

## CENTRALES TÉRMICAS (apunte provisorio)

Las centrales térmicas son instalaciones que transforman energía térmica en energía eléctrica por medio de una serie de transformaciones energéticas. La energía térmica obtenida se la transfiere a un fluido de trabajo (agua, aire, fluido orgánico, etc.) que será usado para producir energía mecánica en un dispositivo adecuado (turbina). Como el eje de la turbina está solidario a un generador, se transformará la energía mecánica en energía eléctrica.

La energía térmica se la puede obtener de diferentes maneras, y esto da el nombre a cada Central:

**a) Central Térmica Convencional:** El calor se obtiene al liberarse la energía química contenida en un combustible fósil (gas natural, carbón, fuel oil, gasoil) mediante el proceso de combustión y transferirse a un fluido (en general agua) en una caldera. Estas centrales se dividen en: Turbo Vapor (TV), Turbo Gas (TG), Ciclo Combinado (CC, combinación de TV y TG) y Diesel (D).

Las centrales más difundidas son las TV (vapor a 500-550°C y 100-200 atm) que pueden usar fueloil ( $\eta=36\%$ ), carbón ( $\eta=47\%$ ) y gas. Las centrales CC ( $\eta = 58\%$ ) son las de mayor crecimiento y usan gas y gasoil. Para mejorar el  $\eta$  se deberá continuar con la aplicación de nuevas tecnologías asociadas al desarrollo de nuevos materiales que soporten mayores presiones y temperaturas (350 atm, 700 °C). Mejorar  $\eta$  es reducir emisión de CO<sub>2</sub>.

**c) Central Térmica de Biomasa (TV):** El calor se obtiene al liberarse la energía química contenida en la biomasa (residuos agroforestales, residuos sólidos urbanos, biocombustibles), mediante el proceso de combustión.

**d) Central Termonuclear:** El calor se obtiene al liberarse la energía nuclear de determinados materiales radiactivos (U235, Plutonio, etc.) en el proceso de fisión nuclear.

**e) Central Termosolar:** El calor se obtiene al captarse la energía solar directa y concentrarla por medio de espejos, en una línea o en un punto focal por donde se hace circular un fluido (aceite, aire, sales fundidas). Estas centrales se dividen en: Cilindro Parabólica, Torre Central, Disco Parabólico y Fresnel.

**f) Central Geotérmica:** El calor se obtiene de la energía geotérmica del interior de la Tierra (producida por desintegración radiactiva).

**g) Centrales de Cogeneración:** La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente, a partir de un solo recurso energético (fósil, biomasa, etc.), energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria, etc.). El  $\eta \approx 85\%$ .

Como  $\approx$  el 40 % de la electricidad proviene de centrales convencionales a carbón, la emisión de CO<sub>2</sub> producida es muy alta (las centrales de carbón son las que más emiten CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida  $\approx$  [1 kg CO<sub>2</sub>/kWh]) y por esta razón se sigue avanzando en el desarrollo de diferentes tecnologías que permitan usar el carbón, pero con menos emisión.

- **Centrales Térmicas de Combustión de Lecho Fluidizado:** El calor se obtiene al liberarse la energía química de un material combustible como el carbón, la biomasa, residuos pulverizados, etc., dentro de un lecho de partículas inertes, a través de las cuales se hace pasar una corriente de aire que forma remolinos, mejorando la transferencia del calor que se produce durante la combustión.
- **Centrales Térmicas de Gasificación Integrada en Ciclo Combinado (GICC):** El calor se obtiene del gas proveniente de la gasificación del carbón, biomasa, etc. Este proceso se realiza dentro de un Gasificador a presión, donde se transforma al combustible sólido en un ambiente bajo de  $O_2$ , en un gas sintético compuesto principalmente de  $CO$  y  $H_2$  (syngas). El syngas purificado se usa en una TG en un esquema de central de ciclo combinado.

La gasificación del carbón no es nueva (se usa desde mediados del siglo XIX), pero sí es relativamente nuevo la idea de usarla en una central de ciclo combinada.

- **Centrales Térmicas con Secuestro y Almacenamiento de  $CO_2$ :** Es una central convencional de carbón, que posee un sistema que permite secuestrar el  $CO_2$  producido durante la combustión y luego almacenarlo en depósitos subterráneos de gas o petróleo ya usados.

Las centrales termoeléctricas pueden ser clasificadas también, considerando si el combustible entra o no en contacto con el fluido de trabajo:

- a) **Unidad de Combustión Externa:** El combustible que se quema (gas natural, carbón, fueloil, gasoil, biocombustible, etc.) no entra en contacto con el fluido de trabajo (agua). Esto sucede en las TV.
- b) **Unidad de Combustión Interna:** El combustible (gas natural, gasoil, biocombustible, etc.) se quema en una atmósfera de aire, siendo los gases resultantes el fluido de trabajo. Esto sucede en las centrales TG y las unidades térmicas de pistón (motores Otto y Diesel).

## **Combustibles Fósiles**

### **Carbón**

El carbón se forma del proceso de fosilización de plantas durante millones de años. Fosilizar es sustituir la materia orgánica original, por compuestos minerales. El grado distinto de carbonización (incremento de contenido de carbón en cuanto disminuye el contenido de volátiles) divide a los tipos de carbón. Por ejemplo el poder calorífico normalizado del carbón bituminoso es de 6000 [kcal/kg]. Era el recurso más importante hasta mediados del SXX. Toma actualmente el 25% de la Energía Primaria. Sus reservas son grandes (400 años). Es el principal recurso en la generación eléctrica (40 %), fabricación de cemento y acero. Está limitado actualmente su uso por los IA (CO<sub>2</sub>), aunque hay nuevas tecnologías más limpias (gasificación). El CO<sub>2</sub> producido en su combustión en centrales eléctricas, puede ser secuestrado y almacenado en reservorios ya usados de gas o bajo el fondo del mar. Toda esta tecnología es todavía muy cara. El carbón continuará siendo muy importante para diversas economías, tales como la China, India, etc.

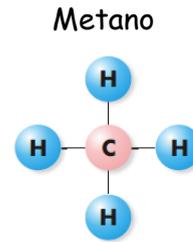
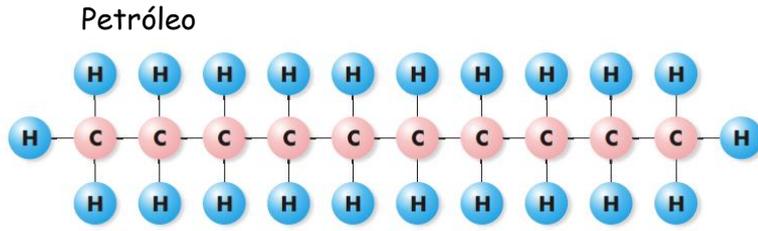
### **Petróleo**

El petróleo y el gas natural son productos de acumulaciones extraordinarias de animales microscópicos (plancton) y plantas del mar, muertos y sepultados hace unos 100 millones de años y que se fosilizaron (no provienen de los dinosaurios). Presentan dos características principales: su densidad y su contenido de sulfuros. La ventaja es una combinación doble: gran poder calorífico y su condición de líquido (extracción, transporte y almacenamiento fácil y barato). De las refinerías salen naftas, gasoil, fueloil. Es el recurso principal para el transporte. Con la producción actual el punto medio de la reserva potencial está alrededor del 2015, después del cual no se podrá incrementar la producción de manera económica (punto llamado Peak Oil). Nuevas tecnologías de extracción y costos menores hacen posible tener petróleo no convencional. Las principales economías tienen políticas dirigidas a asegurarse el suministro de petróleo. En general se encuentra gas natural en los depósitos de petróleo.

### **Gas Natural**

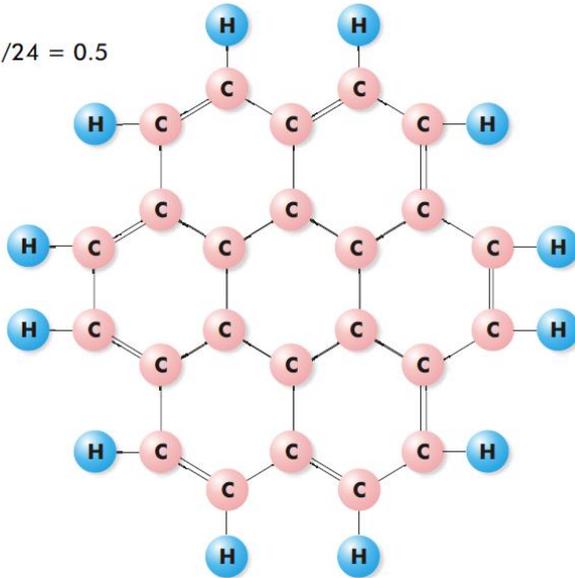
El transporte y almacenamiento es costoso comparado con el petróleo y carbón, requiriéndose equipo especial por la volatilidad del gas. Además son bajas las [cal/volumen]. El gas debe ser extraído de grandes profundidades o zonas con climas extremos y se encuentra en general lejos de la demanda, por lo que debe ser transportado en gasoductos. También se lo puede licuar (-161,5 °C y así reducir su volumen 1/600) obteniéndose GNL (gas natural licuado) y luego transportarlo en barcos metaneros (con capacidad de hasta 250000 m<sup>3</sup>). Este enfriamiento se lo realiza en cascada de varias etapas. Hay otros procesos tecnológicos donde se reduce el número de etapas mezclando refrigerantes. El gas es el combustible que más rápido crece su demanda. Tiene bajo IA, lo que lo hace más competitivo. Este crecimiento viene de la mano de su uso en Centrales eléctricas (baja inversión/MWh, alto rendimiento, bajo IA), industrias y residencial y no tanto en el transporte. Argentina es muy dependiente del gas para su generación eléctrica (en el orden de 60%).

El petróleo es un hidrocarburo cuya fórmula general es :  $C_nH_{2n+2}$  (p. ejemplo el metano es  $CH_4$ )



La estructura del carbón:

Carbón  
 $H/C = 12/24 = 0.5$



Cuando se quema un combustible fósil se emiten gases como  $CO_2$ ,  $SO_x$  y  $NO_x$ , cuyas proporciones dependen del tipo de combustible y de la temperatura a la cual se está quemando.

**Nota:** la palabra nafta proviene del persa naft. Los judíos llamaron Nafta a un lugar donde había un líquido aceitoso que se quemaba en las ceremonias religiosas. Luego ese líquido se pasó a llamar petróleo (aceite de piedra).

Composición del Gas Natural (PCI - Poder calorífico inferior de 8400-9000 kcal/Nm<sup>3</sup>)

Componente	Símbolo	%
Dióxido de carbono	$CO_2$	1.98
Metano	$CH_4$	91.99
Etano	$C_2H_6$	3.99
Propano	$C_3H_8$	0.81
Iso Butano	$C_4H_{10}$	0.13
N Butano	$C_4H_{10}$	0.21
Pentano	$C_5H_{12}$	0.05
Exano y >	$+C_6H_{14}$	0.09
Nitrógeno	N	0.75
Total		100.00

## Ciclo del Carbono

Ciclo de carbono: por medio de la fotosíntesis se forma materia orgánica (moléculas de glucosa) a partir de  $CO_2$ , agua y luz y en este proceso se libera  $O_2$ . La combinación de moléculas de glucosa forma la celulosa, base de la biomasa vegetal. El metabolismo de los animales es inverso, consume  $O_2$  y elimina  $CO_2$  y agua (respiración, transpiración). Es un proceso de combustión.

Cuando se quema el recurso fósil, se está usando reservas de carbono que han tardado millones de años en formarse y acumularse. El  $CO_2$  generado en la combustión, no encuentra un sumidero que los absorba en la medida que se genera, por lo que su concentración atmosférica aumenta contribuyendo al EI.

## Rendimientos

El consumo específico (heat rate), es la cantidad de energía térmica necesaria a la entrada del proceso, para obtener en la salida un kWh (entrada/salida), un  $n^\circ$  que expresa la inversa del rendimiento (salida/entrada). Habitualmente se expresa en [kcal/kWh]. En otras palabras, es el cociente entre la energía térmica aportada en forma de combustible (en realidad es energía química que se transforma en térmica mediante el proceso de combustión) y la energía eléctrica generada.

En una conversión sin pérdidas, se requiere 860 kcal para producir una unidad de energía eléctrica, es decir:  $860 \text{ kcal/kWh} \rightarrow \eta = 100\%$

En centrales térmicas, esa relación es: 1500 a 3000 kcal/kWh

En una central térmica, una parte del calor generado realiza trabajo en la turbina y la otra parte se pierde al medioambiente. En una TV por ejemplo, el calor se pierde fundamentalmente en dos lugares:

- En el condensador, parte del calor es entregado al ambiente en las torres de enfriamiento durante el proceso de condensado del vapor de salida de la última turbina.
  - En los gases de la combustión que escapan por la chimenea de la caldera.
-

## CENTRALES A VAPOR (CTV)

El fluido de trabajo que se usa en una TV, es vapor de agua producido en un generador de vapor a una temperatura y presión determinada. Se lo introduce en una turbina de tal manera que haga girar unos álabes unidos a un eje rotor; y a su salida, el vapor presenta una presión y una temperatura inferior, como consecuencia de haber cedido energía produciendo trabajo.

El fluido calo-transportador que se usa, es vapor de agua, dado su excelente característica de agente térmico, económico y conveniente para ser utilizado en procesos térmicos.

Si por ejemplo se tiene un recipiente con agua líquida a presión atmosférica constante y se le entrega calor, su temperatura aumenta progresivamente, hasta llegar a hervir. El calor entregado al agua en este proceso se denomina **calor sensible** (se siente que la temperatura aumenta). Si continuamos añadiendo calor luego de haber llegado a la temperatura de ebullición, ésta no aumenta, pero el agua se evapora progresivamente (zona de **vapor húmedo**), tomando cada vez más calor, hasta que llega a evaporarse por completo, transformándose en **vapor saturado seco**. El calor agregado en este proceso de cambio de fase se denomina **calor latente** (calor escondido, no se siente que la temperatura aumenta). Si se agrega más calor a este vapor, se convierte en **vapor sobrecalentado**.

**Experimento (Fig 1):** Se calienta agua desde  $0^{\circ}\text{C}$  hasta la temperatura de ebullición de  $100^{\circ}\text{C}$  y a presión atmosférica ( $1 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$ ). Para esto el agua toma  $100 \text{ [Kcal]}$  de calor sensible. Para transformar ahora esta agua caliente en vapor, se añaden  $539 \text{ [Kcal]}$  más como calor latente, obteniéndose vapor saturado seco, que se puede transformar en vapor sobrecalentado agregándole más calor. Todo este proceso se realiza a presión atmosférica. Si se cambia la presión cambia la trayectoria, y la proporción de calor sensible y latente aportada.

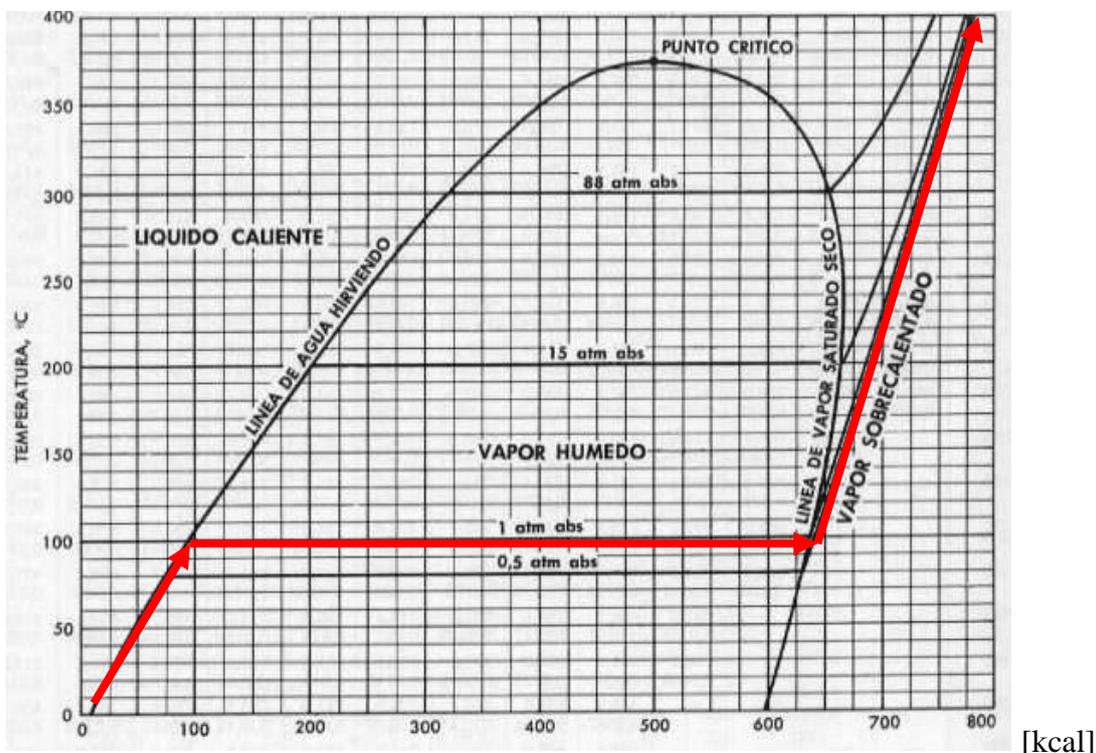


Fig 1.- Gráfico de calor y temperatura para el vapor de agua

## Ciclo de Carnot

El calor está asociado con la Ec de las moléculas que se mueven y chocan en forma azarosa y caótica. Ninguna máquina puede convertir completamente este caos (calor) en orden (energía eléctrica, energía potencial gravitatoria).

En la Fig. 2 se observa el esquema de una máquina de Carnot ideal que absorbe calor  $Q_1$  de una fuente caliente que está a una temperatura  $T_1$  y cede calor  $Q_2$  a una fuente fría que está a  $T_2$ , produciendo un trabajo sobre el exterior  $W$ .

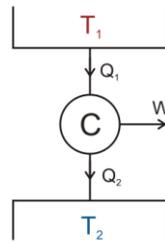


Fig. 2.- Máquina de Carnot

El rendimiento de esta máquina es el mayor que se pueda obtener en una máquina que funcione cíclicamente entre las mismas fuentes de temperatura ( $T$  en  $^{\circ}K$ ).

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

**Nota:** Máxima Temp. que soportan los materiales: aceros al C  $\rightarrow$  540  $^{\circ}C$ ; aceros inoxidable austeníticos  $\rightarrow$  600-650  $^{\circ}C$  o más (más caros).

El Ciclo de Carnot es un ciclo termodinámico ideal reversible que consta de cuatro etapas:

- dos procesos isotérmicos (a temperatura constante)
- dos procesos adiabáticos (no hay intercambio de calor con el medio, está aislado térmicamente). Como este ciclo es reversible un proceso adiabático es también isoentrópico.

Los ciclos termodinámicos pueden representarse por diagramas:

- P-V (Presión-Volumen)
- T-S (Temperatura-Entropía)
- i-S (Entalpía-Entropía).

En una Central eléctrica donde el vapor de agua entra a la turbina por ejemplo a 525  $^{\circ}C$  y se enfría a 24  $^{\circ}C$  en la etapa de condensación, el rendimiento máximo teórico es:

$$\eta_{teórico} = \frac{T(\text{entrada de turbina}) - T(\text{agua en condensador})}{T(\text{entrada de turbina})}$$

$$\eta_{teórico} = 62,8 \%$$

Las mejores centrales tienen un  $\eta$  muy por debajo de este valor teórico,  $\eta_{real} = 45 \%$

Si además el  $\eta$  del generador eléctrico es del orden del 90 %, la eficiencia total de la central es:  
 $\eta_{total} \text{ de la central} = 0,45 \times 0,9 \times 100 = 40 \%$

## CTV Básica

Se observa en la Fig. 3 una CTV básica formado por los elementos: Generador de Vapor, Turbina, Condensador y Bomba de agua de alimentación. Se observa la entrada de calor  $\dot{Q}_{in}$  en el generador de vapor (fuente caliente), la salida de calor  $\dot{Q}_{out}$  en el condensador (fuente fría), el trabajo producido por la turbina  $\dot{W}_{turbina}$  y el aporte de trabajo que se debe hacer a la bomba de alimentación  $\dot{W}_{bomba}$ .

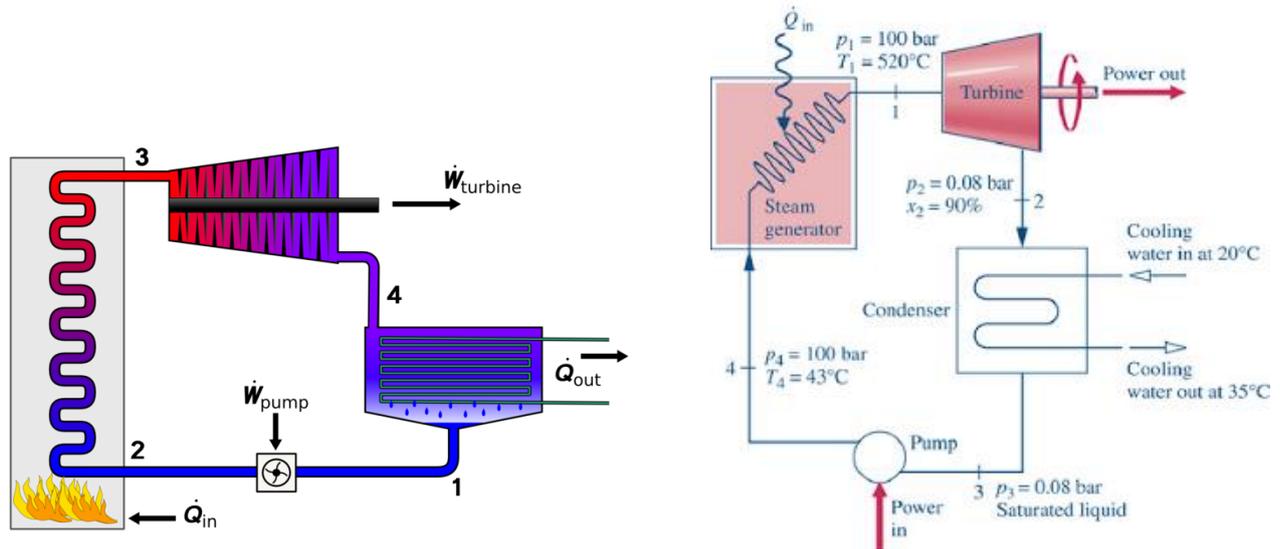


Fig 3.- Esquema de una CTV básica y valores característicos de presión y temperatura  
(1 atm = 1,01325 bar = 101 293 Pa)

Los 4 elementos básicos de una CTV básica son:

**Caldera:** Sistema a presión en el que el agua se transforma en vapor como producto final, por cesión de calor de una fuente a temperatura superior. Se reserva el nombre de caldera cuando la presión de vapor es baja y se denomina generador de vapor si el funcionamiento se efectúa a altas presiones de vapor.

