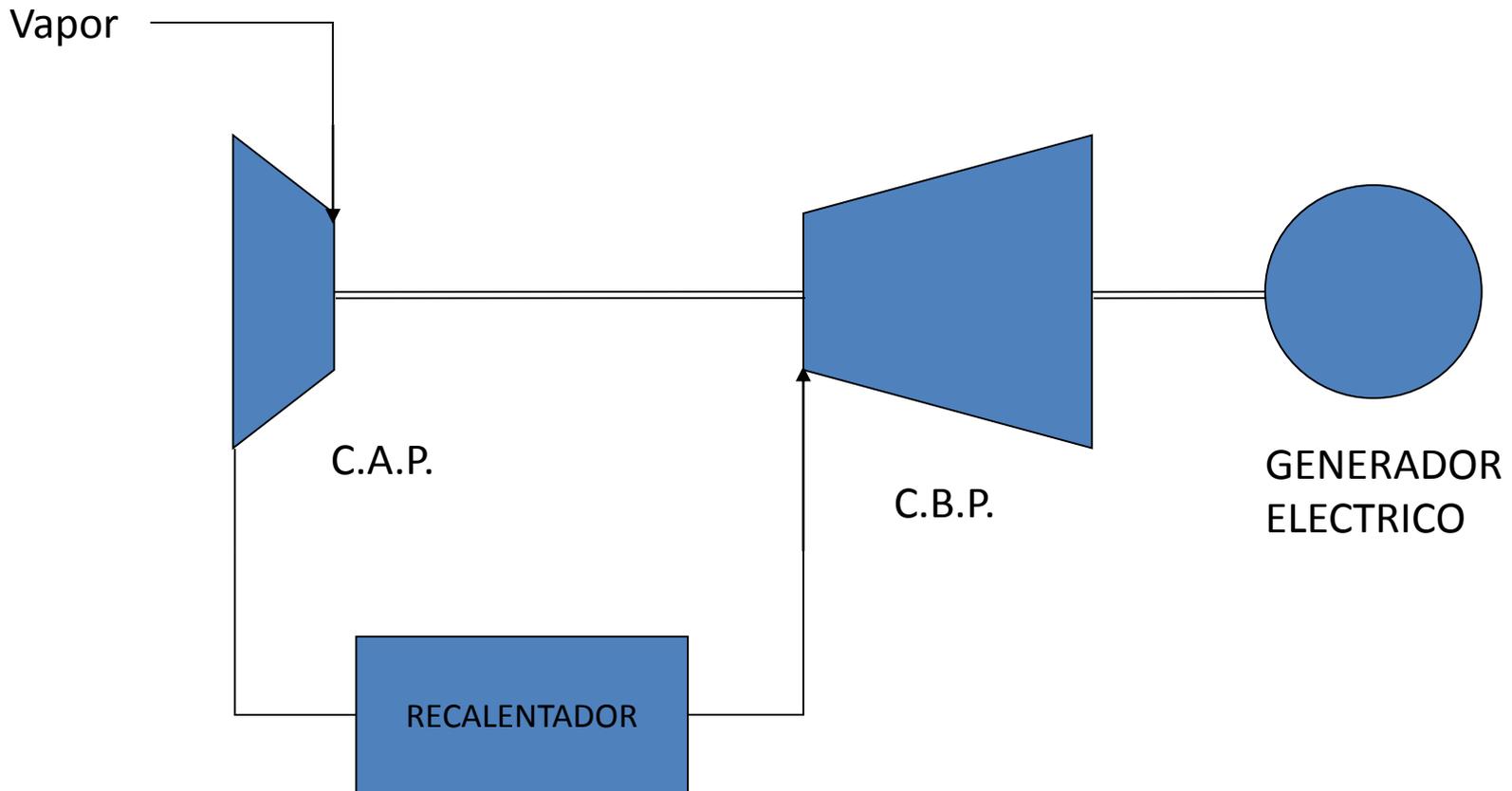
- *En la turbina, el vapor transforma primero su entalpía en energía cinética y, luego, ésta es cedida al rodete obteniéndose el trabajo técnico correspondiente.*