**Turbina de Vapor:** Dispositivo encargado de aprovechar la energía térmica del vapor y transformarla en energía mecánica rotacional.

**Condensador:** Dispositivo formado por tubos por donde circula agua de refrigeración. Se encuentra inmediatamente después de la turbina (desde el condensador se puede ver la última fila de álabes). El vapor que sale de la misma se condensa en contacto con estos tubos. Una CTV tiene tanto mejor rendimiento cuanto más frío esté el vapor de escape a la salida de la turbina. También se aprovecha este dispositivo, para eliminar gases incondensables y nocivos, como el  $\text{O}_2$ , ya sea por métodos físicos o químicos como la hidracina.

Ejemplo: en una planta que entrega  $50 \text{ MW}_e$  de potencia eléctrica a plena carga, se requieren unos 2000 [lt/seg] de agua fría de refrigeración que circula por el interior de los tubos del condensador. Por el exterior de los tubos circula el vapor caliente, que al entrar en contacto con los tubos fríos se condensa, cediendo casi  $80 \text{ MW}_{th}$  de flujo energético al sistema de refrigeración (analizar los % del rendimiento térmico).

**Bomba de agua de alimentación:** Bomba encargada de impulsar el agua resultante de la condensación hacia la caldera.

Para esta CTV básica, se puede realizar su Ciclo de Carnot en un diagrama T-S (Fig.4).

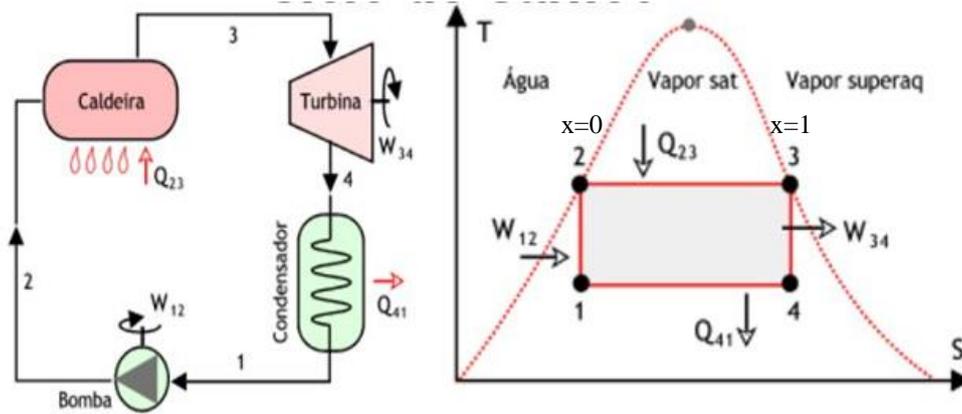


Fig. 4.- CTV básica y su Ciclo de Carnot

El rendimiento térmico de la CTV se puede calcular por medio de:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{P_{\text{neta}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{W_{\text{turbina}} - W_{\text{bomba}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}}$$

Se observa que la turbina trabajaría en la zona de líquido y vapor (trecho 3-4) lo que disminuiría su vida útil y eficiencia. Como la condensación es parcial (trecho 1-2) la bomba trabajaría con líquido y vapor.

**Nota:** El título  $x$  es el porcentaje de masa de vapor en una mezcla de líquido y vapor:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}}$$

El valor de  $x$  varía desde 0 (líquido saturado) hasta 1 (vapor saturado). La coexistencia de ambos se indica como vapor húmedo.

## Ciclo Rankine

Para la CTV básica, el ciclo que mejor la representa es el ciclo termodinámico Rankine ideal (Fig. 5), que convierte calor en trabajo y donde se observa que la condensación ahora es total.

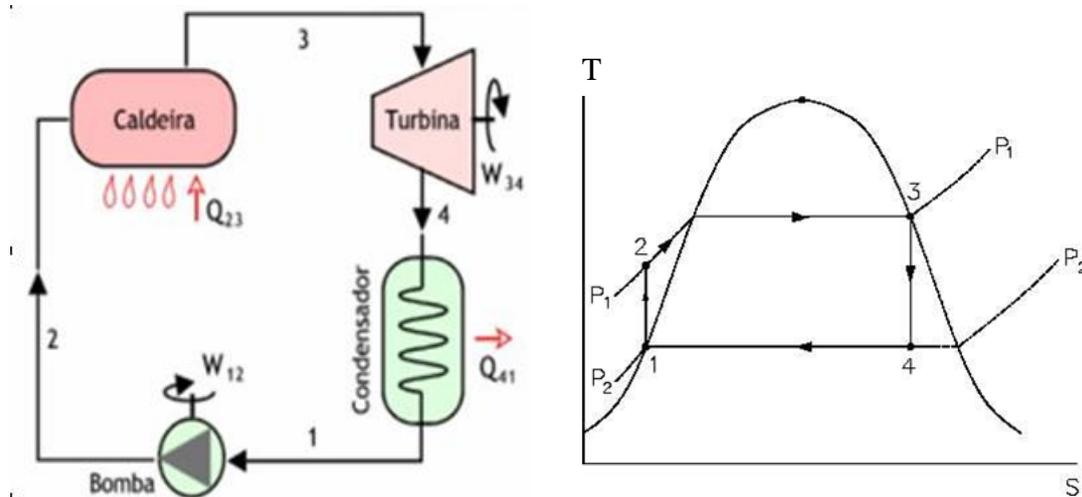


Fig 5.- Ciclo de Rankine de una CTV básica

### Etapas del Ciclo

*Segmento 1-2:* compresión adiabática del fluido realizada por la bomba de agua de alimentación de la caldera (el fluido comprimido es líquido). Los puntos 1 y 2 están muy próximos entre sí (en la Fig.5 está muy exagerada esta distancia). Aquí se aporta trabajo a la bomba. Esta etapa del ciclo de Rankine se diferencia con la del ciclo de Carnot ya que, en sentido estricto, para obtener la máxima eficiencia sería necesario realizar la compresión de un fluido bifásico, con la dificultad tecnológica que esto conlleva.

*Segmento 2-3:* calentamiento del líquido y evaporación a presión constante (isobárica) que se realiza en la caldera. Aquí se aporta calor al fluido.

*Segmento 3-4:* expansión adiabática del fluido en la turbina de vapor, realizando trabajo. Hay un límite práctico en el título  $x$  del estado 4 ( $x$  debe ser  $> 0,9$ , para evitar la presencia de muchas gotas de líquido que podrían erosionar los álabes de la turbina).

*Segmento 4-1:* condensación isobárica en el condensador. El calor retirado se vierte al foco frío (refrigerante). Por razones prácticas, la condensación se efectúa hasta el final (líquido saturado).

En la Fig 6 se observa el ciclo Rankine real, donde la compresión realizada por la bomba de alimentación y la expansión en la turbina no son isoentrópicos (no son reversibles), sino que aumenta durante estos procesos (hay un aumento de la entropía  $\Delta S$ ). Esto hace que la energía requerida por la bomba sea mayor, y que el trabajo de la turbina sea menor que el producido en el ciclo ideal.

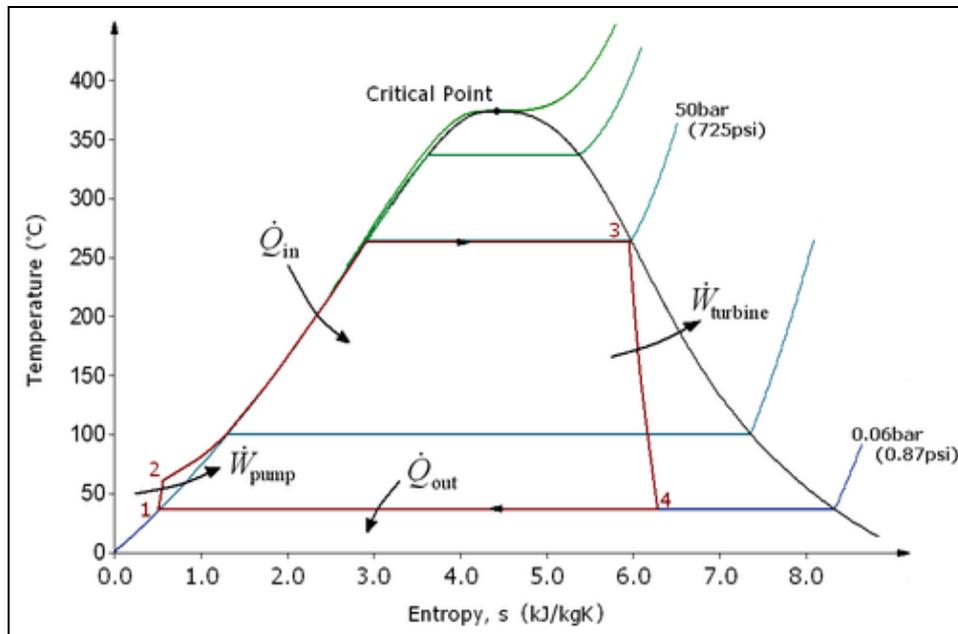


Fig 6.- Ciclo de Rankine real de una CTV básica

En las CTV, se realizan diferentes mejoras para lograr una mayor eficiencia y esto se puede observar en el ciclo de Rankine:

- Disminuir la presión en el condensador
- Aumentar la presión en la caldera
- Emplear vapor sobrecalentado (sobrecalentador)
- Emplear recalentador intermedio (recalentador)
- Precalentar el agua de alimentación (economizador)

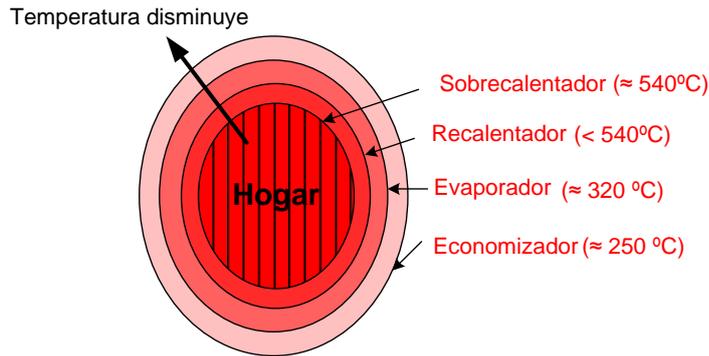
**Economizador:** intercambiador de calor situado a la salida de la chimenea para aprovechar los gases calientes residuales producidos en la combustión y precalentar el agua que entra a la caldera, aumentando el rendimiento de la instalación.

**Evaporador:** intercambiador de calor que aprovecha el calor de los gases de escape de temperatura intermedia, para evaporar el agua a la presión del circuito correspondiente. La circulación del agua a través de ellos puede ser forzada o natural, siendo que en la forzada se utilizan bombas y en la natural el efecto termosifón, aunque también se usan bombas en los momentos de arranque o cuando sea necesario, devolviendo el vapor al calderín.

**Sobrecalentador:** intercambiador de calor situado muy próximo al hogar (lugar más caliente), construido con el fin de sobrecalentar el vapor producido en la caldera, que se envía a la turbina de AP.

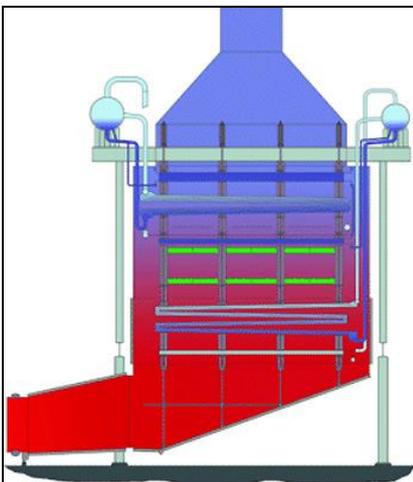
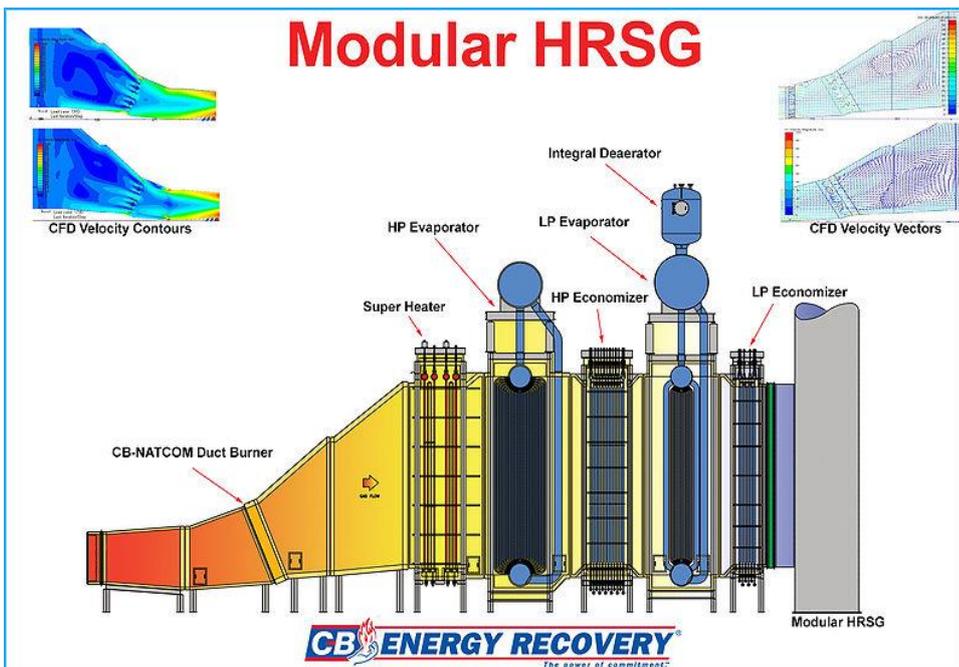
**Recalentador:** intercambiador de calor situado próximo al hogar, construido para elevar la temperatura del vapor de agua proveniente de la salida de la turbina de AP.

Conceptualmente la distribución espacial de los tubos es la siguiente:



Para conceptualizar esto, se muestra un Generador de vapor por recuperación de calor (HRSG) horizontal y vertical que se usa en centrales de Ciclo Combinado.

Un HRSG horizontal es aquel en la que los gases calientes de la combustión, siguen una trayectoria horizontal a través de los distintos módulos (sobrecalentador, recalentador, evaporador y economizador), hasta su conducción a la chimenea de evacuación. En uno vertical, los gases siguen una trayectoria vertical.



### CTV con economizador y sobrecalentador

Si se incorpora un economizador y un sobrecalentador en la CTV (Fig. 7), se observa como se modifica el ciclo de Rankine (Fig. 8) comparado con una CTV básica.

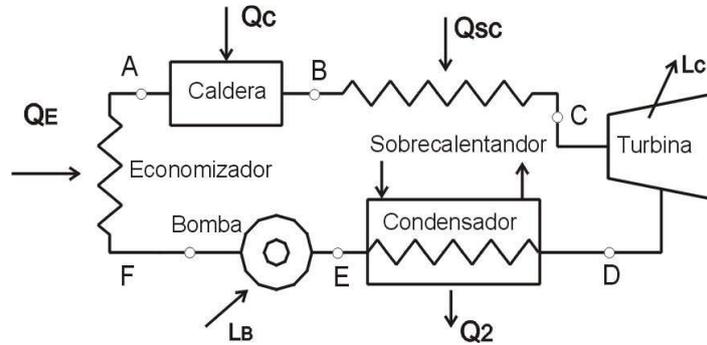


Fig 7.- CTV con economizador y sobrecalentador

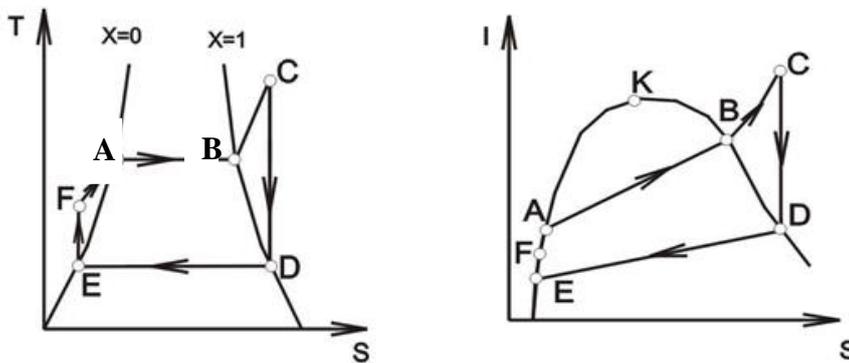


Fig 8.- Ciclo de Rankine ideal T-S e i-S, de una CTV con economizador y sobrecalentador

Como se expresó anteriormente las transformaciones no son isoentrópicas. Se observan las desviaciones del Ciclo Rankine ideal en la Fig. 9.

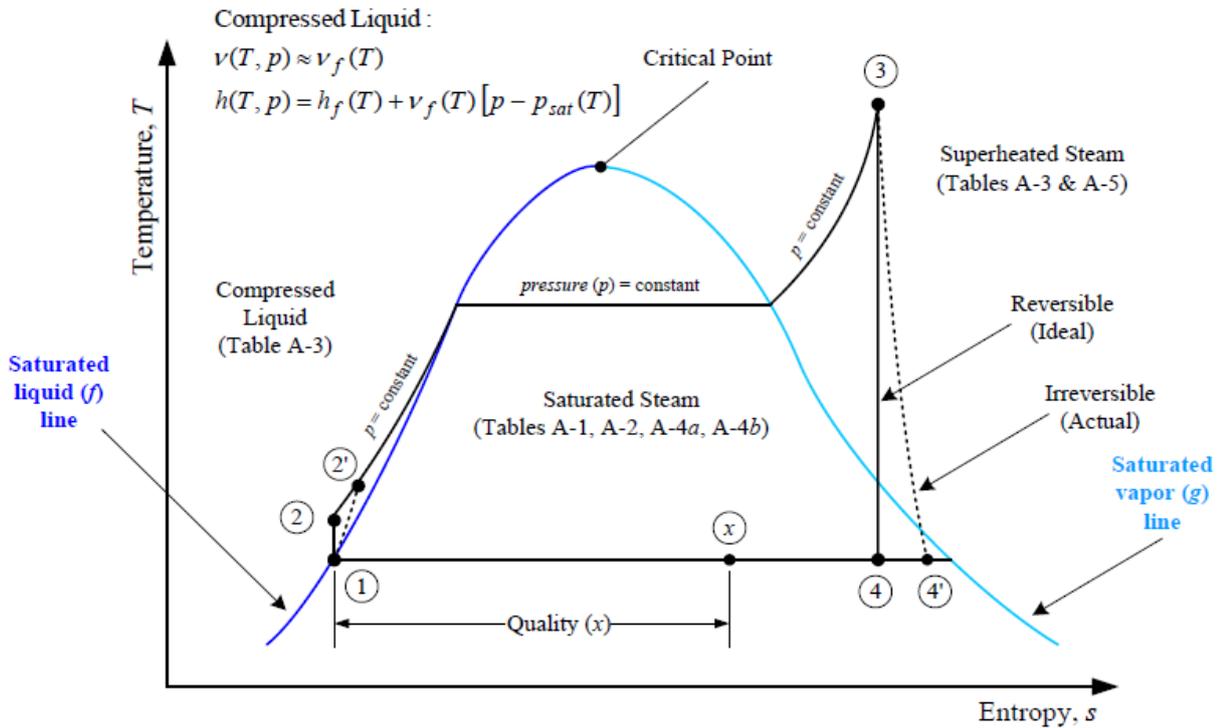


Fig 9.- Ciclo Rankine Ideal y Real

Las expresiones que dominan este proceso son:

$$\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2}: \text{ Pump: } (Q = 0; s_2 = s_1)$$

$$W_{pump}^{ideal} = \dot{m} (h_2 - h_1) \cong v_1 (p_2 - p_1)$$

$$W_{pump}^{actual} = \dot{m} (h_{2'} - h_1) \neq v_1 (p_2 - p_1)$$

$$\eta_{pump} = \frac{W_{pump}^{ideal}}{W_{pump}^{actual}} = \frac{\Delta h_{ideal}}{\Delta h_{actual}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

$$\textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4}: \text{ Turbine: } (Q = 0; s_4 = s_3)$$

$$W_{turb}^{ideal} = \dot{m} (h_3 - h_4)$$

$$W_{turb}^{actual} = \dot{m} (h_3 - h_{4'})$$

$$\eta_{turb} = \frac{W_{turb}^{actual}}{W_{turb}^{ideal}} = \frac{\Delta h_{actual}}{\Delta h_{ideal}} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4}$$

$$\textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3}: \text{ Heating: } (W = 0)$$

$$Q_{add} = \dot{m} (h_3 - h_{2'})$$

$$\textcircled{4} \rightarrow \textcircled{1}: \text{ Condenser: } (W = 0)$$

$$Q_{cond} = \dot{m} (h_{4'} - h_1)$$

La temperatura máxima que puede adquirir el vapor sobrecalentado está normalmente limitada por los materiales empleados en la zona de sobrecalentamiento de la caldera. Está en el orden de los 540°C.

La presión máxima está limitada por problemas de diseño mecánico de la turbina y por la humedad admisible a la salida de la misma (10%). Está en el orden de los 150 bar.

La presión mínima es función de la temperatura del condensador y su magnitud suele estar situada en el intervalo de 0,03 bar a 0,14 bar, lo que corresponde a una temperatura del condensador de 26°C y 52°C, respectivamente.

### CTV con economizador, sobrecalentador y extracciones

Para aumentar el rendimiento térmico del conjunto, es conveniente que el agua de alimentación entre en la caldera ya caliente, por lo que se hace pasar previamente por los circuitos secundarios de uno o más precalentadores, calentados por las **extracciones** (sangrías) de vapor de las turbinas, y por uno o más economizadores, calentados por los gases de escape antes de su salida a la atmósfera por la chimenea (Fig. 10).

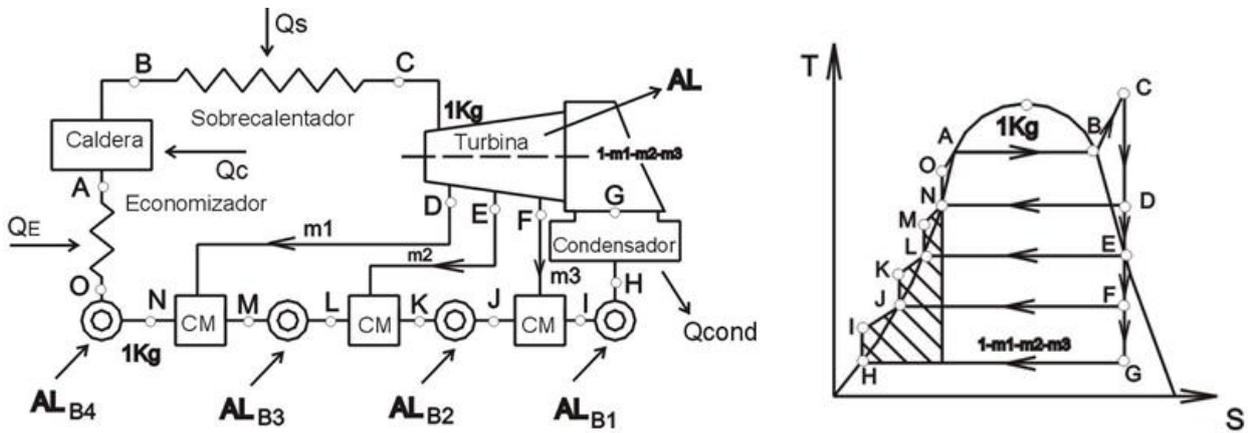
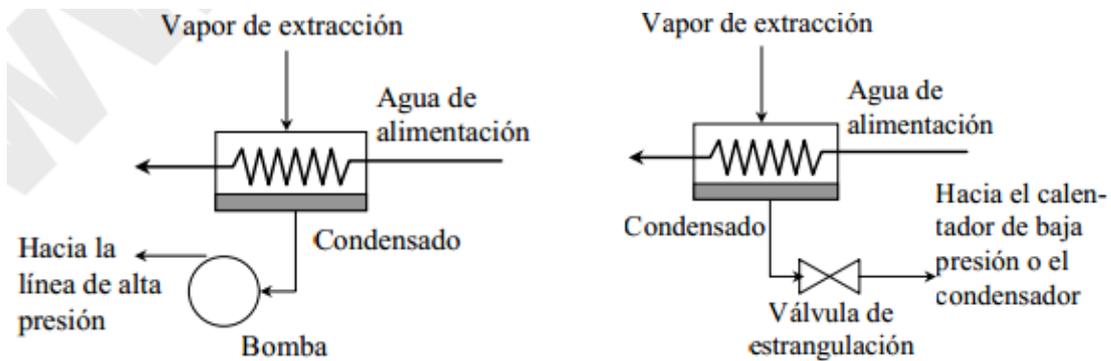


Fig.10.- CTV con economizador, sobrecalentador y extracciones y su Ciclo Rankine T-S ideal

### Calentadores Cerrados CM

Son intercambiadores de calor tipo carcasa y tubos. El vapor extraído condensa en el exterior de los tubos. Dos posibles diseños:

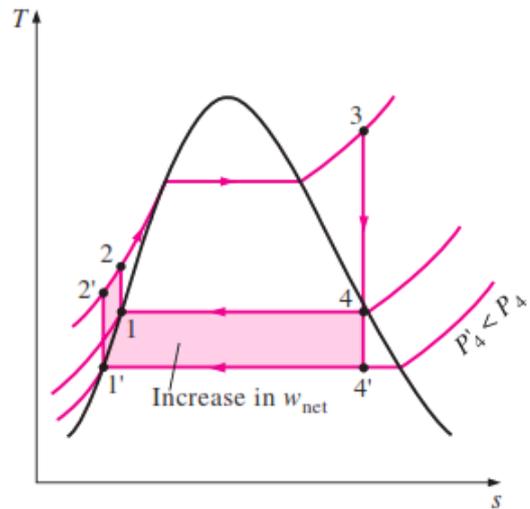




Las diversas medidas para aumentar la eficiencia del Ciclo Rankine ideal se pueden observar en las Fig. 12, 13 y 14:

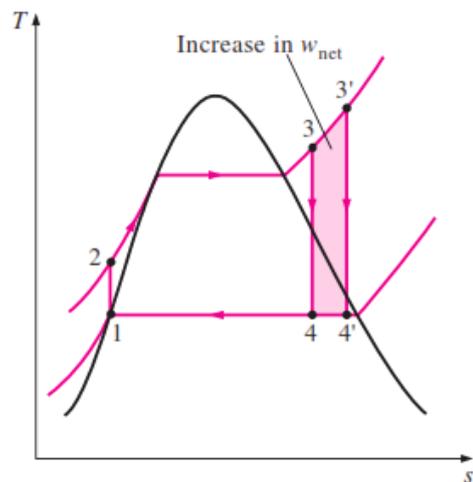
a) Reducción de la presión del condensador:

La temperatura de condensación del vapor depende fundamentalmente del sistema de enfriamiento que se disponga (mar, río, torre de enfriamiento). Los intervalos habituales son 30-45 °C. Es importante notar que la presión en el condensador no viene determinada por la salida de la turbina de baja, sino al revés: la presión en el condensador determina la presión de escape de la turbina, y esta presión depende sobre todo de la temperatura del refrigerante empleado y su caudal.



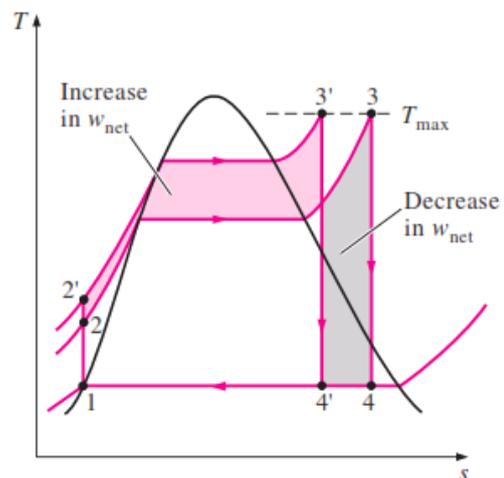
b) Sobrecalentar el vapor a altas temperaturas:

Si se produce vapor sobrecalentado en vez de vapor saturado, se aumenta la temp. media del vapor en la caldera, y además se evitan los títulos bajos a la salida de la turbina. El límite de sobrecalentamiento del vapor lo impone la resistencia térmica del material en los tubos de la caldera (resistencia mecánica y resistencia a la oxidación. La decisión del material se realiza por estudios económicos.



c) Incrementar la presión de caldera

El inconveniente del aumento de la presión del vapor en la caldera es que el vapor de escape de la turbina tenga título bajo, lo que provoca erosión en los álabes de la turbina.



Es importante señalar que la disminución en la temperatura de condensación del vapor, frente a la misma proporción en el incremento de la temperatura del vapor sobrecalentado que ingresa a la turbina, resulta más conveniente en la generación de potencia útil, esto se debe a que las pérdidas térmicas incrementan acorde al aumento en la temperatura de trabajo del fluido de transferencia de calor.

El esquema general de una CTV es el siguiente (Fig. 15):

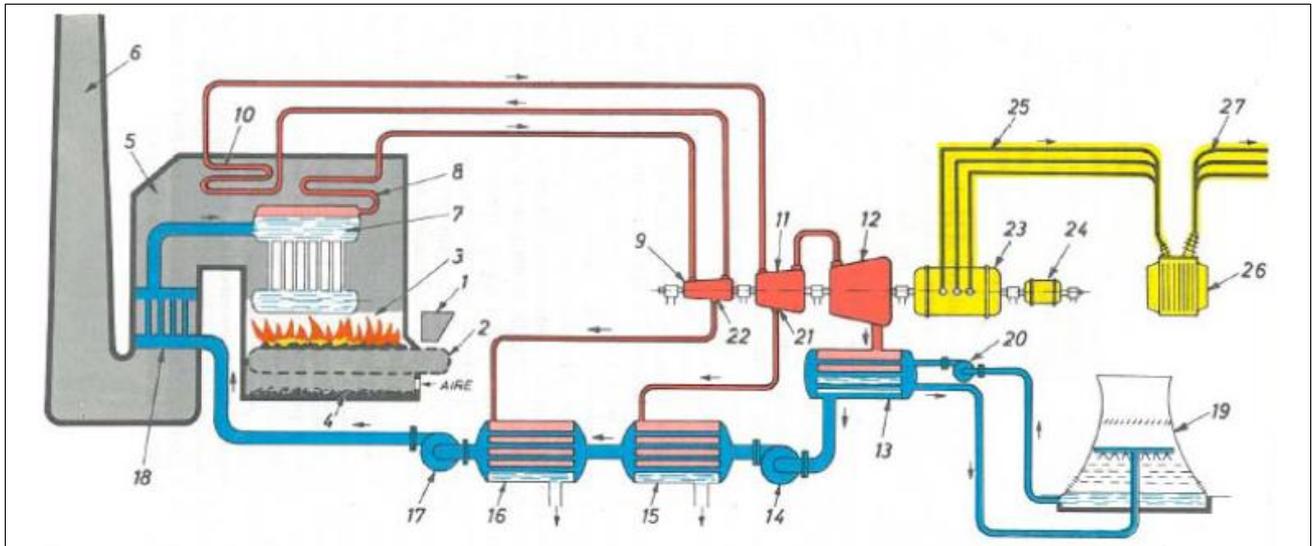


Fig. 15.- Representación esquemática de una CTV (Enciclopedia CEAC Centrales Eléctricas]

- 1: Tolva    2: Parrilla móvil    3: Hogar de la caldera    4: Cenicero    5: Depósito de humos  
 6: Chimenea de tiro natural o forzado    7: Caldera    8: Sobrecalentador    9: TV de alta presión  
 10: Recalentador intermedio    11: TV de media presión    12: TV de baja presión    13: Condensador  
 14: Bomba de extracción del condensado    15 y 16: Precalentadores del agua de alimentación  
 17: Bomba de alimentación de agua    18: Economizador    19: Torre de refrigeración  
 20; Bomba de circulación del agua de refrigeración    21 y 22: Extracción de vapor de TV de AP y MP  
 22: Extracción de vapor de TV de AP    23: Generador eléctrico    24: Excitatriz

Se puede observar en la Fig. 15 que existen los circuitos:

- Circuito del Agua Vapor (azul y rojo)
- Circuito de Agua del Condensador (azul)
- Circuito de los productos de combustión (gris)
- Circuito Eléctrico (amarillo)

También existen otros que no están marcados:

- Circuito de agua de reposición
- Circuito del combustible (será diferente dependiendo del tipo de combustible usado)

- Circuito de aceite de la turbina (sirve como elemento hidráulico del sistema de regulación de la turbina, accionando servomotores y otros mecanismos y otra como elemento lubricante de las partes móviles, como cojinetes, reductores, etc.)
- Circuito de hidrógeno para refrigeración del generador (El uso de hidrógeno como medio refrigerante permite la construcción de generadores más grandes y con más potencia nominal. Sin embargo, uno de los mayores problemas de este tipo de generadores es el peligro de explosión por una posible entrada de aire)
- Circuito del aire de alimentación
- Circuitos de regulación

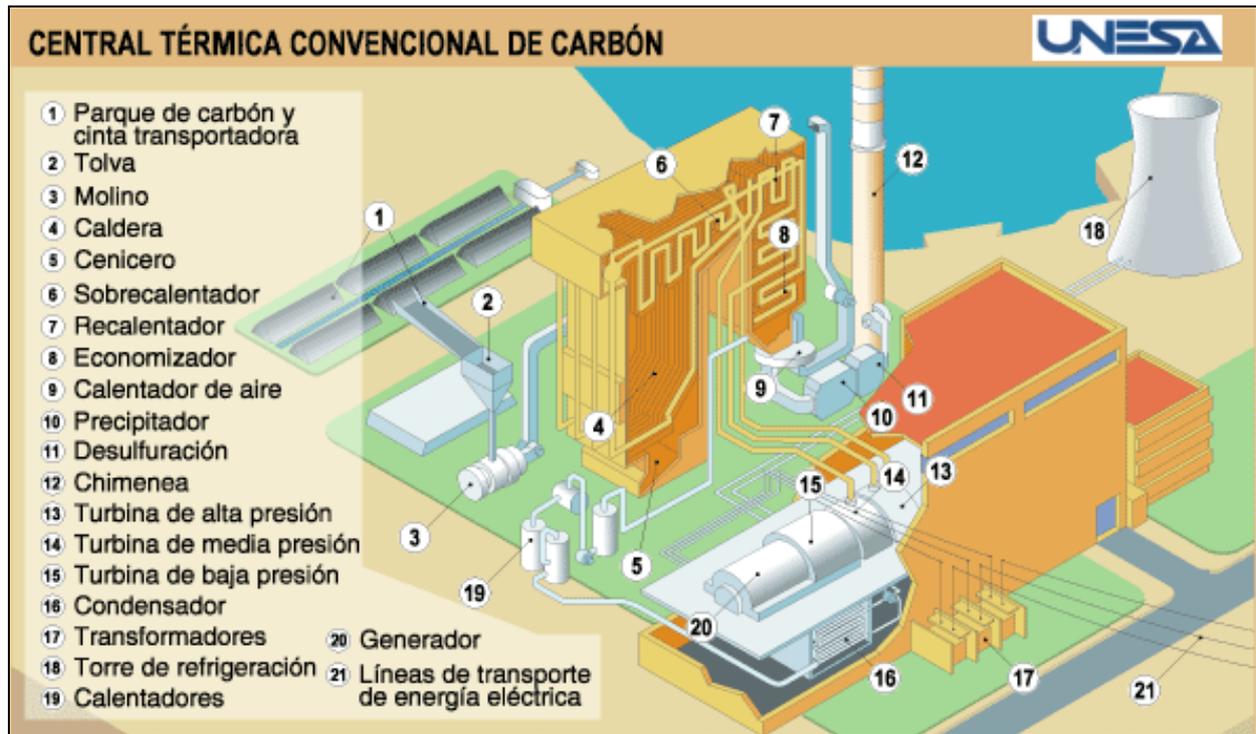
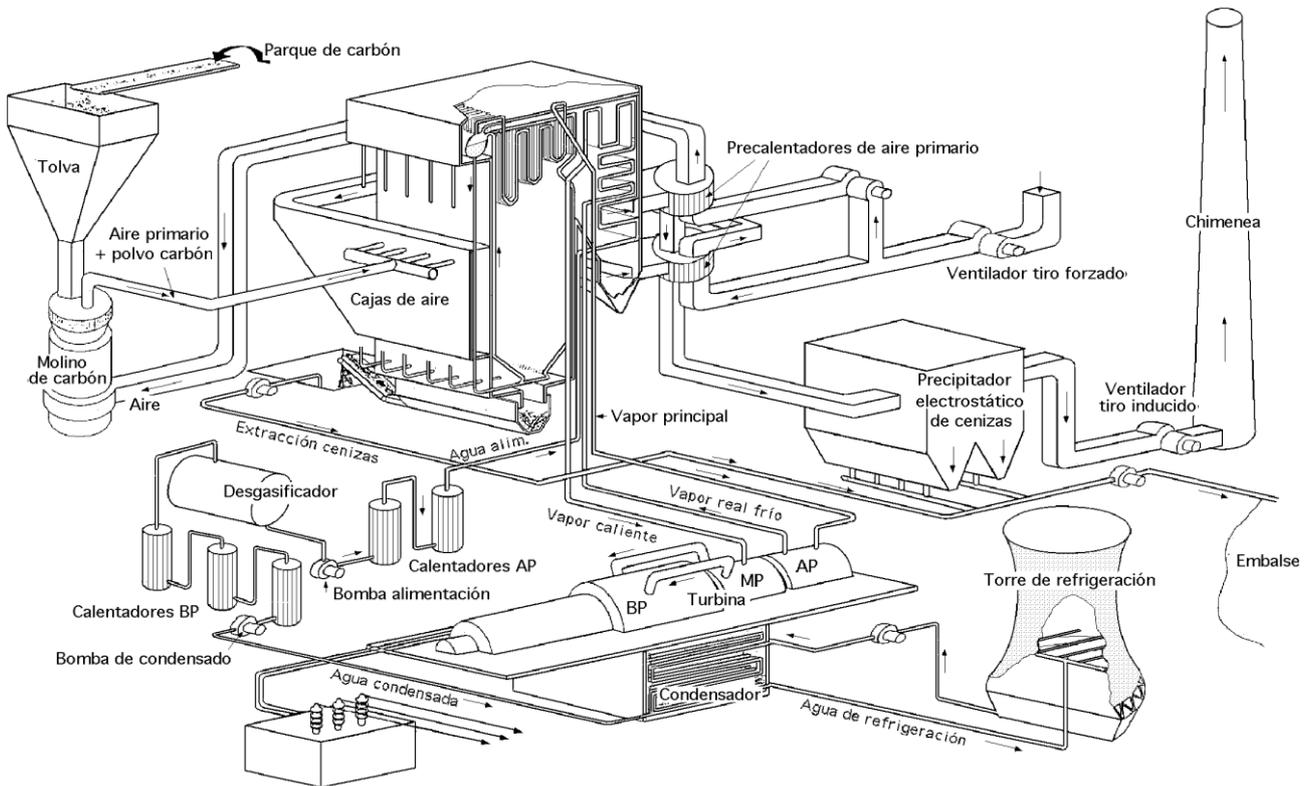
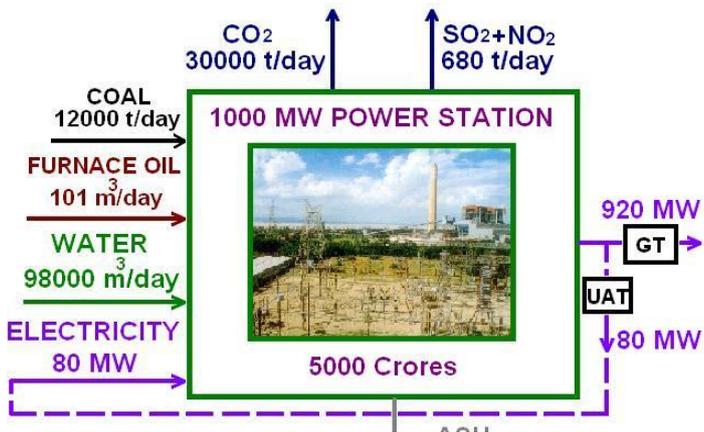


Fig. 16.- Representación esquemática de una CTV de carbón (www.unesa.es]

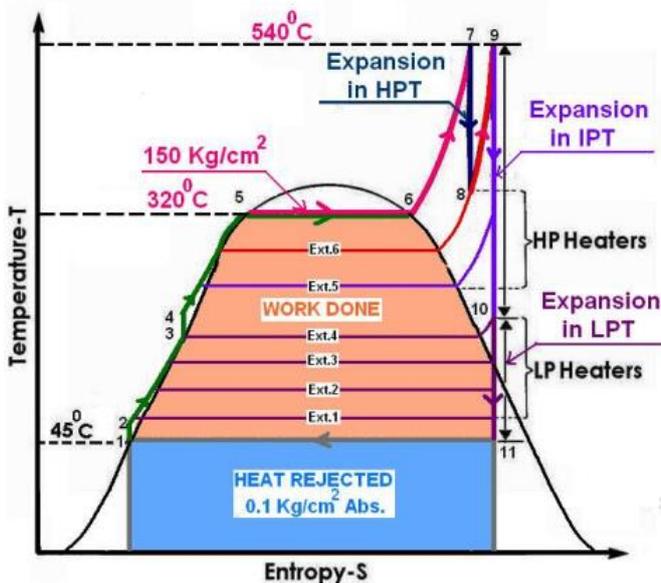
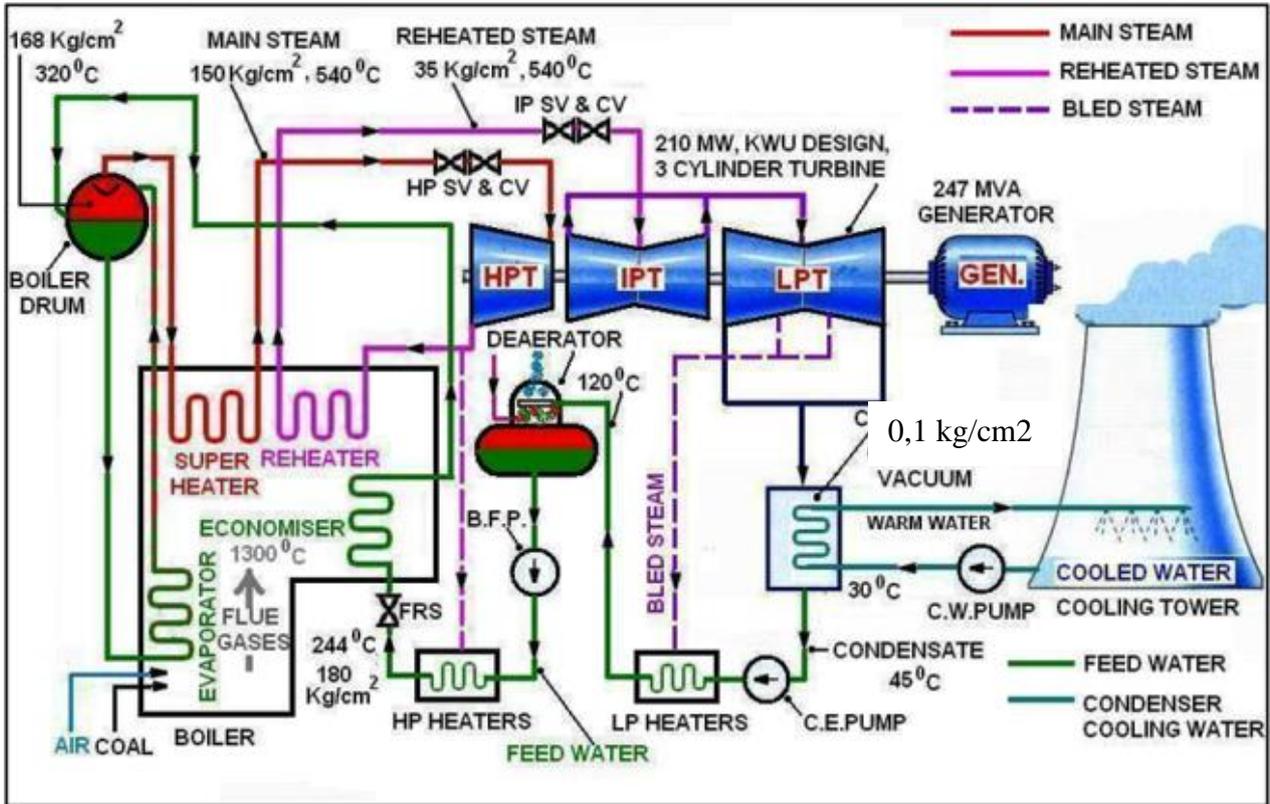


Perspectiva de una planta de generación de energía que quema carbón

### Entradas y Salidas de una Central térmica de carbón



## Central Térmica de Vapor de 247 MVA



**Desgasificador:** se usa para eliminar los restos de oxígeno que no se pudieron quitar en el condensador. Para eliminar el oxígeno calentamos el agua que hay en el depósito por medio de vapor que se extrae de la turbina de vapor.