Rotor
Estator
Toberas
Alábes

5. Turbinas de vapor y de gas.

TURBINAS DE VAPOR: CONFIGURACIONES



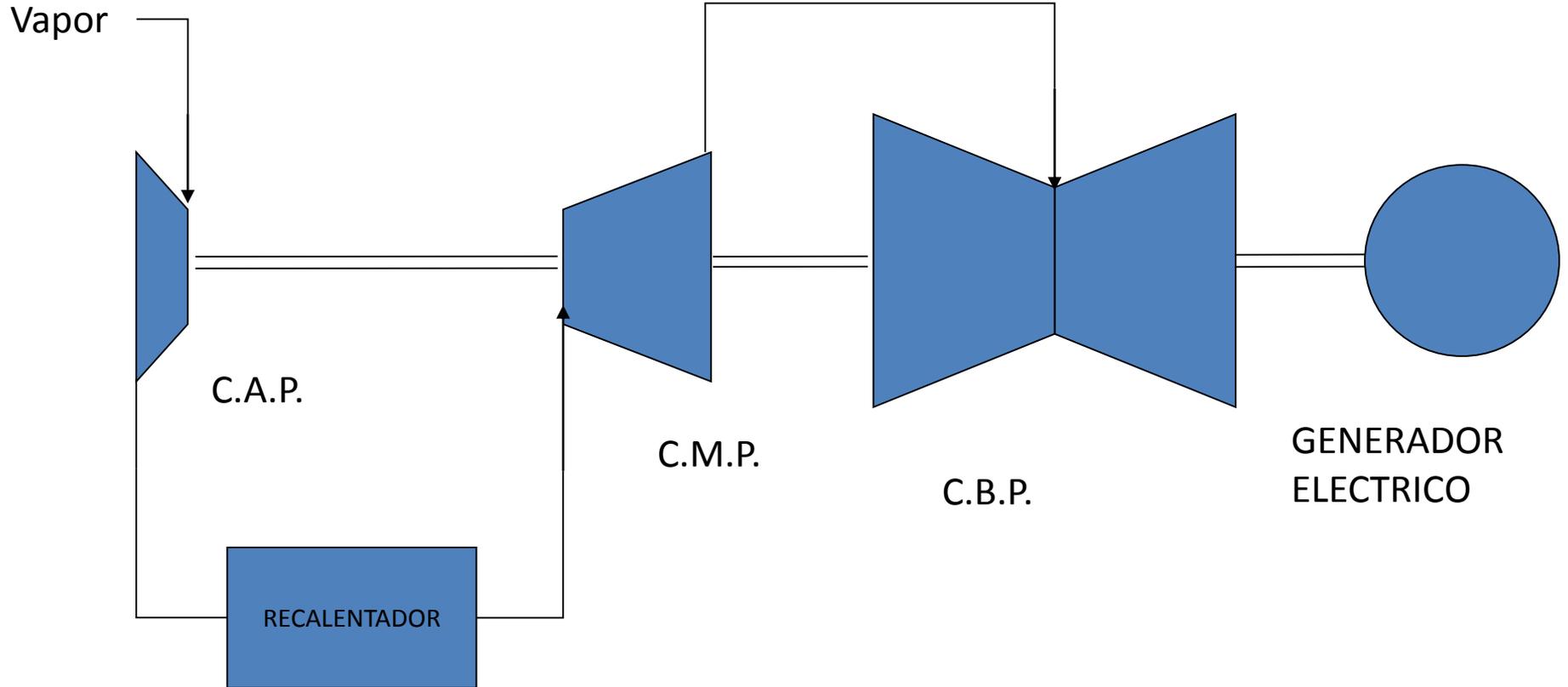
CAP: Cilindro de Alta Presión

CBP: Cilindro de Baja Presión

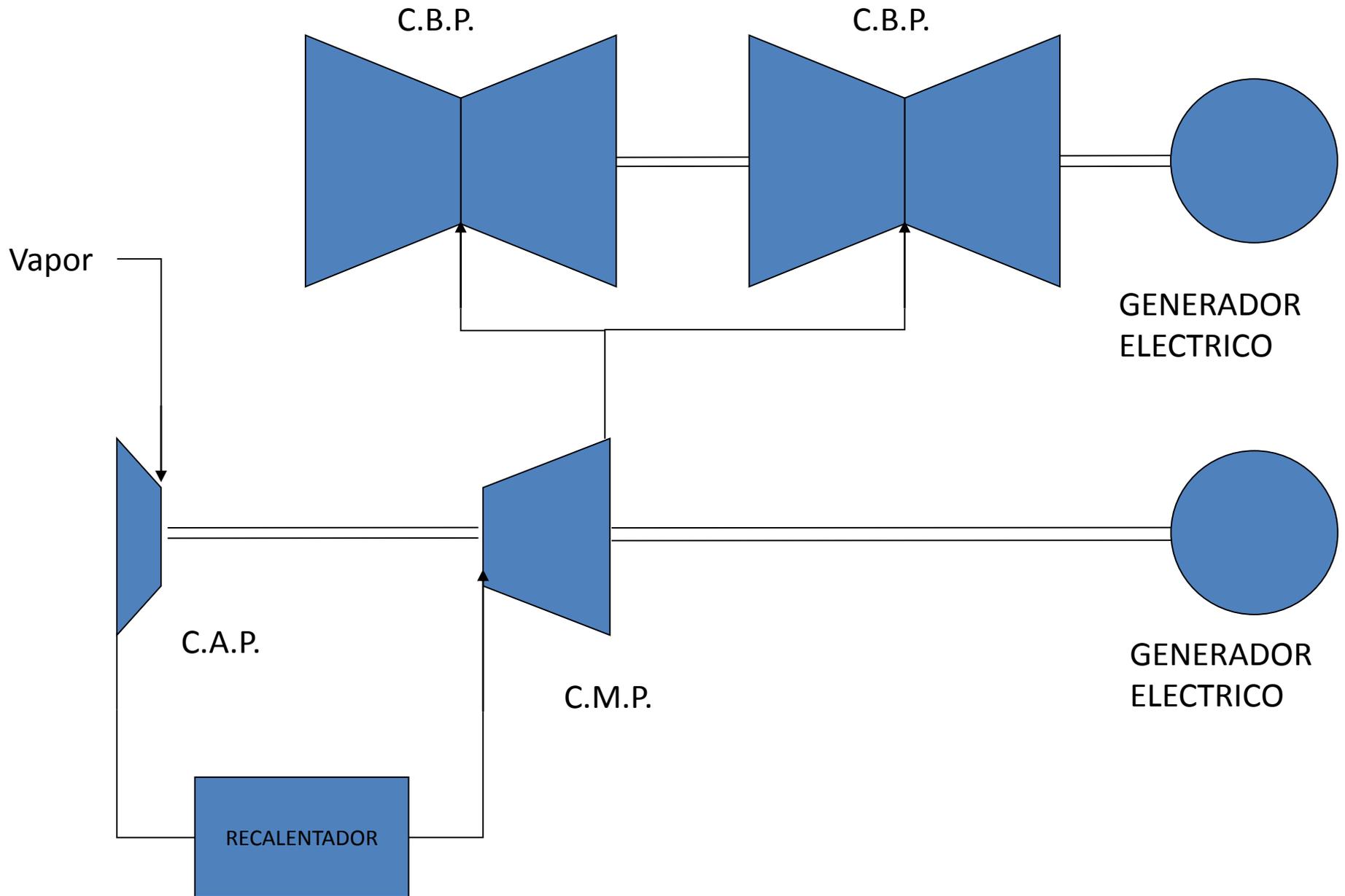
CMP: Cilindro de Media Presión

5. Turbinas de vapor y de gas.

TURBINAS DE VAPOR: CONFIGURACIONES