Las TV empleadas en los ciclos combinados son en esencia similares a las empleadas en centrales convencionales, aunque presentan particularidades específicas. En la mayoría de las centrales de ciclo combinado gas-vapor existe, como parte del equipo básico, un cambiador de calor de mezcla denominado **desgasificador**. Este cambiador se instala no tanto con el objetivo de calentar el agua a la entrada del economizador, como para eliminar los gases disueltos en el agua y evitar fenómenos de corrosión en los tubos de la caldera.

El agua condensada, se bombea mediante bombas centrífugas colocadas a la salida del condensador, (CEP, bomba de condensado), hasta el desgasificador térmico (deaerator). Este se encarga de eliminar los gases disueltos en el agua y que resultan perjudiciales para el circuito. La desgasificación se produce por la adición de calor proveniente de una extracción de la turbina, con lo que por un lado se consigue elevar la temperatura del agua antes de entrar en la caldera, y por otro, se consigue liberar los gases disueltos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$  principalmente) por la menor solubilidad de estos gases en caliente.

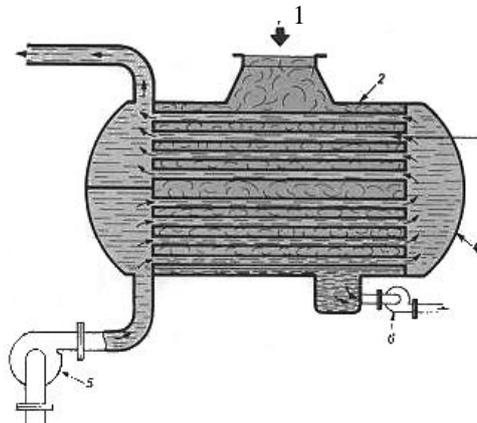
Las bombas de alimentación de caldera (BFP), de alta presión, toman el agua contenida en el desgasificador, que actúa como tanque pulmón de agua para la caldera y la impulsan hasta la entrada de la caldera a una presión ligeramente superior a la presión existente en el domo de evaporación (Boiler Drum).

## Circuito de Agua del Condensador

El condensador es un dispositivo de intercambio de calor, formado por una serie de tuberías por cuyo interior circula el agua de refrigeración y alrededor de los tubos circula el vapor proveniente de la turbina. En este contacto del vapor caliente y los tubos fríos, se produce el cambio de fase (condensación) absorbiendo el agua circulante el calor latente del vapor de agua. El agua circulante lleva este calor y lo entrega a la atmósfera en las torres de enfriamiento (grandes estructuras); a un río próximo o al mar.

**El condensador de Superficie Refrigerado por Agua:** Es el más usado en centrales, por que brinda: 1) Un elevado vacío con poco consumo de energía, 2) Se obtiene un condensado de gran pureza, por que no hay mezcla, con el agua de refrigeración.

**Detalle constructivos:** Está formado por haces de tubos unidos en los extremos sobre dos placas, el vínculo es por mandrilado (Fig. N°). El Vapor toma contacto por la superficie exterior del tubo y el refrigerante circula por el interior esto permite una más fácil limpieza de los tubos, dado que siendo el refrigerante el que puede contener suciedad, al depositarse ésta en el interior su: extracción, se ve facilitada.



1-entrada de vapor. 2-recipiente del condensador. 3-tubos refrigeradores. 4-placas de cierre.  
5-bomba de agua de refrigeración. 6-bomba de agua de condensado

**Condensers.** All power cycles must reject a large percentage of the heat added in order to produce mechanical work. For a Rankine cycle, this heat rejection occurs in conjunction with condensation of the working fluid vapor leaving the turbine at low pressure. The lower the heat rejection temperature, the greater the cycle efficiency as indicated in Equation (12.1).

Heat rejection from the condenser to the surroundings can be either direct or through an intermediate heat-transfer fluid loop (usually water). The types of condensers commonly used in solar power systems are shown in Figure 12.7. The most common condenser, a tube-and-shell heat exchanger, requires a supply of cooling water that comes from either a natural source (river, well, or ocean) or water that has been cooled by a cooling tower. The three cooling towers pictured could be designed either to condense the engine working fluid directly or to reject heat from an intermediate cooling water loop that also circulates through a tube-and-shell condenser.

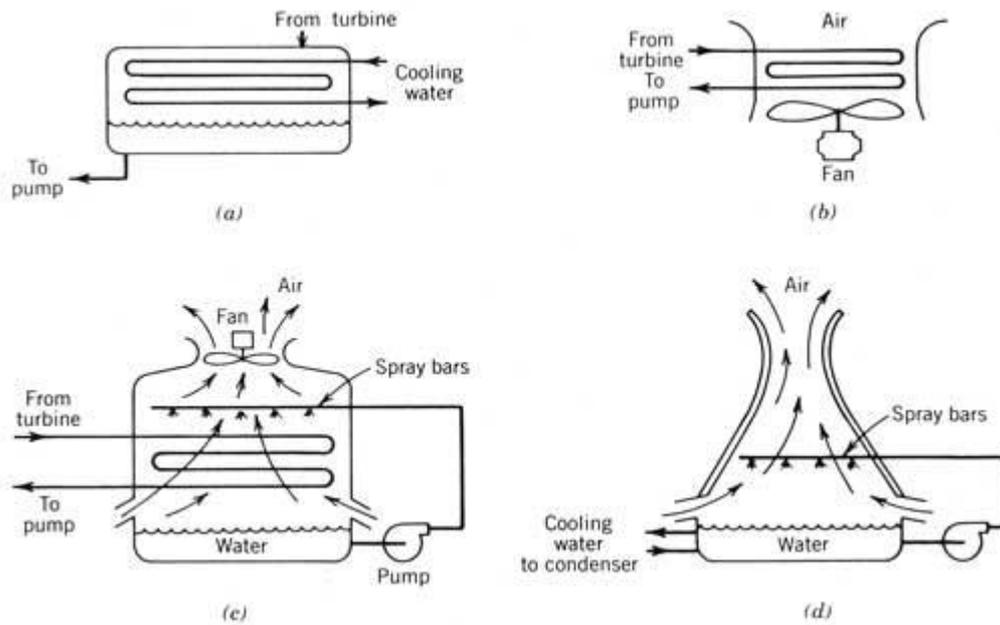


Figure 12.7 Types of condenser and/or heat rejection used in Rankine cycle solar power systems: (a) tube-and-shell condenser; (b) dry cooling tower; (c) wet cooling tower; (d) natural-draft cooling tower.

Each of these heat rejection schemes requires electrical power for operation. This power, considered a parasitic loss from the cycle's output, must be kept to a minimum. Highest parasitic power requirements are usually associated with dry cooling towers since they make use only of the sensible temperature of the air for cooling. This type of cooling is often selected for solar power systems because these systems are often located in hot, arid regions with minimal water resources.

Water evaporation may be utilized to provide additional cooling for the cycle as in examples c and d in Figure 12.7. These units typically provide lower-temperature cooling for less parasitic power than do dry cooling towers. The amount of water resource required may be roughly estimated by assuming that most of the heat rejected by the cycle provides latent heat for evaporation. The rate of water usage by a wet cooling tower may be estimated by

$$m_{evap} \cong \frac{\dot{Q}_L}{h_{fg}} \quad (\text{kg/s}) \qquad m_{evap} \cong \frac{\dot{Q}_L}{h_{fg}} \quad (\text{kg/s}) \quad (12.7)$$

where  $\dot{Q}_L$  is the rate of heat rejection by the cycle and  $h_{fg}$  the enthalpy of vaporization for water (2450 kJ/kg or 1054 Btu/lb).

## Torres de Enfriamiento

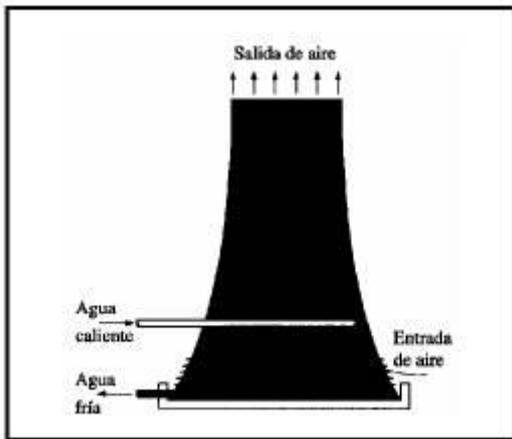
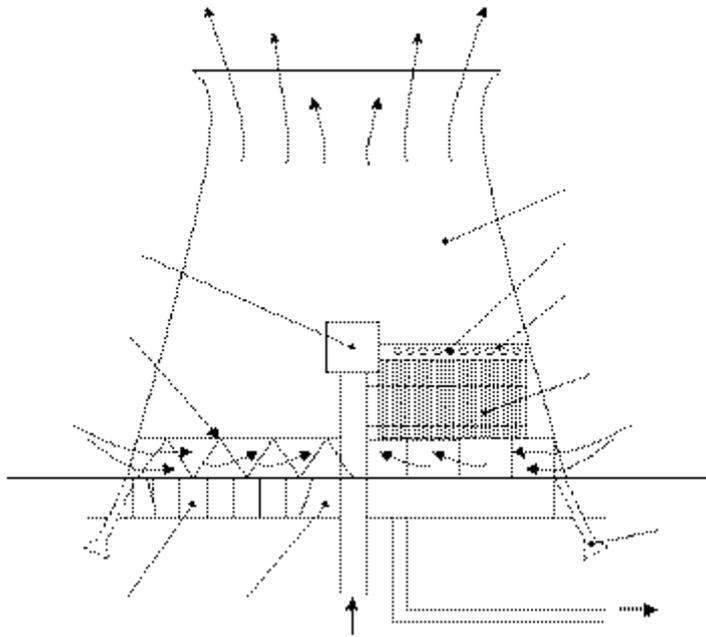
Elemento que permite disminuir la temperatura del agua de refrigeración que circula por el condensador. Esto se realiza estableciendo un contacto óptimo entre el agua de refrigeración y el aire atmosférico que circula por el interior de la torre.

La forma más simple y usual de clasificar las torres, es según la forma en que se hace mover el aire a través de éstas, por lo que existen torres de tiro natural y torres de tiro mecánico (inducido y forzado), estas últimas proporcionando un control total sobre el caudal de aire suministrado y al ser torres compactas, su sección transversal y altura son pequeñas en comparación con las torres de tiro natural:

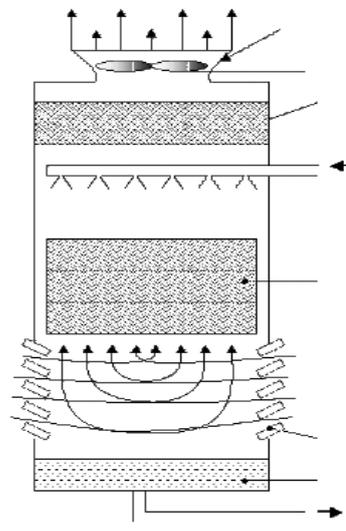
- A) **Tiro natural:** usan estructuras enormes de forma hiperbólica (hasta 150 m de alto 120 m en la base) para inducir la entrada de aire por la parte inferior y enfriar el agua de refrigeración.



Se utilizan generalmente para grandes caudales de agua de refrigeración y son de bajo costo de mantenimiento. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s. Estas torres no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas de gran potencia; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria



B) **Tiro inducido:** grandes ventiladores se colocan en la parte superior de la torre (impulsan el aire creando un pequeño vacío en el interior de la torre). La estructura se hace mucho menor.

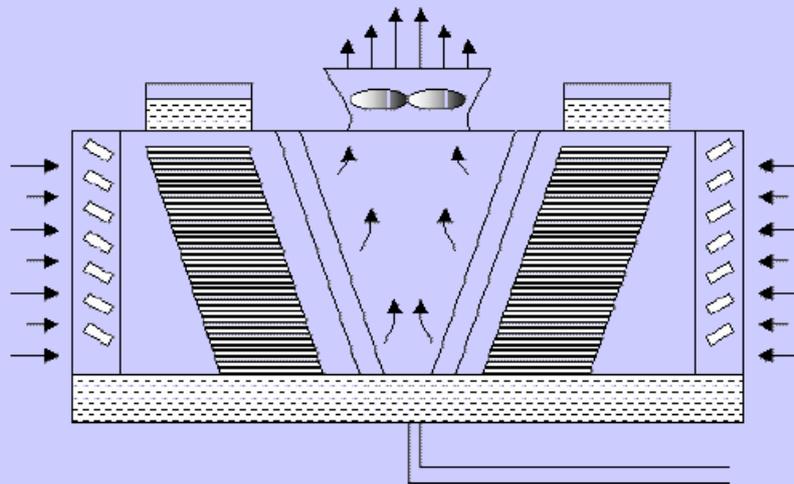
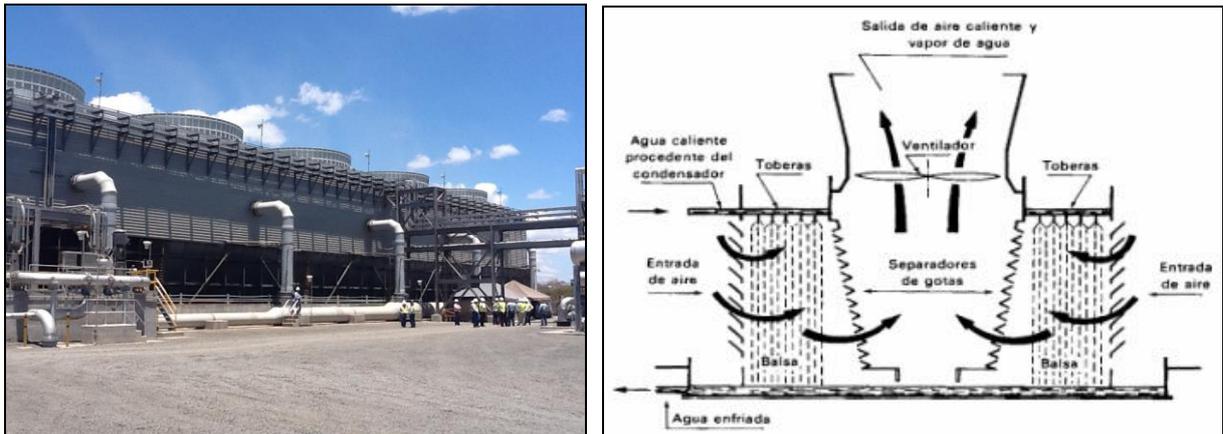


Las torres de tiro inducido pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto (Fig. 1.4). La ventaja que tienen este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. En éstas, el aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir en gran medida la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en una gran pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en

comparación con las torres de flujo cruzado.

**Figura 1.4.** Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.

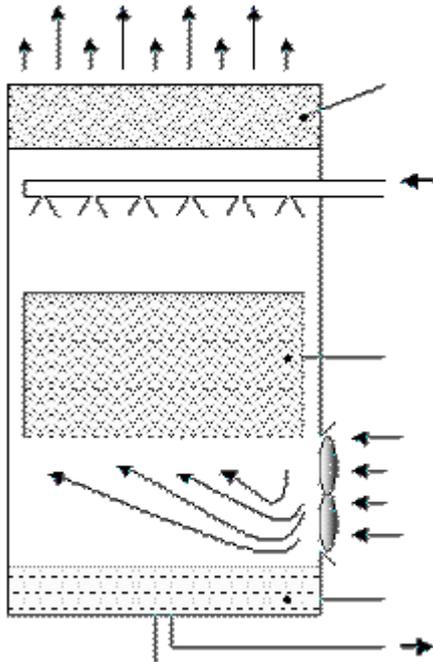
En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que descende (Fig. 1.5). Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.



**Figura 1.5.** Torre de flujo cruzado (tiro inducido)

**C)Tiro forzado:** grandes ventiladores se colocan en la base. El agua de refrigeración cae hacia abajo sobre las superficies de relleno que ayudan a aumentar el tiempo de contacto entre el agua y el aire.

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre (Fig. 1.3). Estas torres son, casi siempre, de flujo a contracorriente. Son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil. El aire que se mueve es aire frío de mayor densidad que en el caso de tiro inducido. Esto también significa que el equipo mecánico tendrá una duración mayor que en el caso de tiro inducido, ya que el ventilador trabaja con aire frío y no saturado, menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida. Como inconveniente debe mencionarse la posibilidad de que exista recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, creada por el ventilador en la entrada de aire

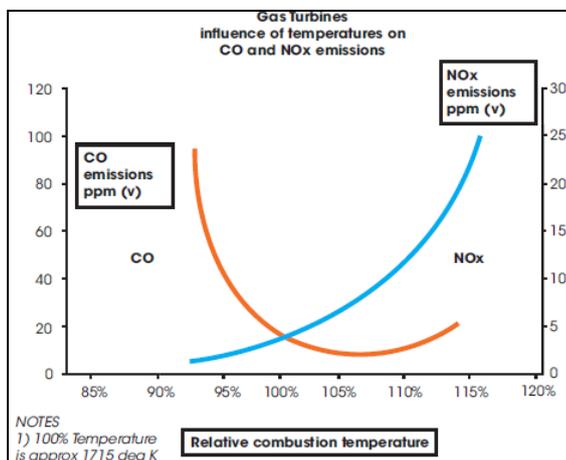


D) **Enfriamiento en seco (aerocondensadores):** tiene el potencial de reducir el consumo de agua entre un 80 y 90%, es una solución para enfriar el calor producido en el ciclo de vapor, sin necesidad de usar agua de manera intensa. Esto todavía cuesta bastante más que los tradicionales métodos de refrigeración (unas 4 veces más caros), aumentando la inversión requerida entre 3 y 5%. El uso de ventiladores más grandes también aumenta el consumo de energía interna de la planta y junto con las limitaciones termodinámicas de los aerocondensadores, que tienden a aumentar la temperatura del condensador y por lo tanto la resistencia de la turbina, reduce la cantidad de energía generada por la planta entre 6 y 7%.

## PRODUCTOS DE LA COMBUSTION

Los productos de la combustión que salen por la chimena y que afectan el medio ambiente y la salud, son:

- CO<sub>2</sub> → Efecto Invernadero
- Oxidos de N y de S (NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) → lluvia ácida
- CO → combustión incompleta
- Metales pesados como el mercurio y el selenio
- Material particulado



Uno de los cambios más significativos que está teniendo lugar en el sector de la energía en los últimos años, es la incorporación de potencia de origen renovable, proveniente sobre todo de parques eólicos, granjas FV y centrales termosolares, que son por naturaleza de características intermitentes. Esto lleva a que las centrales convencionales deban atender subas y bajas rápidas de generación, en respuesta a esta intermitencia, operando muchas veces fuera de su punto óptimo.

Tipo de Central	Indice de ocupación [ha/MW]	Indice Ahorro de Emisión [tn CO <sub>2</sub> /MW] (depende del FC y de la central equivalente )	Hogares que puede alimentar [hogares/MW] (depende del FC)
Fotovoltaica	2-5 (depende de la tec. usada y tipo de panel)	500-1000	400-800
Termosolar en Torre	4-8		
Termosolar Cilindroparabólico	2-3		
Eólica	15-25		

## **Combustible**

Los mecanismos transportadores del combustible tienen por objeto llevar a éste desde el punto de descarga, hasta la sala de calderas o hasta los depósitos de almacenamiento, con el propósito de mantener constantemente una determinada reserva de combustible. Los dispositivos transportadores dependen ante todo, del tipo de combustible empleado (sólido, líquido, gaseoso) y, además, de las condiciones locales de emplazamiento, consumo de las calderas, horas diarias de servicio, cantidad a transportar, recorrido del transporte, etc.

Para quemar el combustible que debe utilizarse en la instalación generadora de vapor, éste se introduce en un recinto especial denominado hogar, cuyas paredes son refractarias y que recibe el aire necesario para la combustión. El combustible sólido se introduce en el hogar por medio de una estructura metálica, generalmente constituida por barrotes de hierro, denominada parrilla, destinada también a sostener el combustible dentro del hogar y a dar paso al aire de la combustión. Los combustibles líquidos y gaseosos se introducen en el hogar utilizando quemadores, que inyectan y pulverizan el combustible en el interior del hogar.

### **Combustible sólido (carbón)**

El transporte se realiza casi siempre por vía navegable o por vía férrea. Si la central está situada sobre un muelle marítimo, resulta posible disponer torres de descarga, que pasan directamente el carbón a los depósitos de almacenamiento de la central. Pero la mayoría de las centrales térmicas necesitan ramales de ferrocarril para descargar el carbón, y un equipo especialmente preparado para el transporte de combustible hasta los depósitos de almacenamiento.

El almacenamiento y manipulación de las grandes cantidades de carbón que se requieren en una planta termoeléctrica de generación de energía, implican una cuidadosa planificación para evitar posibles interrupciones en el servicio de la misma.

La limpieza y preparación del carbón cubre un amplio campo de actividades, que se extiende desde la reducción del tamaño inicial, cribado, eliminación de materiales extraños y clasificación, hasta procesos mucho más complicados para eliminar la ceniza, el S y la humedad.

Las centrales térmicas que usan como combustible carbón, pueden quemarlo en trozos o pulverizado. La pulverización consiste en la reducción del carbón a polvo finísimo (menos de 1/10 mm de diámetro) para inyectarlo en la cámara de combustión del generador de vapor por medio de un quemador especial que favorece la mezcla con el aire comburente.

Con el uso del carbón pulverizado, la combustión es mejor y más fácilmente controlada. La pulverización tiene la ventaja adicional que permite el uso de combustible de desperdicio y difícilmente utilizado de otra forma. En estas se requiere instalar dispositivos para separar las cenizas producto de la combustión y que van hacia el exterior, hay incremento de efecto invernadero por su combustión, altos costos de inversión, bajo rendimiento y arranque lento.

### **Combustible líquido**

El fuel oil puede recibirse por medio de un oleoducto o utilizando vagones cisterna que se llevan a un apartadero en el que una bomba de trasiego los vacía en un tanque auxiliar cuya capacidad es ligeramente superior a la de un vagón cisterna. De aquí, y por medio de una bomba centrífuga, se lleva el fuel oil al depósito principal, haciéndolo pasar previamente por un filtro. El depósito principal es, casi siempre, un gran tanque cilíndrico que, normalmente, almacena combustible para el consumo normal de 3 a 6 meses. Este tanque está equipado con respiradero, rebosadero, drenaje y serpentines de calefacción. También se acostumbra a construir un terraplén alrededor del depósito de forma que, en caso de derrame por rotura de tubería u otras causas, el contenido del tanque quede depositado y no rebase la altura del dique así formado.

Desde el depósito, se conduce el fuel oil a la sala de calderas, por medio de oleoductos, dispuestos de tal manera que, en caso de rotura, no se inunde de combustible el sótano de la central. En el interior de la sala de calderas, antes de llevarlo a los quemadores, se hace pasar el fuel oil por un calentador cerrado, en el que alcanza la temperatura de unos 120°C para que tengan la fluidez necesaria.

### **Combustible gaseoso**

En algunas centrales se utiliza como combustible el gas natural. Con el desarrollo de gasoductos a presión ha podido utilizarse incluso en lugares alejados de los yacimientos llegando, en muchos casos, a eliminar a los demás tipos de combustibles. El gas natural no necesita depósitos y, por lo tanto, el equipo auxiliar para almacenamiento y transporte es más económico que el necesario para el fuel oil y mucho más económico todavía que el carbón.

### **Circuito Calentador de Aire**

Se utilizan para el caldeoamiento previo del aire de combustión, recuperando parte del calor de los gases de escape que van a la chimenea. El aire caliente, al ser introducido en el hogar, aumenta la temperatura de éste y, por consiguiente, aumenta también la transmisión de calor radiante a la caldera, aumentando el rendimiento del conjunto. Por ejemplo, en la central TV de carbón Guohua Ninghai de Shanghai, la temperatura del aire precalentado que entra al hogar es de unos 270°C.

### **Circuito de los Gases de Combustión**

El gas de combustión producido en el hogar de la caldera, es empujado por el aire de combustión y obligado a salir por la chimenea. Se distinguen dos clases de tiro:

- Tiro natural provocado, diseño realizado para que los gases naturalmente salgan.
- Tiro mecánico, usando ventiladores, unas veces para la impulsión de los gases, en el tiro forzado (ventiladores propiamente dichos o impulsores), otras veces para la aspiración de estos gases, en el tiro inducido (aspiradores o extractores).

En las centrales térmicas que utilizan el tiro inducido, generalmente se lo combina con una chimenea especial denominada difusor

## Planta de tratamiento de agua

Las Purgas de las calderas se realizan de manera continua (del orden del 1% del flujo), para evitar las incrustaciones provocadas por las sales disueltas en el agua del ciclo y la corrosión. Para combatir esto se usa agua desmineralizada (agua demin) y sustancias químicas. En las purgas se retiran sólidos en suspensión y exceso de sustancias químicas. Esto es un efluente altamente contaminante.

Dentro del circuito de reposición del agua, se encuentra la planta de tratamiento de agua. Aquí se obtiene el agua desmineralizada adecuada para su consumo en la caldera y el ciclo agua-vapor. La obtención de agua desmineralizada se realiza en dos pasos:

- **Ablandamiento o desalación.** En esta fase se eliminan la mayor parte de las sales que contiene el agua. Si la fuente original de agua es un río o un caudal de agua dulce, el proceso se denomina ablandamiento (eliminación de la dureza del agua). Si se trata de agua de mar, el proceso se denomina desalación.

Aunque existen diversos criterios para clasificar los procesos de desalación, en general se puede hablar de procesos que requieren un cambio de fase y procesos que no lo requieren.

Entre los procesos que implican un cambio de fases están:

- a) Destilación en múltiple efecto
- b) Flashing en múltiple efecto
- c) Congelación
- d) Compresión de vapor.

Los procesos que no implican un cambio de fases son:

- a) Ósmosis inversa.
- b) Electro diálisis.

- **Afino.** El agua obtenida en el proceso anterior puede ser almacenada como agua desalada o ablandada, o pasar directamente al proceso siguiente sin un depósito intermedio. El afino es el proceso final de ajuste de la calidad del agua de alimentación a la caldera. En él se eliminan las diversas sales que pudieran quedar aún. El proceso se realiza con resinas de intercambio iónico. Puede realizarse en dos fases, con resinas catiónicas y aniónicas por separado, o en un solo paso, haciendo pasar el agua a tratar por un único depósito en el que se encuentran las resinas aniónicas y catiónicas mezcladas. A estos depósitos se les denomina lechos mixtos.

Una vez que ha atravesado estos lechos, el agua debe tener las características químicas necesarias para su consumo en la caldera. Esta agua desmineralizada suele almacenarse en un depósito pulmón, desde donde se bombea hacia el punto del ciclo agua-vapor en el que se adiciona al circuito (generalmente el condensador o el tanque de agua de alimentación). Antes de ingresar en él se realizará control químico del agua, para ajustar el pH y su contenido en oxígeno disuelto, fundamentalmente.

## **La importancia del control químico:**

Definimos como control o tratamiento químico a la alteración de las características físico-químicas de una sustancia hasta adecuarlas a unos patrones predefinidos y deseados.

El objetivo principal de un tratamiento químico en una planta es preservar la integridad de los materiales constituyentes de los diversos circuitos, manteniendo la operación de los sistemas de la planta en el nivel óptimo de disponibilidad, seguridad, fiabilidad, economía y eficiencia durante la vida útil de la instalación.

Para llevar a cabo los tratamientos químicos adecuados necesitaremos conocer dos condiciones fundamentales:

*-Patrón químico deseado:* Viene dado por el tipo de material utilizado en la construcción de los distintos elementos del proceso tratado. Los valores de pH, por ejemplo, para el agua de caldera varían según la composición de las aleaciones utilizadas para la construcción de haces tubulares. Estos valores generalmente son aportados por los fabricantes de los equipos.

*-Características físico-químicas originales de agua a tratar:* La composición físico-química del agua varía según la procedencia del abastecimiento, algunos de sus parámetros a tener en cuenta son la dureza, cantidad de sólidos disueltos, materia orgánica disuelta, iones metálicos, productos químicos utilizados en fases anteriores del proceso, etc.

Fundamentalmente la acción del agua sobre los distintos sistemas tiene dos efectos perjudiciales: corrosión y formación de depósitos.

### ***-Incrustaciones:***

Una de las causas más comunes de problemas en una planta es el fallo de tubos tanto de caldera, condensadores, intercambiadores o turbina de vapor, por operar con los parámetros químicos de control fuera de las especificaciones de funcionamiento. Los mayores problemas en el rendimiento del circuito agua/vapor de las centrales están relacionados con la acumulación de depósitos porosos en la zona de agua de los tubos de caldera.

Una parte de los depósitos provienen del arrastre de los productos de corrosión generados en los sistemas previos a la caldera; otra parte proviene de la corrosión de los propios tubos de la caldera; y una última parte proviene de compuestos que arrastra el propio vapor por utilizar un agua de alimentación al sistema que no cumple con los requerimientos deseables. Las incrustaciones además de ser un problema por sí mismas, aumentan las posibilidades de que se produzca corrosión en las zonas donde se adhieren.

Las incrustaciones se deben fundamentalmente a las sales de Calcio y Magnesio que al calentarse se concentran y precipitan dando lugar a depósitos que forman una capa aislante que dificulta el intercambio de calor. Los efectos directamente ocasionados son:

- La reducción del coeficiente de transmisión de calor
- La reducción de la sección libre de paso de fluido
- La rotura de tubos por sobrecalentamiento, al ser menor el intercambio de calor.

Las incrustaciones o depósitos también pueden afectar a partes en movimiento, principalmente válvulas y alabes de turbina de vapor. En este caso, no solo se producen incrustaciones por sales cálcicas y magnésicas, sino también por deposición de sílice y diversos compuestos de hierro. Esto provoca falta de estanqueidad en válvulas, degradación acelerada de alabes y desequilibrios en el rotor de la turbina de vapor.

### ***-Corrosión:***

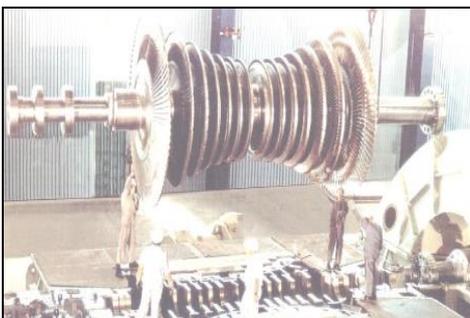
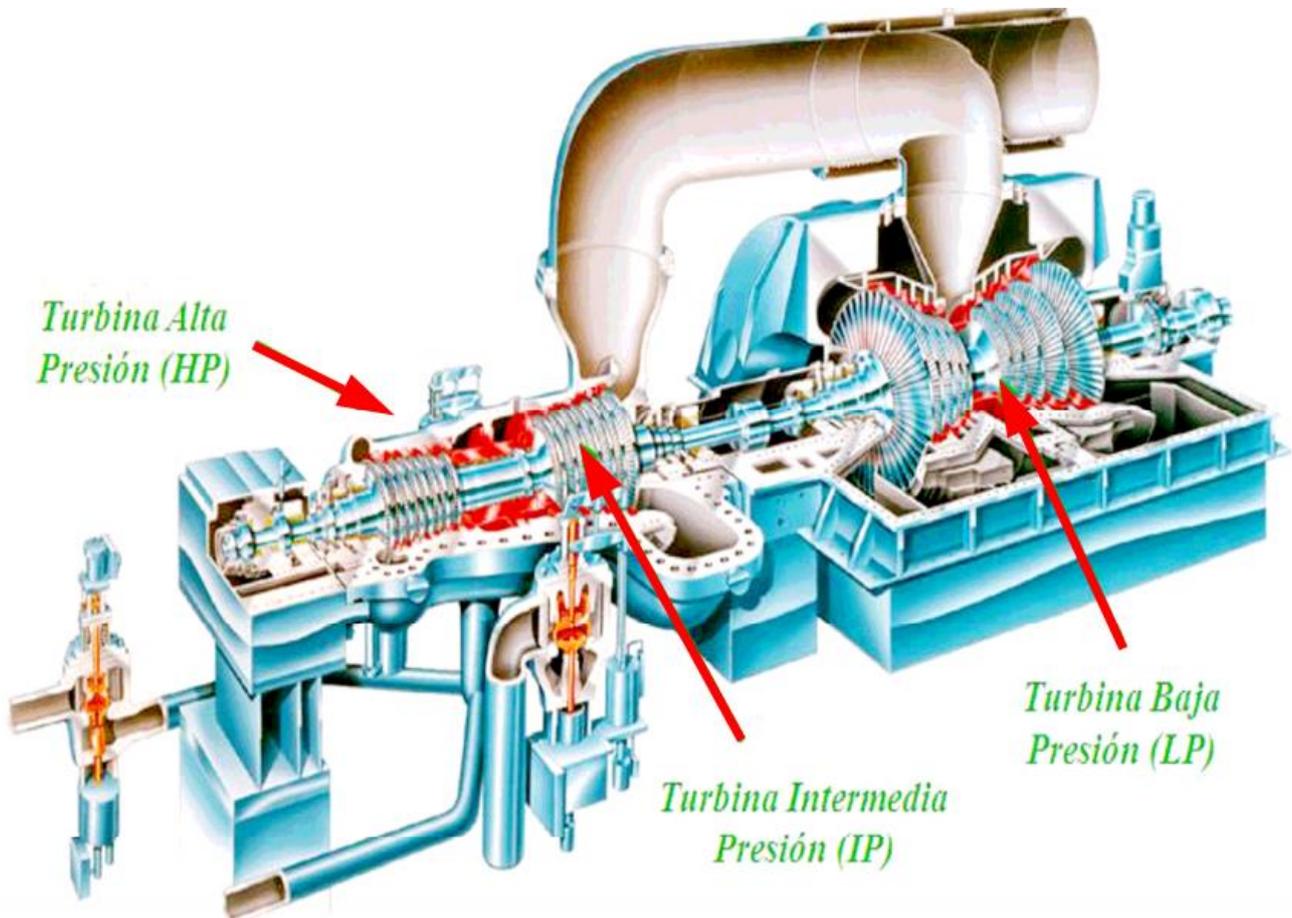
Podemos definir la corrosión como la reacción química o electroquímica que se produce entre un metal y el medio, que provoca su degradación y la pérdida de sus propiedades. El ataque químico comienza en la superficie y se propaga hacia el interior, pudiendo presentar el aspecto de pequeños puntos de corrosión en la superficie, pero gran profundidad en el elemento atacado. Diferentes zonas de la superficie metálica actúan como ánodo y cátodo debido a la no homogeneidad inherente de los materiales metálicos, que causa pequeñas diferencias de potenciales entre zonas adyacentes. Los iones metálicos por difusión a través de la matriz metálica se oxidan en la zona anódica y los electrones, difundidos de igual modo, reaccionan en el oxígeno disuelto en la zona catódica.

El resultado de la corrosión es la pérdida de espesor y de cualidades mecánicas, así como el desprendimiento de material que puede acumularse en ciertos puntos de la instalación, expandiendo a otras zonas los problemas de corrosión.

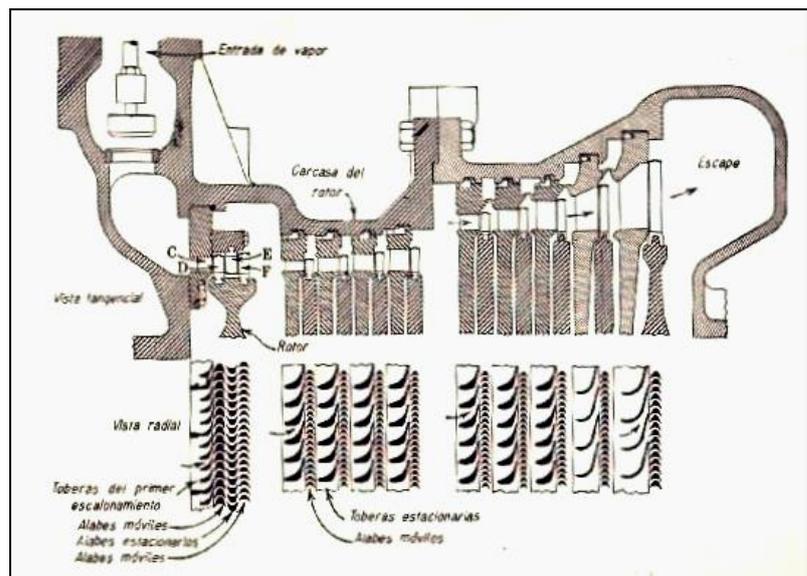
En caldera y ciclo agua-vapor, las partes más afectadas de la instalación serán las partes "frías", es decir, el circuito de alimentación y economizadores, ya que en las partes calientes se forma de manera natural una capa superficial de óxido de hierro denominado magnetita, que impide que la oxidación progrese al interior del metal, formando así una capa protectora. Sin embargo estas partes calientes si se verán afectadas por los desprendimientos de las partes frías.

## Turbina de Vapor

La TV recibe el vapor generado en la caldera y produce energía mecánica. Está dividida en etapas, generalmente en tres cuerpos: turbina de alta presión, turbina de media y turbina de baja. En cada una de ellas recibe vapor en condiciones de presión y temperatura determinadas. Se consigue con esta división un mayor aprovechamiento del vapor generado en caldera y se evitan problemas derivados de la condensación en las últimas etapas de la turbina.



Rotor de la turbina



Una turbina de vapor se puede dividir en dos partes fundamentales:

- El rotor o parte móvil
- El estator o carcasa o parte fija

El conjunto mecánico se apoya sobre cojinetes, elementos que soportan los esfuerzos radiales y axiales (dirección longitudinal del eje) y el peso del eje de la turbina.

Algunos de los elementos presentes son:

- Cuerpos de turbinas de baja, media y alta. La presión de vapor en la turbina de alta suele ser superior a los 100 bares y 500°C. En la turbina de media el valor de temperatura es similar y la presión está en torno a los 25 bares. En baja se tiene una temperatura próxima a la de saturación y una presión algo superior a 3 bares.
- Válvulas de entrada de vapor a turbina: a) b) Válvulas de vapor de entrada, que proporcionan el caudal de vapor deseado para dar la potencia requerida por la turbina; b) Válvulas de parada, que actúan por seguridad de la turbina y en situaciones de emergencia, para cortar el flujo de vapor de entrada.
- Sistemas auxiliares (lubricación, vapor de sellos, aire de control, etc.). Se incluyen los sistemas de estanqueidad, que presentan sistemas de cierre situados a ambos extremos del eje de la turbina que evitan que escape el vapor de la turbina al exterior. Hay también sistemas de estanqueidad interior, que evitan la fuga de vapor entre los álabes móviles y fijos en las etapas sucesivas de la turbina.



### Clasificación de TV según:

- Tipo de escape de vapor: **turbinas de condensación** (se condensa el vapor que sale de la turbina a una presión menor a la atmosférica, usada en centrales eléctricas) y **turbinas de contrapresión** (el vapor de escape de la turbina sale a una presión por encima de la atmosférica, usada en industrias con procesos térmicos).
- Tipo de transformación de energía térmica en energía mecánica:
  - . **Turbinas de acción**, la transformación se realiza en los álabes fijos (sirven para darle la dirección adecuada al vapor para que incida sobre los álabes móviles).
  - . **Turbinas de reacción**, la transformación se realiza a la vez en los álabes fijos y móviles.
- Tipo de vapor de suministro y presiones dentro de ella, con extracciones, con recalentamientos, etc.
- Tipo de carcasa, con una sola carcasa, compuesta en tándem.
- Número de etapas.
- Dirección del flujo de vapor. Axial (caso más normal), radial o tangencial.

### Escalonamientos en la TV

El objetivo es disminuir la velocidad del rodete, conservando una velocidad de los álabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor. Dependiendo de la presión y temperatura de entrada, la velocidad del chorro puede ser demasiado elevada si toda la energía se transformase en trabajo útil con un solo escalonamiento. En este caso sería necesario que la turbina girase a una velocidad comprendida entre 20000 y 40000 rpm. Mecánicamente no es viable por las dimensiones que debería tener el reductor.

El escalonamiento de presión tiene por objetivo dividir el salto entálpico total disponible en  $n$  saltos más pequeños. En este caso la caída de presión se produce en grupos de toberas, de forma que la velocidad resultante del vapor es suficientemente baja para ser absorbida por una velocidad razonable del rodete. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para expandir el vapor completamente. Para cada salto de presión debe diseñarse un par tobera-rodete.

La etapa de una TV es la conjunción de una fila de álabes móviles y de toberas fijas.

El escalonamiento de velocidad tiene por objetivo producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor en tantos grupos de álabes como sea necesario. Hay que tomar el vapor de salida del rodete y hacerlo pasar por un juego de enderezadores reorientándolo para que entre en un segundo rodete.

El trabajo de la turbina se produce cuando a través de las toberas se impulsa un chorro de vapor hacia los álabes móviles.

La turbina de acción de una etapa es descendiente directa de las turbomáquinas hidráulicas, en particular de la turbina Pelton. En su forma más sencilla consiste en una o más toberas (convergentes si son subsónicas, convergente-divergentes si son supersónicas) y una rueda de paletas.