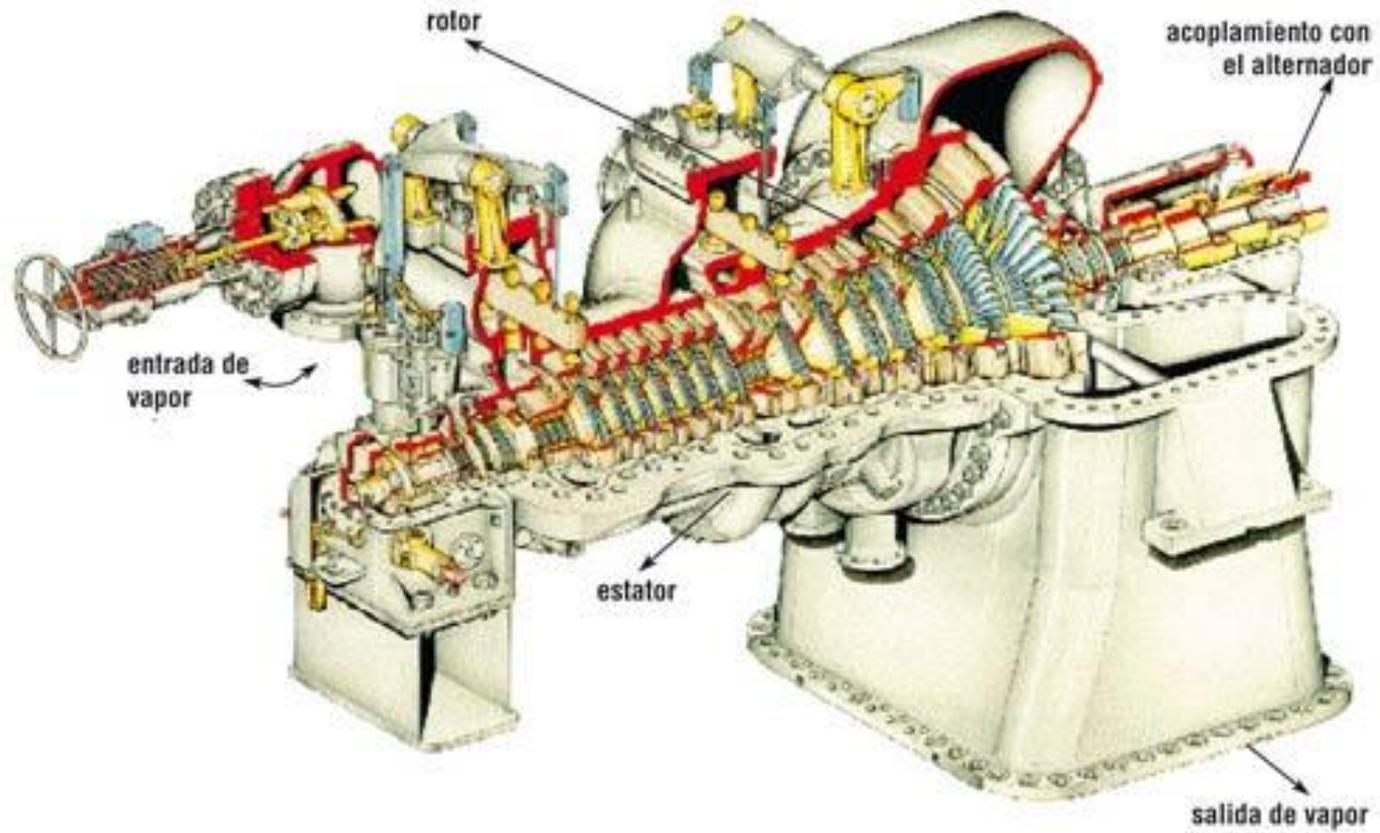


5. Turbinas de vapor y de gas.



5. Turbinas de vapor y de gas.

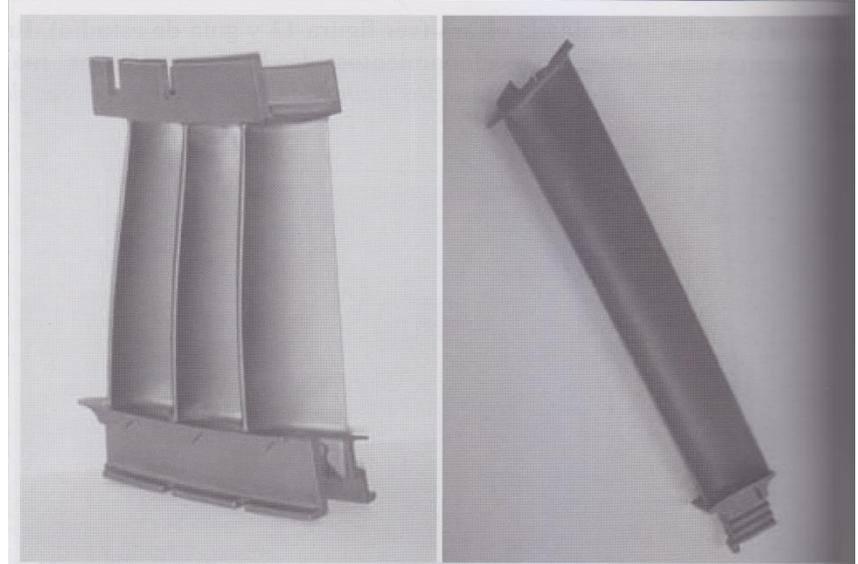
TURBINAS DE VAPOR



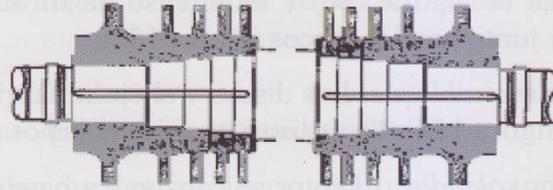
5. Turbinas de vapor y de gas.



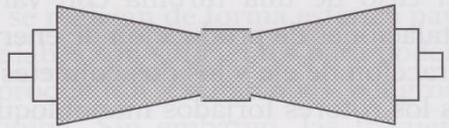
5. Turbinas de vapor y de gas.