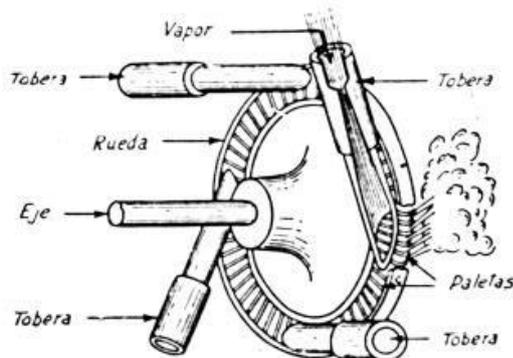
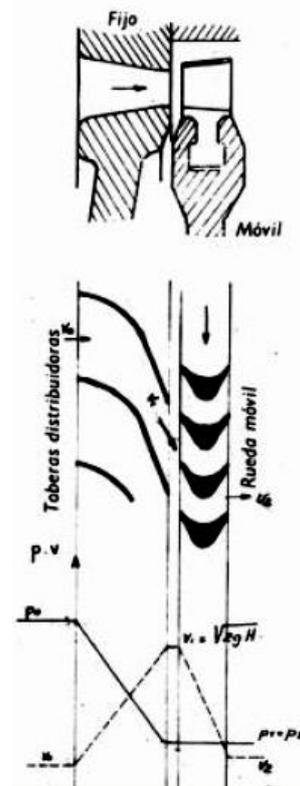


FIG. 11-I. — Turbina de acción simple. (De Laval).

**Turbina de acción:** La caída de presión o expansión se realiza en las toberas (álabes fijos) y en la rueda (álabes móviles) solo hay un cambio de dirección de la vena de vapor. En los álabes móviles no hay variación de presión y en los sucesivos cambios de dirección va entregando la energía cinética del vapor por saltos parciales. Las caras de las ruedas móviles se encuentran a igual presión. Se trata de un tipo de TV que ofrece particular interés cuando se las construye con un número reducido de ruedas (máximo 4 ruedas). Trabaja con baja presión y no requiere sellos especiales de hermeticidad entre alabes fijos y móviles.

Al pasar por las toberas de la turbina, se reduce la presión del vapor (se expande) aumentando así su velocidad. Este vapor a alta velocidad es el que hace que los álabes móviles de la turbina giren alrededor de su eje al incidir sobre los mismos. Por lo general una turbina de vapor posee más de un conjunto tobera-álabe (*etapa*), para manejar la velocidad del vapor de manera gradual. Esto se hace ya que por lo general el vapor de alta presión y temperatura posee demasiada energía térmica y, si ésta

se convierte en energía cinética en un número muy reducido de etapas, la velocidad periférica o tangencial de los discos puede llegar a producir fuerzas centrífugas muy grandes causando fallas en la unidad.



axiales "en el eje)

**Turbina de reacción:** La caída de presión o expansión se realiza parte en la tobera y parte en la rueda móvil. En los álabes se combina el cambio de dirección de la vena de vapor, con la caída de presión. En la tobera se produce un aumento de velocidad debido a la caída de presión y en la rueda móvil baja la velocidad por las transformaciones. Conviene un número importante de ruedas, para disminuir saltos de velocidad y presión entre ruedas sucesivas. El principal inconveniente está dado por la hermeticidad que debe observarse entre alabes móviles y fijos por el salto de presión existente. Se usa para un gran volumen de vapor. La presión de entrada es  $>$  que la de salida, produciendo un empuje axial por la diferencia de presión, lo que obliga a emplear disposiciones constructivas especiales de compensación (colocación de "cojinetes



A causa del aumento de volumen del vapor cuando se expande, es necesario aumentar en cada escalón el tamaño de las aberturas a través de las cuales pasa el vapor. Durante el diseño real de las turbinas, este aumento se consigue alargando las palas de un escalón a otro y aumentando el diámetro del tambor o la rueda a la que están acopladas las palas. También se agregan dos o más secciones de turbina en paralelo. Como resultado de esto, una turbina industrial pequeña puede ser prácticamente cónica, con el diámetro más pequeño en el extremo de entrada, de mayor presión, y el diámetro mayor en el extremo de salida. Las grandes turbinas de una central eléctrica nuclear pueden tener cuatro rotores con una sección de alta presión con flujo doble, seguida de tres secciones de baja presión y flujo doble.

#### *Ventajas de las turbinas de acción*

- Menor velocidad periférica para un mismo salto entálpico adiabático.
- Como consecuencia del punto anterior, menor número de escalonamientos necesarios y por lo tanto dimensiones de la turbina más reducidas.
- Posibilidad de utilización de la admisión parcial y de los escalonamientos de velocidad, lo cual es irrealizable en las turbinas de reacción.
- Mejor equilibrio axial de los rodets en estas turbinas que en las de reacción dado que en estas últimas la diferencia de presiones existentes entre la entrada y la salida del rodete produce un considerable esfuerzo en la dirección paralela al eje.
- Escasa importancia de las pérdidas intersticiales. La sección de paso ofrecida a las fugas entre las partes de la turbina sometida a presiones diferentes, están representadas en las turbinas de acción por zonas mucho menos extensas que en las turbinas de reacción, en las que las diferencias de presiones afectan a toda la turbina.
- Por último, son más fácilmente localizables las averías producidas en un escalonamiento cualquiera en las turbinas de acción que en las de reacción, dado que en las primeras los sucesivos escalonamiento están separados por diafragmas o tabiques robustos y en las segundas por débiles coronas de directrices, lo que motiva que una avería producida en cualquiera de estos provoca generalmente la destrucción de la turbina.

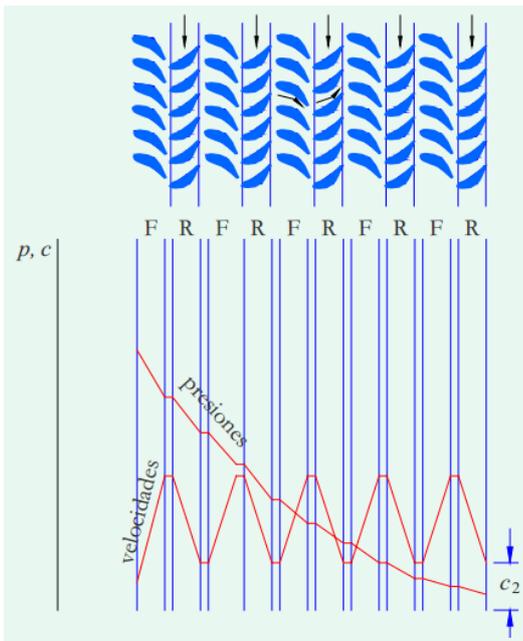
#### *Ventajas de las turbinas de reacción*

- El montaje de los álabes sobre largos tambores, que corresponden a una serie de escalonamientos, conducen a disposiciones más sencillas constructivamente y más económicas que en los discos aislados de las turbinas de acción. Por ello, puede conseguirse en aquéllas más fácilmente una baja velocidad angular, como por ejemplo lo exige el accionamiento de las turbinas propulsoras de las hélices de los barcos.

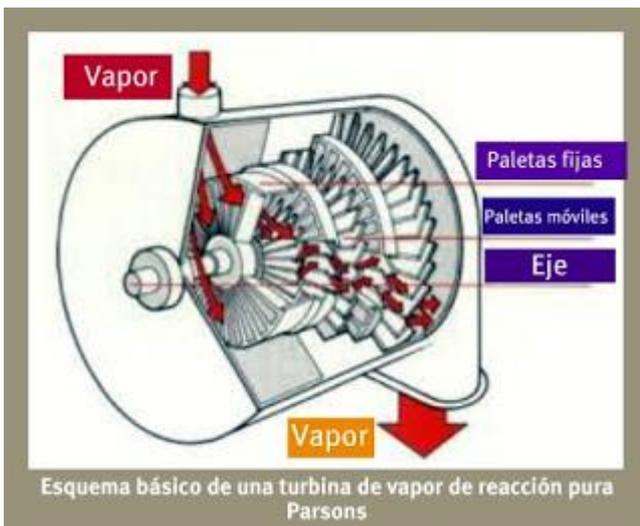
Así, el principio de acción es preferible para altas presiones dada las menores fugas intersticiales que proporciona y es peor para bajas presiones por las circunstancias apuntadas. Por ello, incluso en las turbinas exclusivamente de acción muchos constructores introducen un ligero grado de reacción en los últimos escalonamientos.

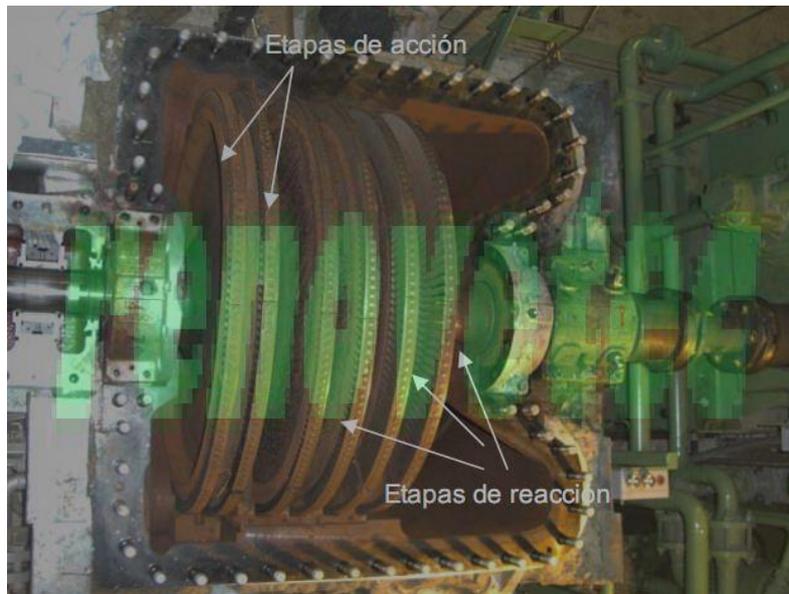
En cuanto al equilibrado del empuje axial de las turbinas de reacción, se realiza mediante un cojinete especial de difícil construcción y conservación que permite el compensado de la turbina.

Como conclusión señalar que los constructores tienden a un único tipo de turbina, intermedio entre los dos grandes tipos.

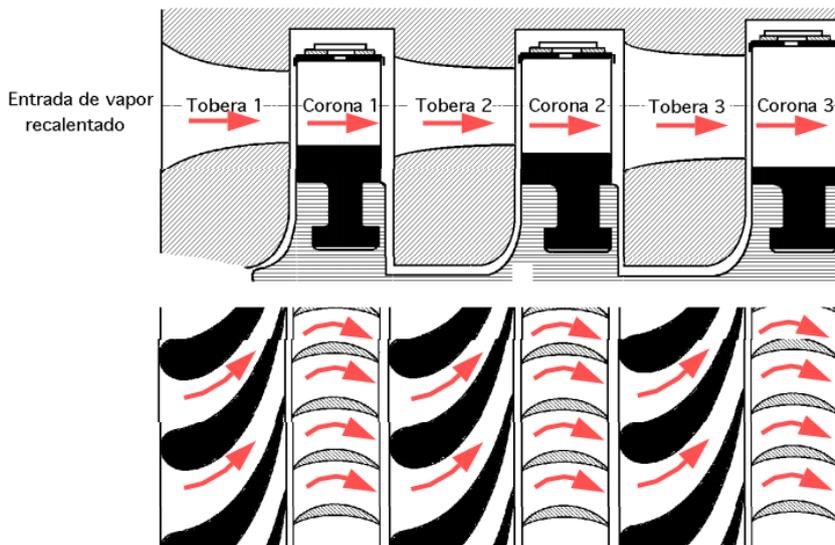
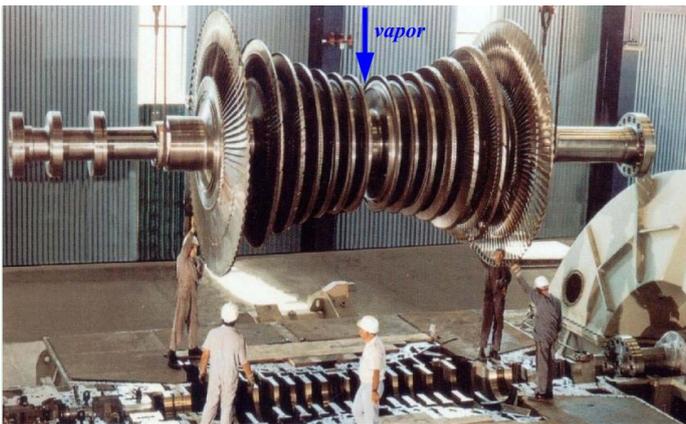


Parece de reaccion





Consiguen mejores rendimientos que las monoetapa, además pueden absorber flujos de vapor de mucha mayor presión, por lo que se utilizan para turbinas de alta potencia. Suelen utilizarse turbinas mixtas, con las primeras etapas de acción y las finales de reacción.



Turbina de acción con tres escalonamientos de presión

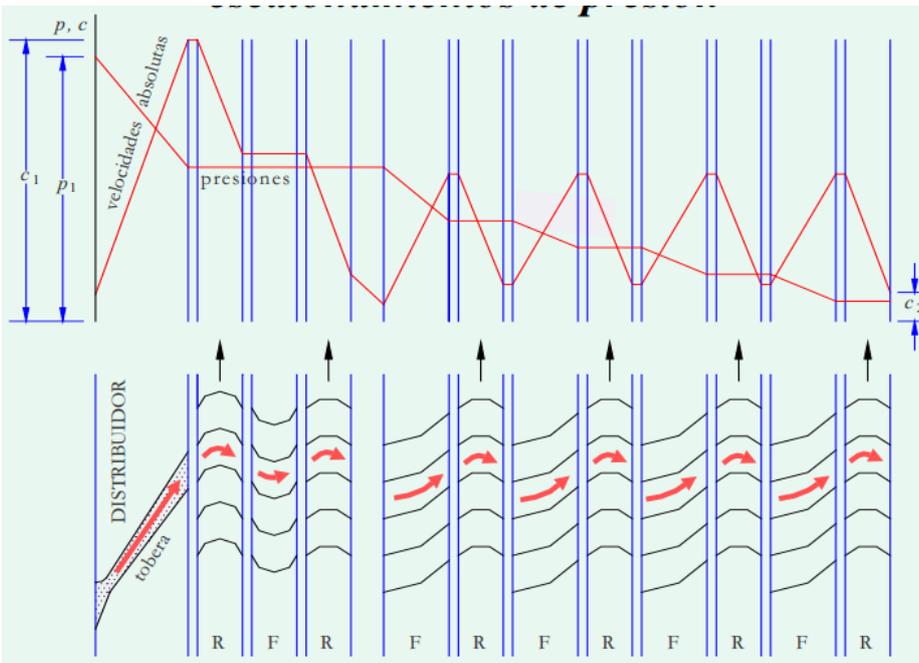


Gráfico de presiones y de velocidades absolutas en una turbina de acción con rueda Curtis y cuatro escalonamientos de presión

**Regulación de la turbina de vapor:** En todo momento debe existir un equilibrio entre la potencia que entrega la turbina (unidad motriz) y la resistencia o potencia del alternador (máquina accionada), con el fin de que la velocidad sea constante aunque varíe la carga (frecuencia =cte). Se puede controlar:

- La cantidad de vapor producido [ $T_n/h$ ] o la admisión a la TV (válvula).
- La calidad del vapor, variando  $\Delta i$  por medio de  $p$  y  $T$ .

Las condiciones mínimas a cumplir son las siguientes:

- A carga constante, la variación de la velocidad debido a la variación del estado de vapor no debe ser mayor que el 0,5% Velocidad nominal.
- La variación de carga del 100% (pérdida brusca de carga) no debe modificar la velocidad en más 3% de la velocidad nominal.
- Si la velocidad excede a la nominal en más 12% debe actuar la protección de sobre velocidad, la cual de inmediato ordena el cierre de la válvula principal de vapor, de esta manera la máquina queda sin vapor y entra a perder velocidad hasta su parada total. El **Virador** hace que la máquina gire a muy baja velocidad y se enfríe en forma normal sin producir deformaciones en el eje de TV.
- Después que el sistema de control de la central manda señal de cierre, las válvulas de control de las turbinas son cerradas y la potencia eléctrica del generador se reduce hasta un valor prefijado. En este punto se procede a desconectar la excitación de campo y a abrir luego los interruptores del generador, desconectando la unidad del sistema.

El sistema virador consiste en un motor eléctrico o hidráulico (normalmente el segundo) que hace girar lentamente la turbina cuando no está en funcionamiento. Esto evita que el rotor se curve, debido a su propio peso o por expansión térmica, en parada. La velocidad de este sistema es muy baja (varios minutos para completar un giro completo de turbina), pero se vuelve esencial para asegurar la correcta rectitud del rotor. Si por alguna razón este sistema se detiene (avería del rotor, avería de la turbina, inspección interna con desmontaje) es necesario asegurar que, antes de arrancar, estará girando varias horas con el sistema virador.

### **Pérdidas en una TV**

- Roce del vapor dentro de la tobera
- Roce del vapor al pasar a través de los álabes móviles
- Roce del vapor al pasar por enderezadores
- Pérdidas por fricción al girar el disco del rotor en el espacio que queda en la carcasa
- Pérdidas mecánicas en el rotor

### Algunas características de las Turbinas:

- **Consumo Especifico Típico (Turbina):**      **3,1 / 3,4 tn Vapor / MWh**
  - **Producción de Vapor (Caldera):**              **15 tn Vapor / tn fuel oil.**
- 

$$\Rightarrow \eta_{>150MW} = 38 \div 41\% \left( 2300 \div 2100 \frac{kCal}{kWh} \right)$$

$$\Rightarrow \eta_{<150MW} = 30 \div 38\% \left( 2900 \div 2300 \frac{kCal}{kWh} \right)$$

---

#### Fabricantes

- GENERAL ELECTRIC
  - SIEMENS
  - ALSTOM
  - MITSUBISHI
- 

#### Potencias

- 45 kW a 1600 MW (\*)
- Hasta 500 MW para CC

(\*) para Plantas Nucleares

---

#### Temperaturas y Presiones

- 530° / 600°
  - <225 bar (Subcríticas)
  - 225 a 250 bar (Supercríticas)
  - >250 bar (Ultra Supercríticas)
- 

#### Combustibles

- Gas Natural
  - Fuel Oil
  - Carbón (Pulverizado / Lecho Fluidizado)
-

## **CENTRAL de Biomasa**

La biomasa es la fracción biodegradable de productos de desechos y residuos procedentes de la agricultura, silvicultura y de las industrias relacionadas, así como de la fracción biodegradable de residuos industriales y municipales.

Una central termoeléctrica de biomasa es una planta de generación eléctrica que aprovecha la energía química contenida en una cantidad determinada de biomasa y que es liberada como energía térmica mediante un proceso de combustión.

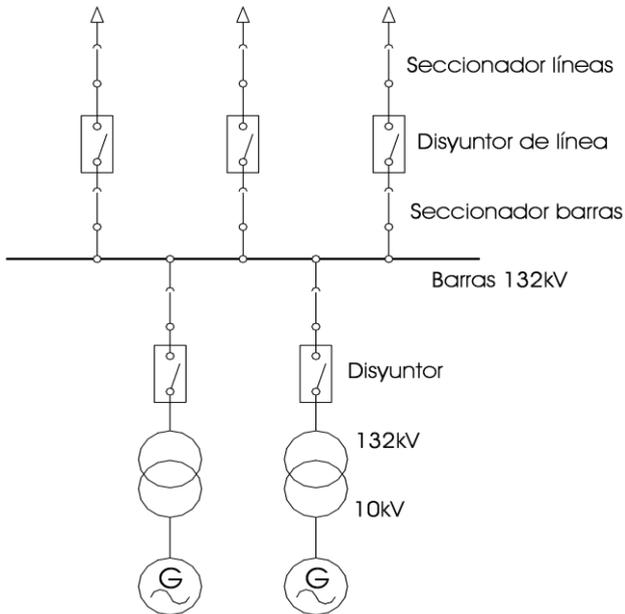


Una planta de valorización de BM debe disponer de un sistema de pretratamiento de BM, cuyo fin es la disminución de la humedad que contiene y la adecuación del tamaño de la BM, con el fin de uniformizar las condiciones de entrada en la caldera y conseguir la mayor eficiencia del sistema de combustión.

El alto contenido de potasio y cloro de la BM, provoca incrustaciones y corrosión en diversas partes de la caldera, por lo que debe seleccionarse con mucho cuidado estas calderas.

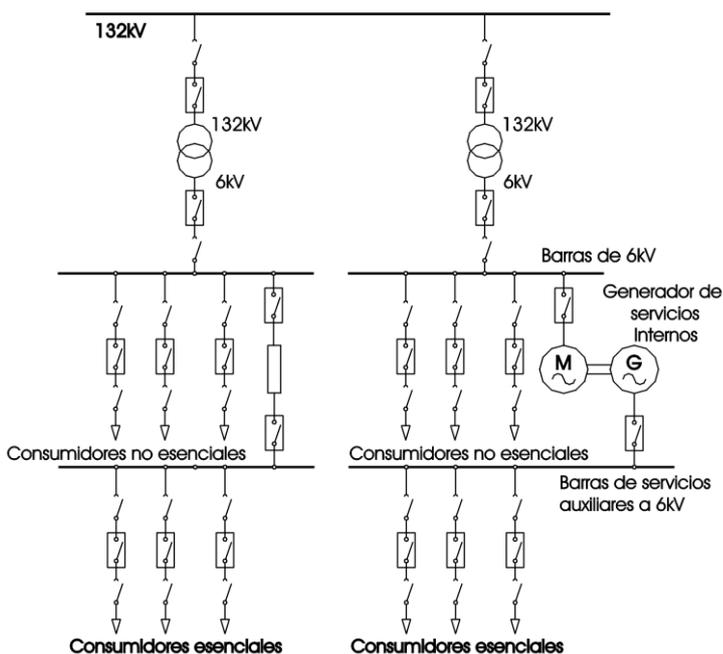
## Circuitos Eléctricos

Circuito de Conexión del Generador y Transformador de potencia por medio de una barra colectora simple.