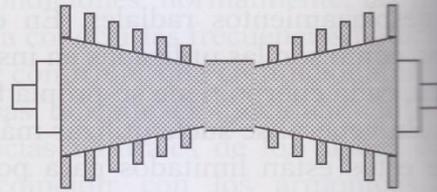
5. Turbinas de vapor y de gas.



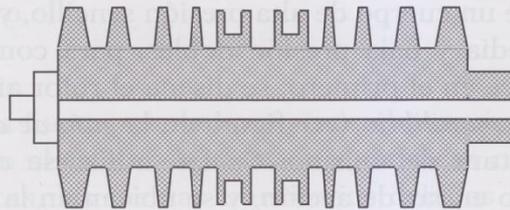
a) Rotor con discos o multicelular



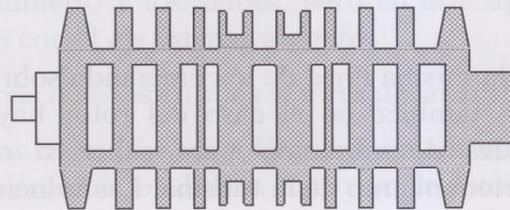
b) Rotor tipo tambor para turbinas de reacción



c) Rotor tipo tambor para turbinas de acción

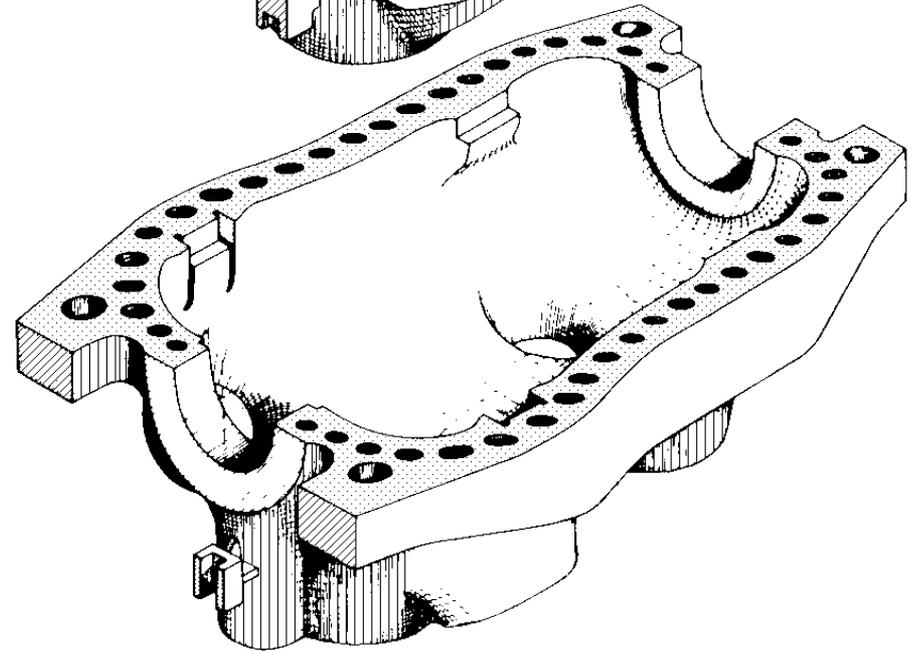
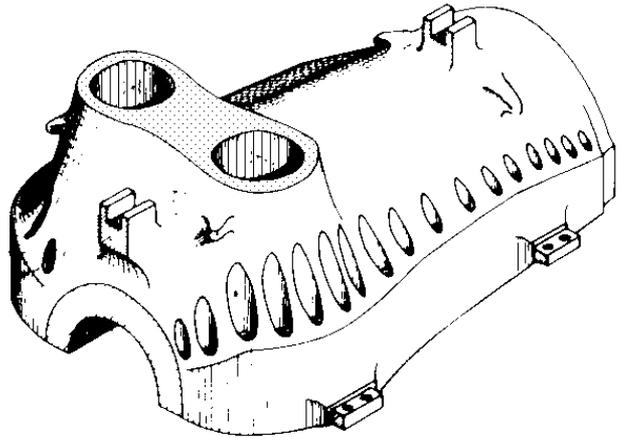
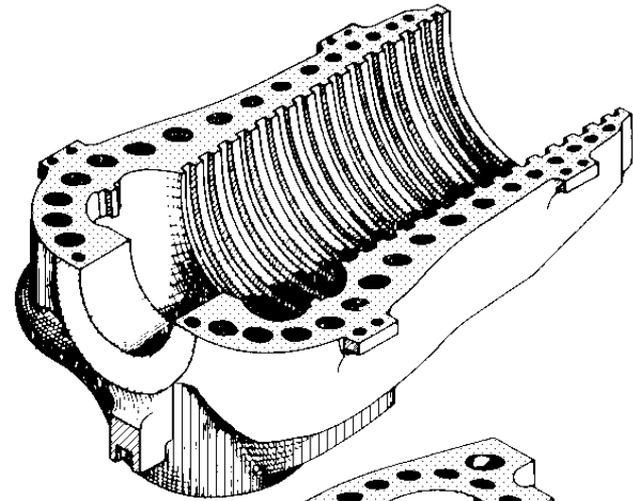
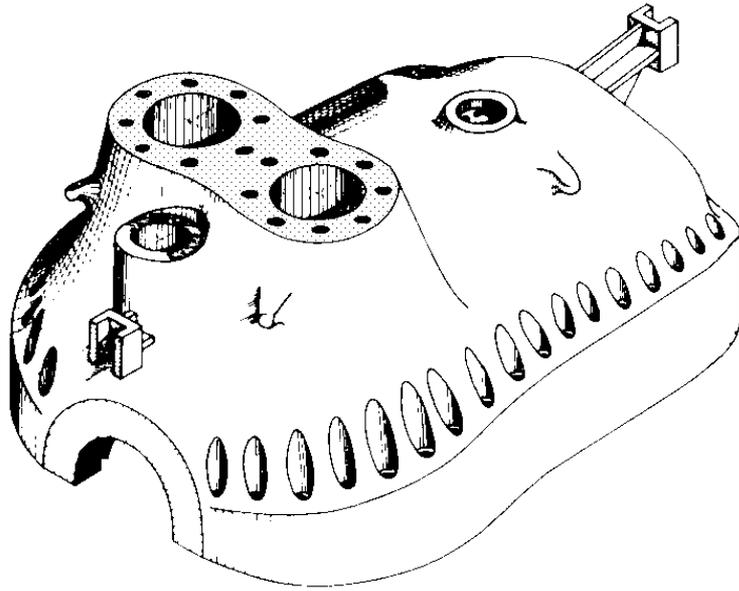


d) Rotor integral o monobloque



e) Rotor con discos soldados

5. Turbinas de vapor y de gas.



5. Turbinas de vapor y de gas.

- Según el número de etapas o escalonamientos:

- 1) Turbinas monoetapa, son turbinas que se utilizan para pequeñas y medianas potencias.
- 2) Turbinas multietapa, aquellas en las que la demanda de potencia es muy elevada, y además interesa que el rendimiento sea muy alto.

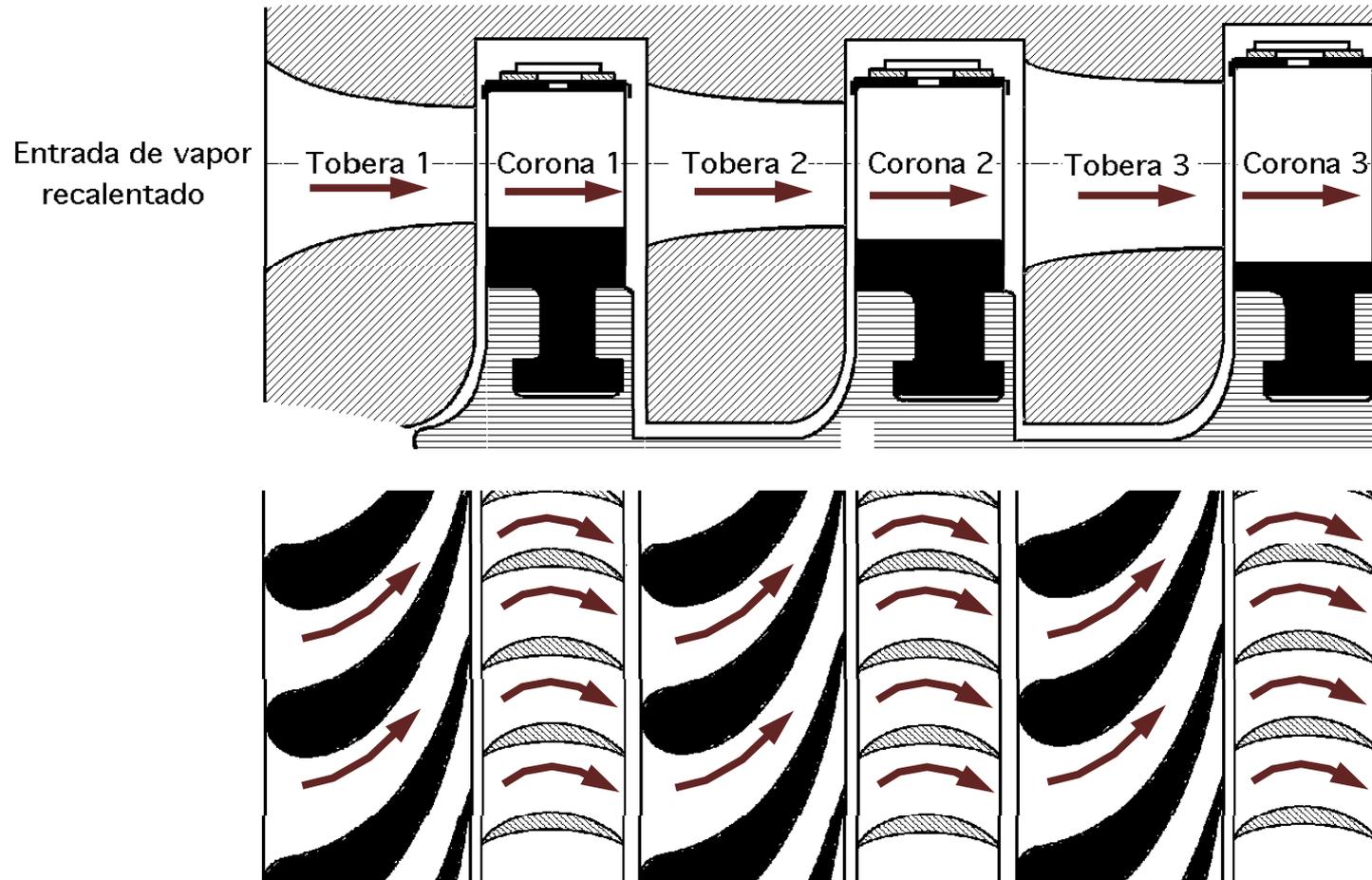
- Según la presión del vapor de salida:

- 1) Contrapresión, en ellas el vapor de escape es utilizado posteriormente en el proceso.
- 2) Escape libre, el vapor de escape va hacia la atmósfera. Este tipo de turbinas despilfarra la energía pues no se aprovecha el vapor de escape en otros procesos como calentamiento, etc.
- 3) 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 dirección del flujo en el rodete.

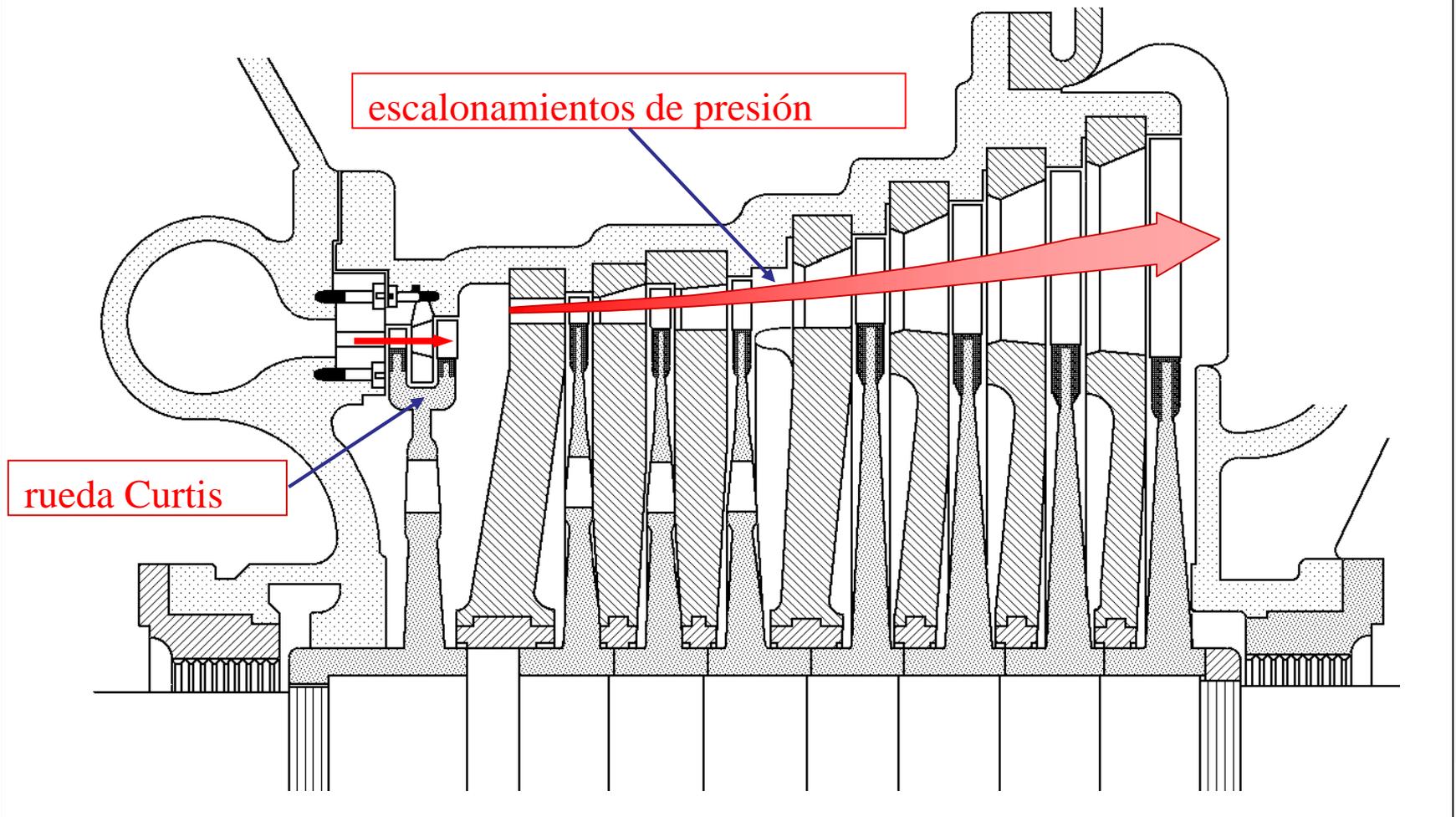
- 1) Axiales, el paso de vapor se realiza siguiendo la misma trayectoria que el que la turbina. Es el caso más normal.
- 2) Radiales, el paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina.

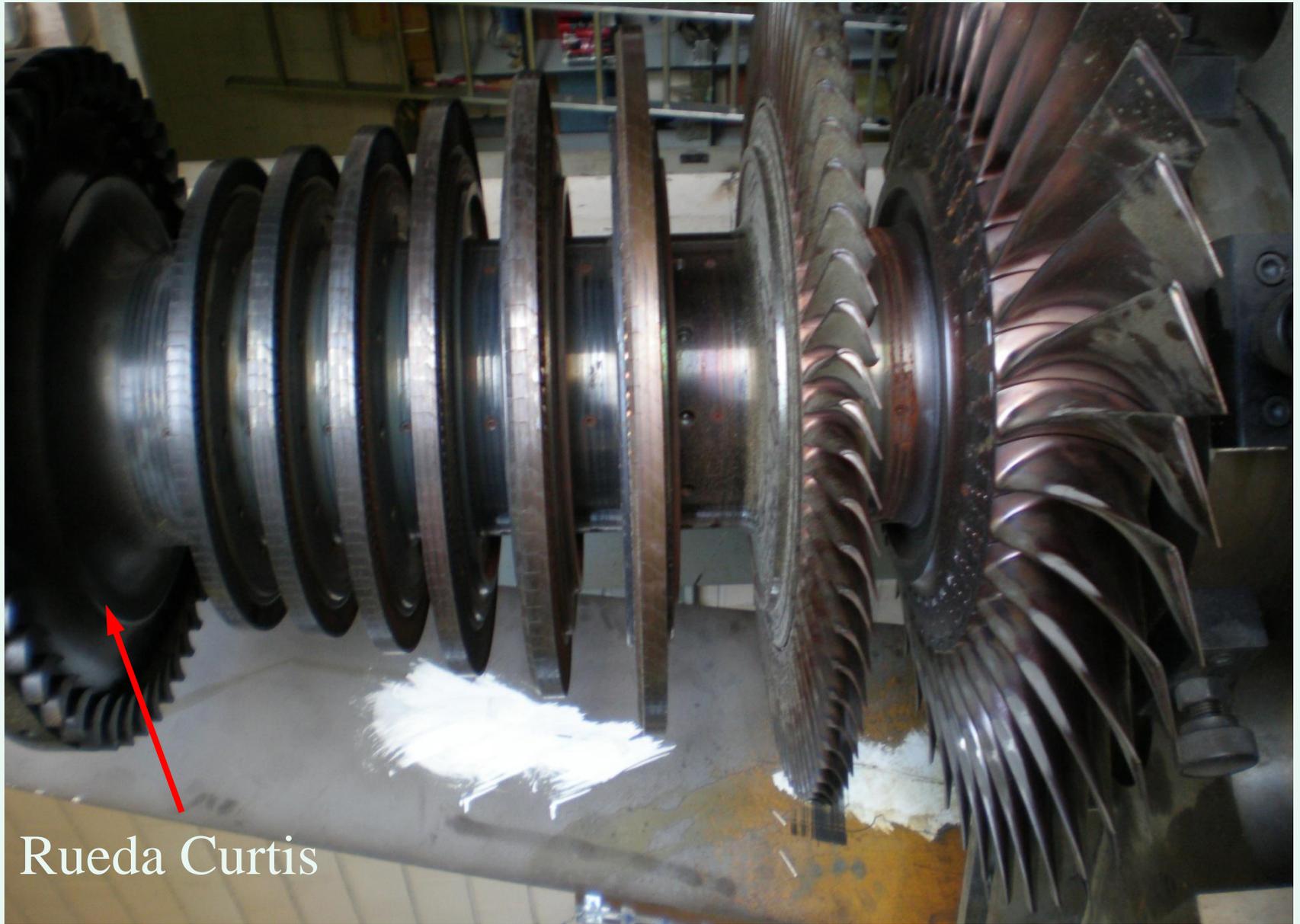
- Turbinas con y sin extracción.