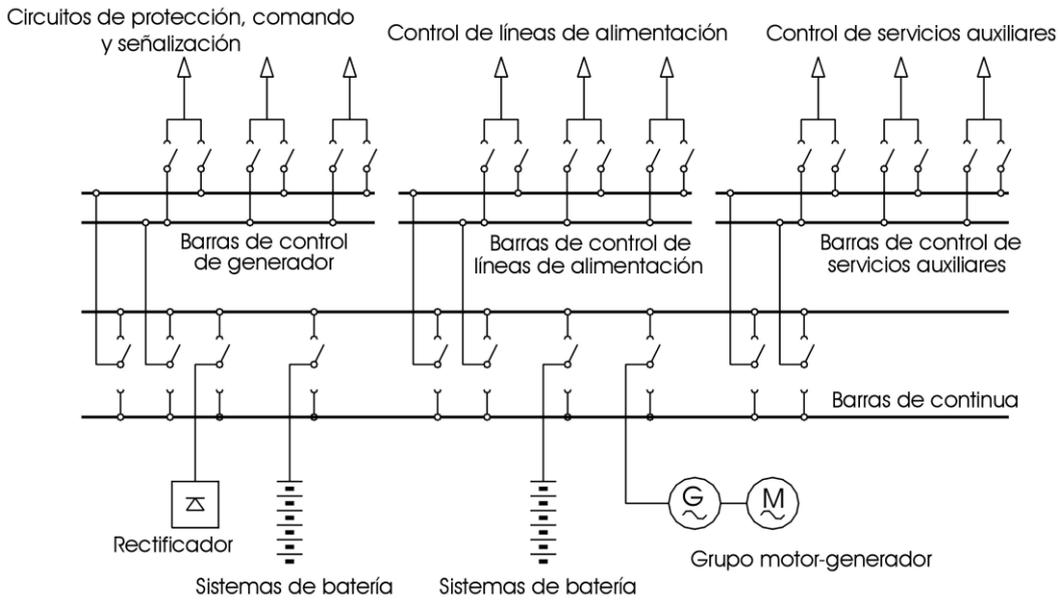
## Circuito Servicios Auxiliares

Alimentación a bombas de la playa de descarga, almacenamiento y provisión de combustible a quemadores de caldera, alimentación a bombas de circulación de agua de refrigeración y ventiladores de torre, alimentación a planta de tratamiento de agua, alimentación a bombas de circulación de agua, bombas de agua de alimentación y ventiladores de caldera, alimentación a bombas de sistema contra incendio, alimentación a equipos asociados a la turbina y generador, iluminación externa e interna, etc



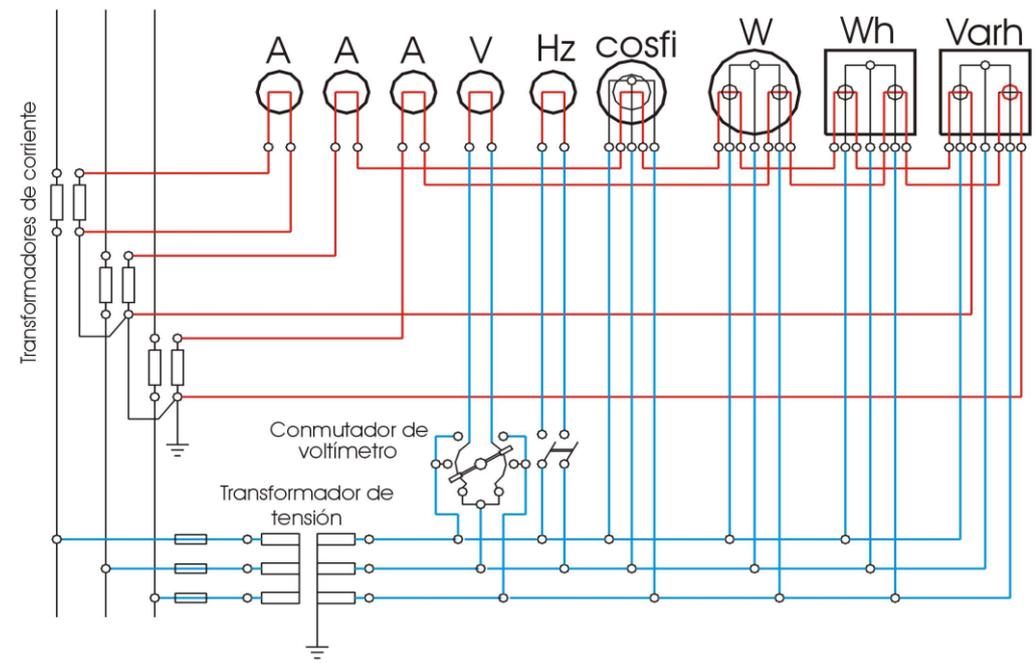
### Circuito de corriente continua

Alimenta los circuitos de control, protecciones eléctricas, comando de interruptores y señalización



### Circuito de mediciones eléctricas

Por ejemplo para medir un generador de energía eléctrica trifásico



---

## **EL CICLO RANKINE**

El ciclo Rankine es el ciclo ideal para las plantas de potencia de vapor. El ciclo ideal Rankine, Figura 2.28, no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto por los siguientes cuatro procesos reversibles:

**1-2 Compresión isoentrópica en una bomba.**

**2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.**

**3-4 Expansión isoentrópica en una turbina.**

**4-5 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.**

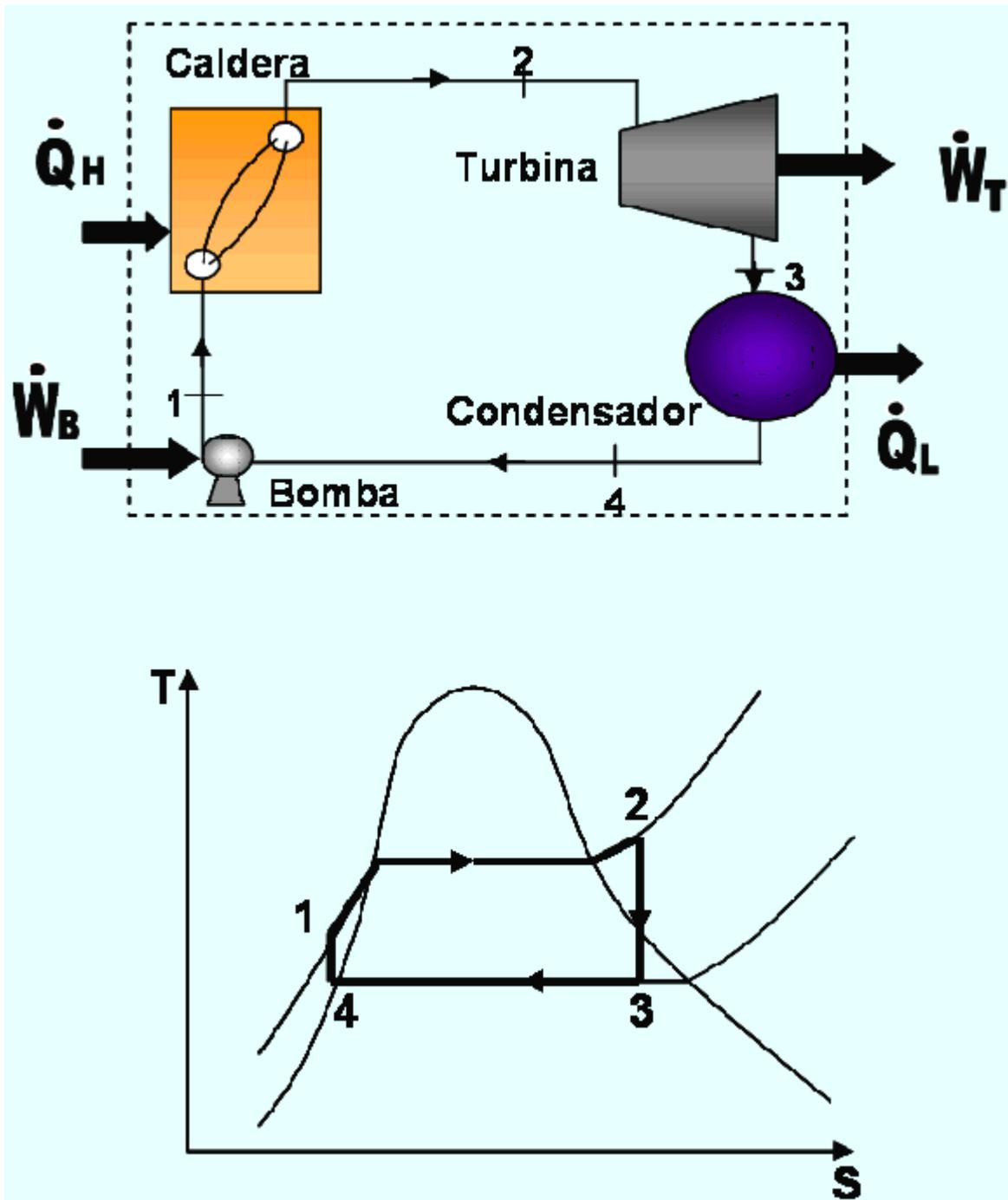


Fig. 2.28 El ciclo ideal Rankine simple.

### ANÁLISIS DE ENERGÍA DEL CICLO IDEAL RANKINE

Los componentes del ciclo Rankine (bomba, caldera, turbina y condensador) son dispositivos de flujo estacionario. Los cambios en la energía cinética y potencial del vapor suelen ser pequeños respecto de los términos de trabajo y de transferencia de calor y, por consiguiente, casi siempre se ignoran. Por lo tanto, se aplican las ecuaciones 2.62 y 2.63 que corresponden a la ecuación de conservación de la masa y a la de conservación de la energía para flujo estacionario.

Para la caldera:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad 2.124$$

Para la turbina:

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad 2.125$$

Para el condensador:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad 2.126$$

Para la bomba:

$$\dot{W}_B = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad 2.127$$

Por ser el proceso en la bomba, adiabático reversible, se puede utilizar la ecuación 2.120, resultando sencilla la integración ya que el volumen específico del fluido en una bomba, se puede considerar constante. Se escoge como volumen específico el volumen del líquido saturado a la entrada de la bomba:

$$\dot{W}_B = \dot{m}v_4(P_4 - P_1) \quad 2.128$$

### CICLO DE POTENCIA DE VAPOR REAL

En el ciclo real se consideran las irreversibilidades en diversos componentes. La fricción del fluido y las pérdidas de calor indeseables hacia los alrededores son las dos fuentes más comunes de irreversibilidades.

De particular importancia son las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y la turbina. Una bomba requiere una entrada de trabajo mayor, y una turbina produce una salida de trabajo más pequeña como consecuencia de las irreversibilidades. En condiciones ideales, el flujo por estos dispositivos es isoentrópico. La desviación de las bombas y turbinas reales de las isoentrópicas se compensa exactamente empleando *eficiencias adiabáticas*, definidas como

Para la bomba

$$\eta_B = \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}_r} = \frac{h_{1i} - h_4}{h_{1r} - h_4} \quad 2.129$$

Para la turbina

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_r}{\dot{W}_i} = \frac{h_2 - h_{3r}}{h_2 - h_{3i}} \quad 2.130$$

Donde los estados 1r y 3r son los estados de salida reales de la bomba y la turbina respectivamente, 1i y 3i son los estados correspondientes para el caso isoentrópico. Figura 2.29.

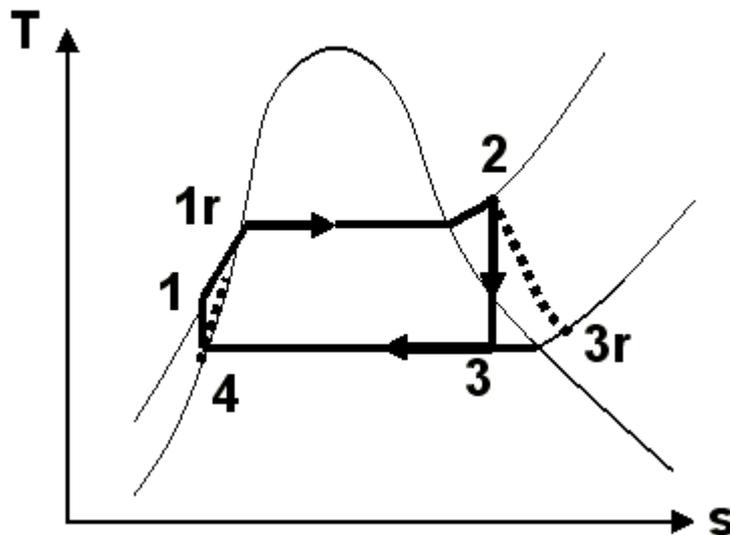


Fig. 2.29 Efecto de las irreversibilidades en el ciclo ideal Rankine

### EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO

La eficiencia térmica del ciclo es la eficiencia para una máquina térmica

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_B}{\dot{Q}_H} \quad 2.131$$

## INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se incrementa elevando la temperatura promedio a la cual se añade calor al fluido de trabajo y/o disminuyendo la temperatura promedio a la cual se rechaza el calor hacia el medio de enfriamiento, como un lago o un río. La temperatura promedio durante el rechazo de calor se reduce bajando la presión de salida de la turbina. En consecuencia, la presión del condensador está bastante por debajo de la presión atmosférica es decir corresponde a presión de vacío. La temperatura promedio durante la adición de calor se incrementa elevando la presión de la caldera o sobrecalentando el fluido a altas temperaturas. Sin embargo, hay un límite para el grado de sobrecalentamiento, puesto que no se permite que la temperatura del fluido exceda un valor metalúrgicamente seguro.

## CICLO IDEAL RANKINE CON RECALENTAMIENTO

El sobrecalentamiento tiene la ventaja adicional de disminuir el contenido de humedad del vapor a la salida de la turbina. Sin embargo, al disminuir la presión de escape o elevar la presión de la caldera se aumenta el contenido de humedad. Para aprovechar las mejores eficiencias a presiones más altas en la caldera y presiones menores en el condensador, el vapor suele recalentarse después de que se expande parcialmente en la turbina de alta presión, como nuestra la Figura 2.30. Esto se logra recalentando el vapor nuevamente en la caldera, después de haberse expandido en la turbina de alta presión. El vapor recalentado sale de la caldera y se expande en la turbina de baja presión hasta la presión del condensador. El recalentamiento disminuye el contenido de humedad a la salida de la turbina.

## CICLO IDEAL RANKINE CON REGENERACION

Otra manera de aumentar la eficiencia térmica del ciclo Rankine es por medio de la regeneración. Durante un proceso de este tipo, el agua líquida (agua de alimentación) que sale de la bomba se calienta mediante algo de vapor extraído de la turbina a cierta presión intermedia en dispositivos denominados calentadores de agua de alimentación. Figura 2.31. Las dos corrientes se mezclan en calentadores de agua de alimentación abiertos, y la mezcla sale como un líquido saturado a la presión del calentador. En calentadores de agua de alimentación cerrados, el calor se transfiere del vapor al agua de alimentación sin mezcla. Por tanto, un calentador de agua de alimentación abierto es, en esencia, una cámara de mezcla, y un calentador de agua de alimentación cerrado es un intercambiador de calor. Figura 2.32

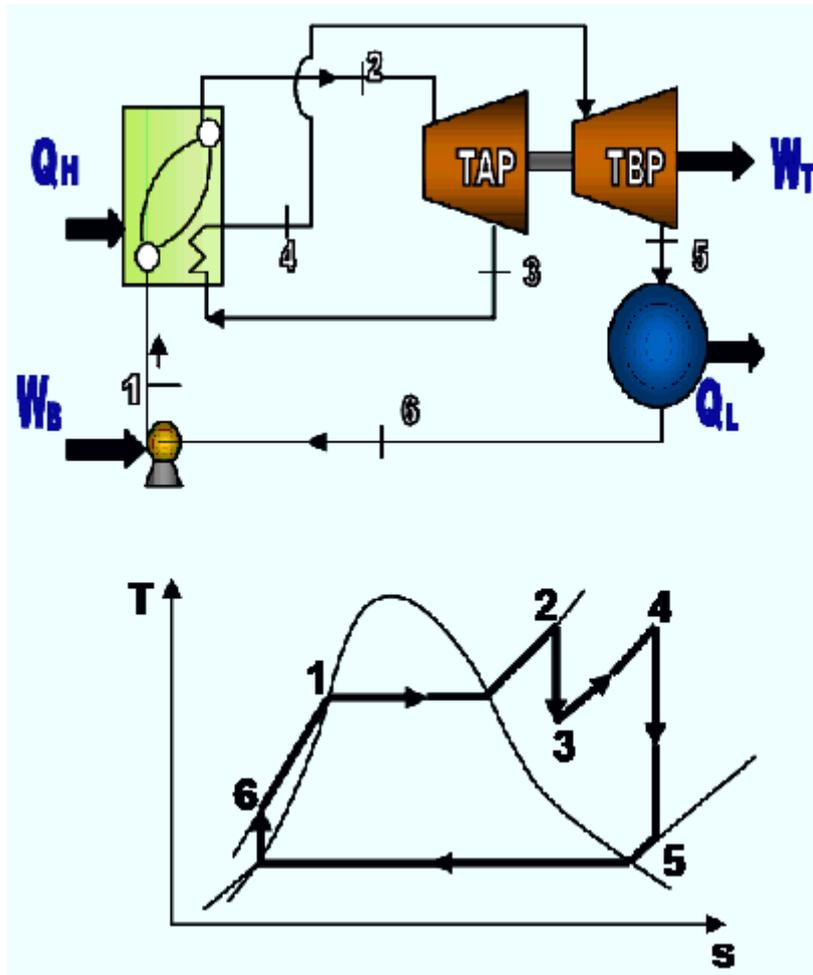


Fig. 2.30 El ciclo ideal Rankine con recalentamiento.

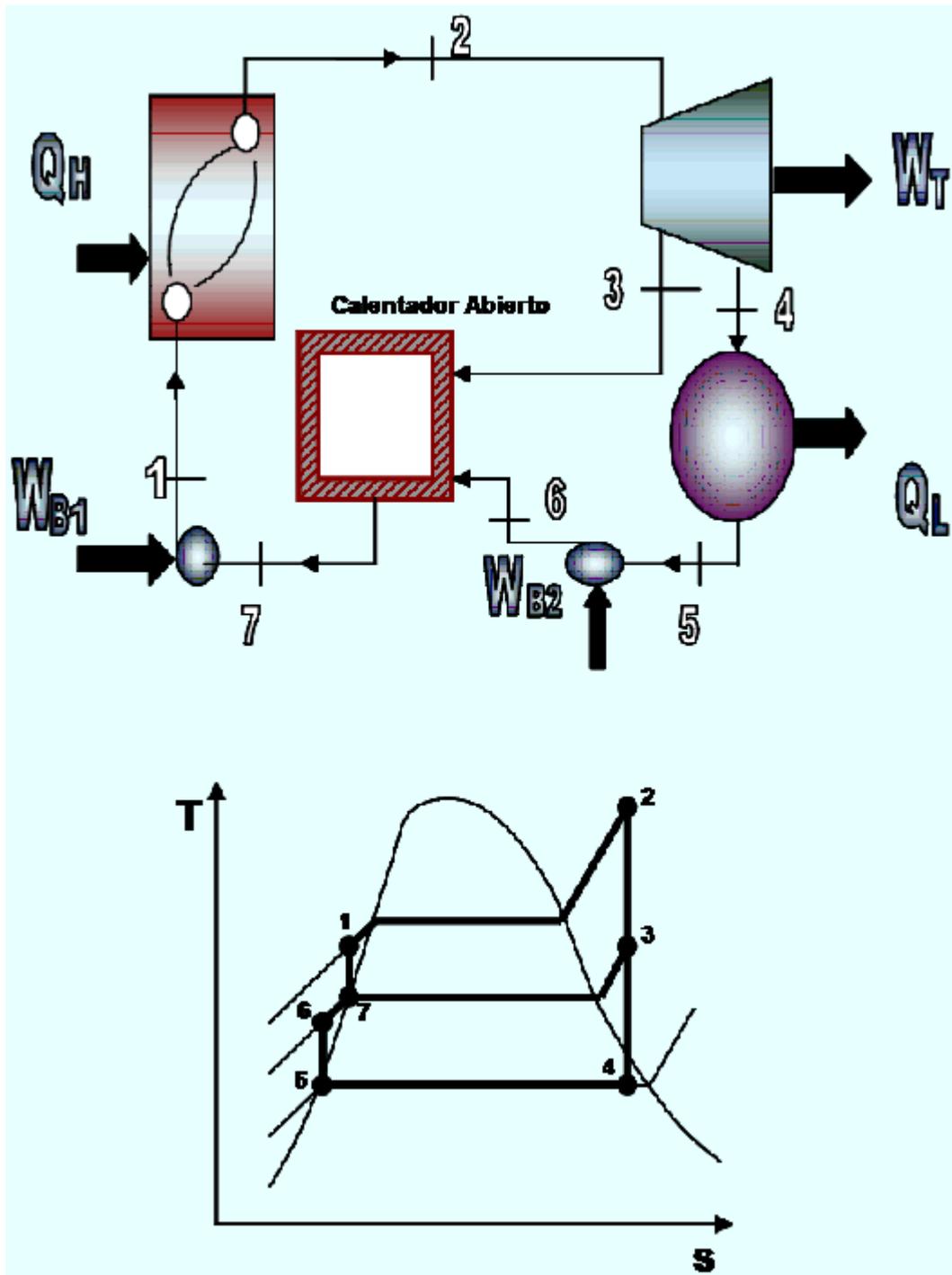


Fig. 2.31. El ciclo ideal Rankine regenerativo con un calentador de agua de alimentación abierto.