Tres escalonamientos de presión

Turbina de acción con doble escalonamiento de velocidad y siete escalonamientos de presión





Rueda Curtis

DISEÑO DE UNA TURBINA

Salto entálpico: Cantidad de entalpía cedida por el fluido (\neq ideal)

Velocidad periférica: Velocidad lineal relativa de un punto situado en el rodete móvil de una turbina con respecto al eje de giro de la misma.

Rendimiento periférico: Razón entre la potencia comunicada al eje de la turbina y el salto entálpico producido.

Triángulo de velocidades: Composición geométrica a partir de cuyo trazado se puede deducir gráficamente los valores y direcciones de las distintas velocidades del fluido a su paso por la turbina.

Triángulos de velocidades

\vec{c} = **velocidad absoluta** (del flujo)

\vec{w} = **velocidad relativa** (del flujo) respecto al álabe móvil

\vec{u} = **velocidad tangencial** (del álabe móvil)

α = **ángulo** que forma la velocidad absoluta con la tangencial

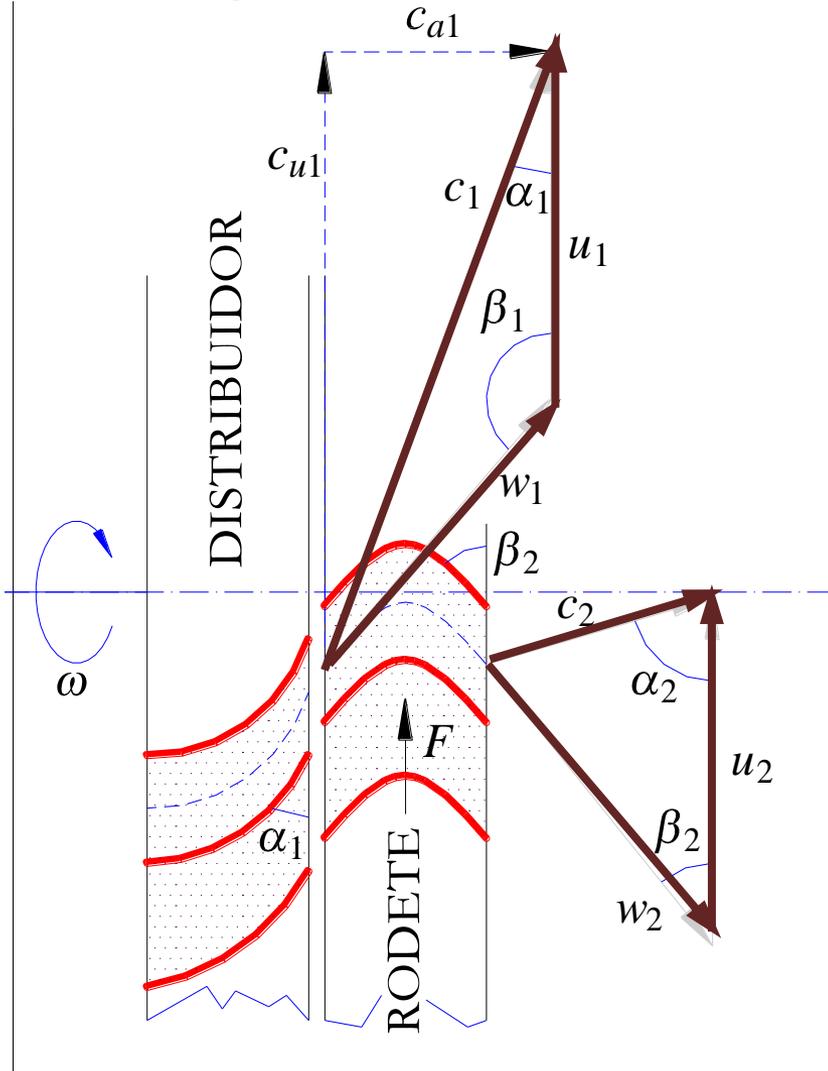
β = **ángulo** que forma la velocidad relativa con la tangencial