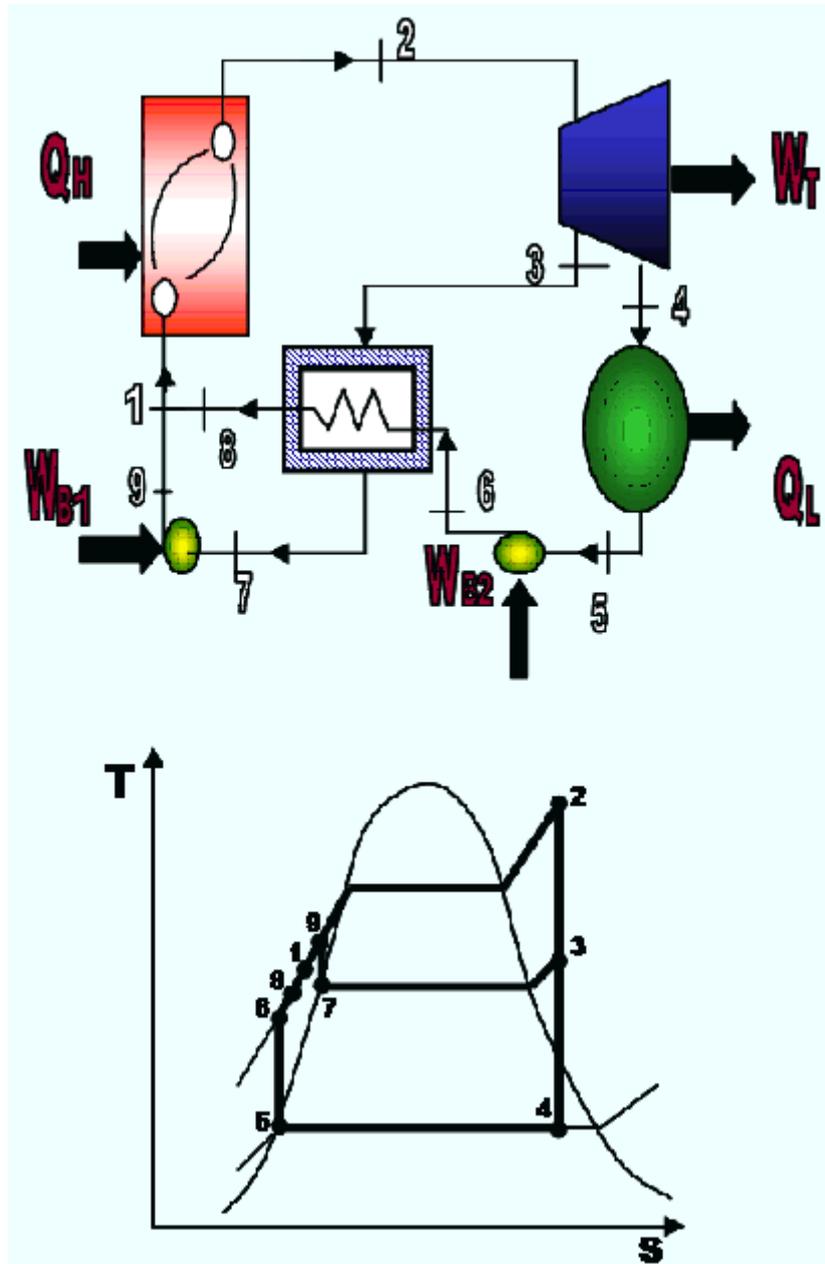


Fig. 2.32. El ciclo ideal Rankine regenerativo con un calentador de agua de alimentación cerrado.

Las torres de refrigeración son enormes hiperboloides de revolución, que emiten de forma constante vapor de agua, no contaminante, a la atmósfera. Para minimizar los efectos contaminantes de la combustión sobre el entorno, la central dispone de una chimenea de gran altura (llegan a los 300 m) y de unos precipitadores que retienen las cenizas y otros volátiles de la combustión. Las cenizas se recuperan para su aprovechamiento en procesos de metalurgia y en el campo de la construcción, donde se mezclan con el cemento.

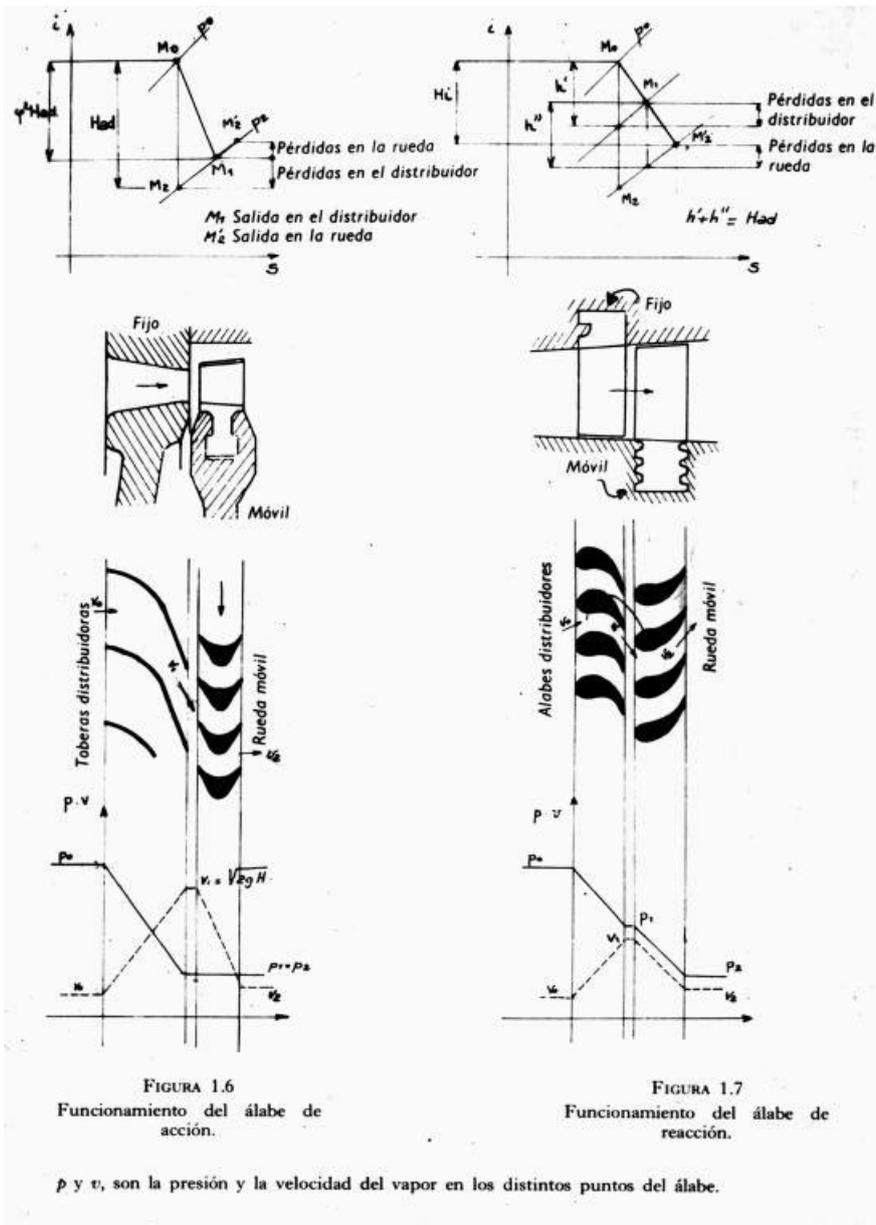
---

Un *generador de vapor* es el conjunto integrado por un *economizador*, *vaporizador* (o *caldera* propiamente dicha), *sobrecalentador*, *recalentador* y *precalentador de aire*. Además suele

A las TV Se las puede clasificar según el salto térmico y según el principio operativo. Según el salto térmico se las separa en:

- Turbinas de condensación: son las de mayor tamaño, utilizadas en centrales térmicas. La presión de descarga puede ser inferior a la atmosférica debido a la condensación del vapor de salida.
- Turbinas de descarga atmosférica: son generalmente de baja potencia, antieconómicas si utilizan agua tratada. No utilizan condensador de salida.
- Turbinas de contrapresión: se utilizan como expansoras para reducir la presión del vapor generando al mismo tiempo energía. Descargan el vapor a una presión aún elevada, para ser utilizado en procesos industriales.

Según el principio operativo se distinguen las turbinas de Acción y de Reacción, tanto de una como de varias etapas. La diferencia fundamental es que en las turbinas de acción no hay cambio de presión en la rueda móvil, obteniéndose el intercambio de energía por el cambio de velocidad absoluta del fluido.



### Empuje axial

Si se considera el rotor de la turbina de vapor simplemente como un objeto cilíndrico en una carcasa, se observa que un extremo está sometido a la alta presión del vapor de entrada y el otro a una presión de descarga que es muy inferior. Como resultado el rotor experimenta un empuje axial hacia la descarga. Dadas las altas presiones de alimentación y los grandes diámetros de las turbinas de potencia, el empuje puede ser sumamente elevado, más de lo que razonablemente pudiera soportarse con cojinetes de empuje axial. Para reducir este empuje se utilizan técnicas de balance de fuerzas utilizando la misma presión de vapor. Una técnica efectiva es la del émbolo compensador

**Los Álabe:** se realizan de aceros inoxidables, aleaciones de cromo-hierro, con las curvaturas de diseño según los ángulos de salida de vapor y las velocidades necesarias. Las últimas etapas son críticas por la posibilidad de existencia de partículas de agua que erosionarían los alabes. Por ello se fija una cinta de metal satélite soldando con soldadura de plata en el borde de ataque de cada alabe para retardar la erosión.

Los alabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y carcasa. Los alabes se pueden asegurar solos o en grupos, fijándolos en su posición por medio de ranuras en el rotor. La raíz del álabe puede tener forma de abeto, ranura en forma de T, abeto en forma semicircular. También se pueden asegurar mediante pasadores, en forma perno, o mediante remaches. Los extremos de los alabes se fijan en un anillo donde se remachan, y los más largos a menudo se amarran entre si con alambres o barras en uno o dos lugares intermedios, para darles mayor rigidez.

Las diferentes etapas de una turbina están comprendidas por hileras de álabes fijos y móviles.

La función de los álabes fijos es: dirigir el flujo de vapor con el ángulo y velocidad adecuados hasta los álabes móviles para aprovechar de una forma más eficiente la energía del vapor.

En cambio, los álabes móviles se encargan de convertir la masa de vapor dirigida por los álabes fijos en velocidad rotacional y momento torsor.

**Cojinete de empuje o axial:** El cojinete axial, o de empuje impide el desplazamiento del rotor en la dirección del eje, Evitando el empuje axial que sufre el eje por el efecto del vapor repercute en el reductor, dañándolo seriamente. No se encuentra en contacto con el eje si no que hace tope con un disco que forma parte solidaria con el eje.

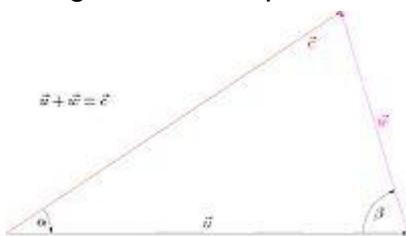
El cojinete está construido en un material blando y recubierto por una capa de material que disminuya la fricción entre el disco y el cojinete. Además, debe encontrarse convenientemente lubricado.

Para comprobar el estado de ese cojinete, además de la medida de la temperatura y de las vibraciones del eje, se mide de forma constante el desplazamiento axial. Si se excede el límite permitido, el sistema de control provoca la parada de la turbina o impide que esta complete su puesta en marcha.

---

## Triángulo de velocidades

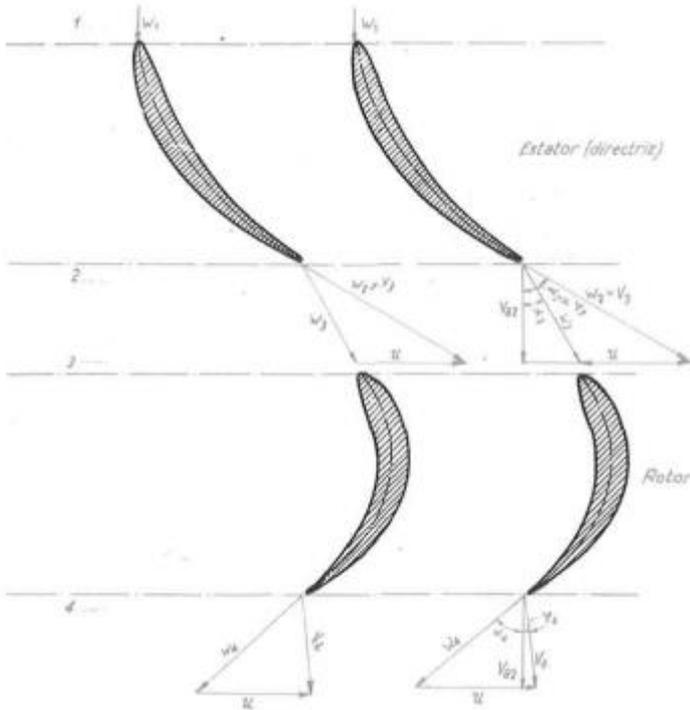
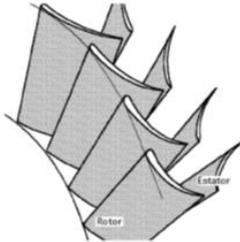
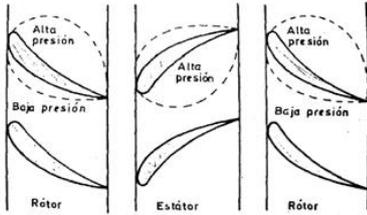
En el lenguaje de las turbomáquinas se habla de triángulo de velocidades para referirse al triángulo formado por tres vectores los cuales son:



- La velocidad absoluta del fluido  $\vec{c}$
- La velocidad relativa del fluido respecto al rotor  $\vec{w}$
- La velocidad lineal del rotor  $\vec{u}$

Estos tres vectores forman un triángulo ya que la suma  $\vec{w} + \vec{u}$  en un mismo punto es igual a  $\vec{c}$  en ese punto por leyes del movimiento relativo de la mecánica clásica

El ángulo entre los vectores  $\vec{c}$  y  $\vec{u}$  es denotado  $\alpha$  y el ángulo entre los vectores  $\vec{w}$  y  $\vec{u}$  es denotado  $\beta$ .



**La velocidad tangencial del extremo del álabe: el número Mach**

La velocidad tangencial del extremo del álabe del rotor. En las cercanías o más allá de la velocidad del sonido se producen ondas de choque muy perjudiciales para la estructura mecánica del compresor. De hecho, esa limitación constituye una de las principales limitaciones para construir turbinas más potentes. La velocidad del sonido depende de la temperatura y la presión, por lo que para facilitar el estudio, entre otros, del comportamiento de un objeto moviéndose a altas velocidades se define el número de Mach como la relación existente entre la velocidad de un objeto en unas condiciones de presión y temperatura determinadas y la velocidad del sonido en esas mismas condiciones:

$$M = \frac{V}{V_s}$$

Siendo:

- V= Velocidad del objeto
- V<sub>s</sub>= Velocidad del sonido
- M= Número adimensional de Mach

Así, se definen 4 posibles velocidades:

- Velocidad subsónica, M < 0,7

- Velocidad transónica  $0,7 < M < 1,2$
- Velocidad supersónico  $1,2 < M < 5$
- Velocidad hipersónico  $M > 5$

Se denomina Mach crítico al número de Mach de un objeto moviéndose en el seno de un fluido en el que el punto de máxima velocidad local del fluido (aire) que le rodea alcanza la velocidad del sonido. Esto último equivale a que en dicho punto (el punto de máxima velocidad local del aire) se alcanza un Mach igual a 1. Hay que tener en cuenta que el aire y el álabe se mueven en direcciones diferentes, por lo que la velocidad a la que el álabe 've' el aire es superior a su movimiento tangencial. El número Mach de una turbina se sitúa en torno a 0,7. La velocidad tangencial del extremo de un álabe nunca puede superar esa velocidad, ya que se producen unas peligrosas ondas de choque y una importante pérdida de rendimiento del compresor, lo que constituye una limitación importantísima para construir ruedas de álabes de mayor tamaño o, siendo de pequeño tamaño, para que giren a mayor velocidad.

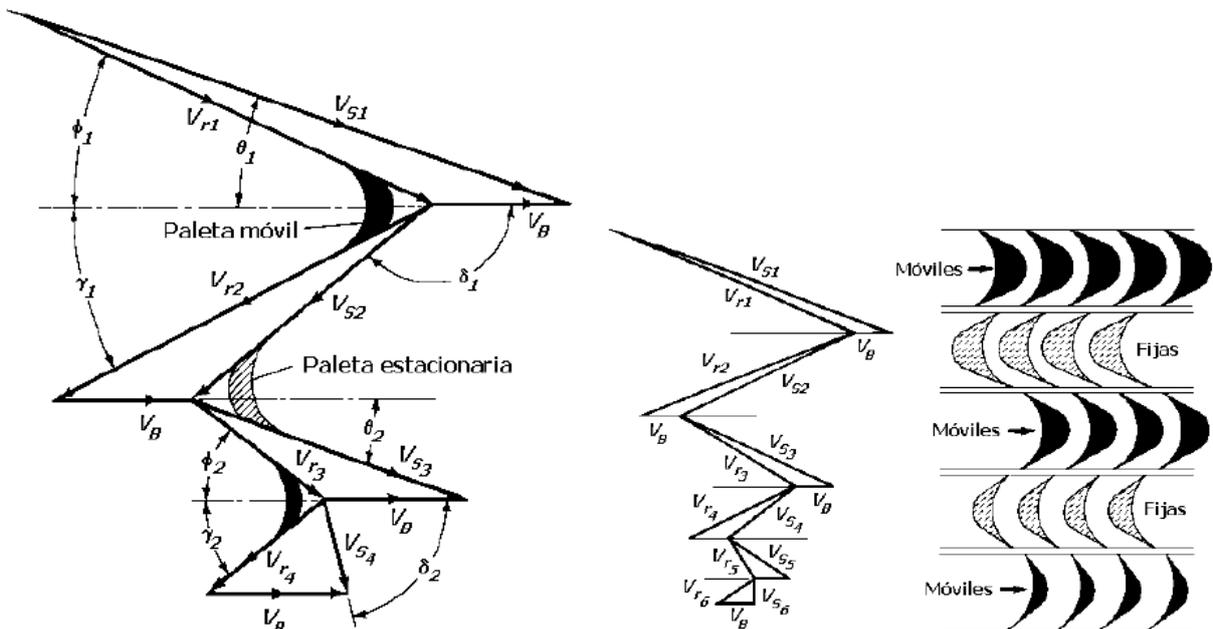
////////////////////////////////////

### 5.3 TURBINAS DE IMPULSO.

Las turbinas de impulso son turbinas de una o varias etapas (turbinas compuestas o *compound*) dotadas de paletas de impulso. Estas paletas de impulso (o de acción) se reconocen fácilmente por su forma. Suelen ser **simétricas**, y con ángulos de entrada y salida,  $\phi$  y  $\gamma$  respectivamente, que valen alrededor de  $20^\circ$ . Dado que frecuentemente se utilizan como etapas de alta presión a la entrada de las turbinas de vapor, en donde el volumen específico del vapor (todavía poco expandido) es pequeño, requieren menores secciones de flujo que a presiones más bajas, pro lo que las paletas de impulso son más cortas y tienen secciones transversales prácticamente constantes a lo largo de toda su longitud.

Las turbinas de impulso se caracterizan también por el hecho de que la mayor parte, o la totalidad, de la caída de entalpía (y de la presión) ocurre en las toberas (o paletas fijas, que funcionan como tales), mientras que no se produce prácticamente caída alguna en las paletas móviles. La pequeña caída de presión que, no obstante, aparece en dichas paletas móviles es producto del rozamiento, lo que origina el coeficiente el coeficiente de velocidades  $k_v$ , antes definido. Estas turbinas de impulso con una o varias etapas (turbinas *compound*) se describirán a continuación.

Aunque la etapa Curtis está compuesta por sólo dos coronas de paletas móviles, una turbina de impulso con escalonamiento de velocidad puede constar de un número mayor de tales coronas, todas las cuales comparten la energía cinética del vapor de entrada,  $V_{S1}$ . Dicho escalonamiento se suele conseguir empleando ángulos de paleta cada vez mayores, resultando unas paletas más planas y delgadas para las últimas coronas, tal como muestra la **Figura 5-11** para el caso de tres coronas de paletas móviles. La ecuación que resulta entonces del trabajo de turbina se



**Figura 5-10:** Diagrama de velocidades para una etapa Curtis, representado con el mismo  $V_B$  para ambas coronas de paletas fijas, y teniendo en cuenta el rozamiento. Obsérvese el efecto de la variación de la velocidad sobre los ángulos de la paleta.

### TURBINAS de REACCION

Una turbina de reacción, por tanto, consta de una serie de coronas de paletas fijas y de paletas móviles intercaladas. Las paletas fijas funcionan como toberas. Las paletas móviles se mueven como consecuencia del impulso del vapor recibido (debido a la variación de su cantidad de movimiento), y también como resultado de la expansión y aceleración del vapor que tiene lugar en ellas. Es decir, en parte actúan también como toberas. La caída de entalpía por etapa, constituida

El término *turbina de reacción* se emplea a pesar del hecho de que no sea posible construir turbinas de reacción pura. Es por ello que algunos especialistas europeos prefieren utilizar los términos de turbinas de presión constante y de presión variable para referirse a las turbinas de impulso y de reacción, respectivamente.

Las turbinas de reacción, desarrolladas inicialmente por **C. A. Parsons**, se representan en la *Figura 5-14*, para el caso de una de tres etapas, cada una de ellas compuesta por una corona de paletas fijas y otra de paletas móviles. Las paletas estacionarias se proyectan de tal modo que los canales entre ellos conformen zonas de flujo en tobera. Por ello constituyen toberas con admisión total del vapor alrededor de la periferia del rotor.