con subíndice ₍₁₎ para el triángulo de entrada en el rodete

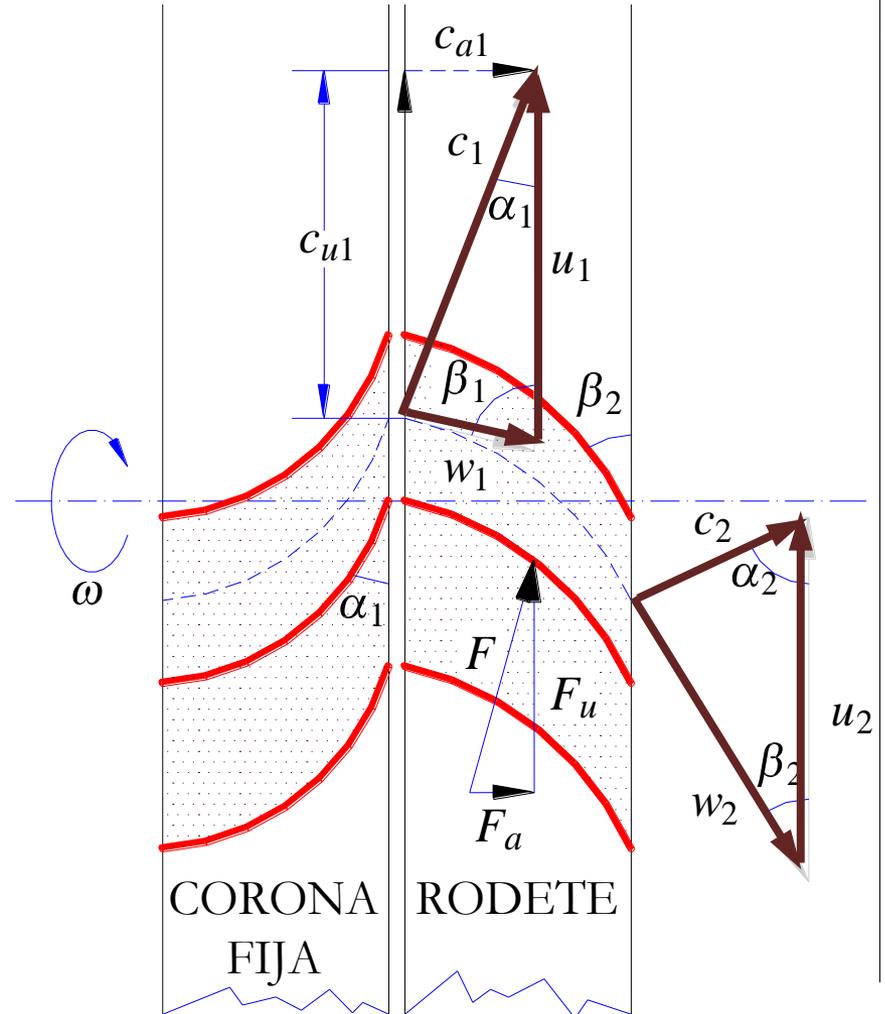
con subíndice ₍₂₎ para el triángulo de salida del rodete

Triángulos de velocidades

- c = velocidad absoluta (del flujo)
- w = velocidad relativa (del flujo) respecto al alabe móvil
- u = velocidad tangencial (del alabe móvil)
- α = ángulo que forma la velocidad absoluta con la tangencial
- β = ángulo que forma la velocidad relativa con la tangencial



Acción: No cambio



reacción

5. Turbinas de vapor y de gas.

Turbinas de gas

El chorro impacta contra los álabes es una mezcla de gases resultantes de la combustión del combustible empleado, en lugar de vapor de agua.

En la práctica, sin embargo, existe una diferencia importante, cual es que la turbina de gas posee una cámara de combustión en la cual se producen los gases residuales, a alta presión y temperatura, que son impulsados contra los álabes.

Además, en la cámara de combustión ha de introducirse un alto caudal de aire, por lo cual también se precisa de un compresor.

En estas turbinas, la presión atmosférica, por sí sola, no podría introducir en la cámara de combustión la gran cantidad de oxígeno que se precisa para quemar grandes volúmenes de combustible, y obtener grandes potencias.

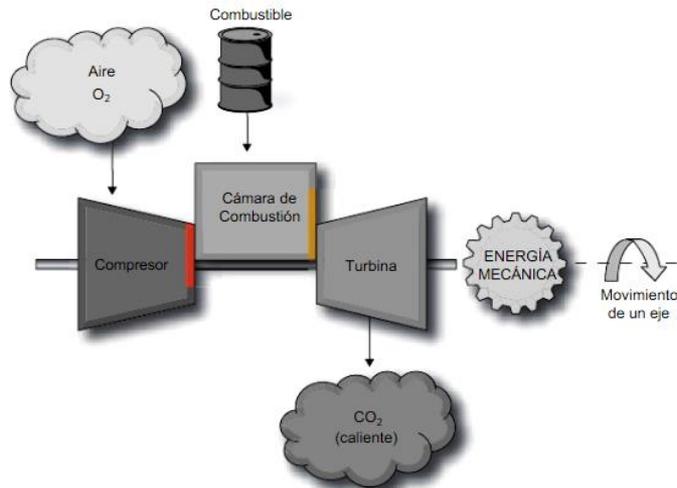


Figura 3.29. Componentes típicos de una turbina de gas.

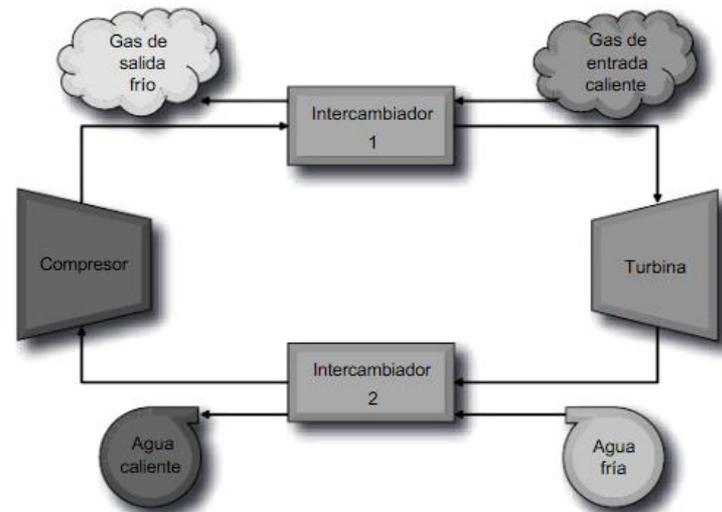


Figura 3.31. Esquema conceptual de una turbina de ciclo cerrado.

5. Turbinas de vapor y de gas.

TURBINAS DE GAS

