
GENERADORES DE VAPOR

General La generación de vapor para el accionamiento de las turbinas se realiza en instalaciones generadoras comúnmente denominadas calderas. La instalación comprende no sólo la caldera propiamente dicha, sino, además, componentes principales y accesorios tales como:

- ☐ Economizadores y chimeneas.
- ☐ Sobrecalentadores y recalentadores.
- ☐ Quemadores y alimentadores de aire.
- ☐ Condensadores.
- ☐ Bombas y tanques de alimentación.
- ☐ Domos.

En la caldera propiamente dicha se produce el calentamiento, la evaporación y posiblemente el recalentamiento y sobrecalentamiento del vapor. La caldera puede incluir en su estructura alguno de los componentes citados.

Las calderas se pueden clasificar según:

- a) El pasaje de fluidos, en humotubulares o acuotubulares.
- b) El movimiento del agua, de circulación natural o circulación forzada.
- c) La presión de operación, en subcríticas y supercríticas.

Las calderas primitivas consistían en un gran recipiente lleno de agua que era calentado por un fuego en su parte inferior. El gran volumen de agua en estado de ebullición generaba fácilmente situaciones de gran riesgo al excederse la presión máxima admisible.

Para aumentar la superficie de contacto gas-metal, y disminuir la cantidad de agua en ebullición se crearon primero las calderas humotubulares, en las que los gases de combustión circulan por tubos inmersos en el agua. El próximo paso en el desarrollo fue la creación de las calderas acuotubulares, en las que el agua circula por tubos que forman las paredes del hogar. De este modo se maximiza la transferencia de calor y se minimiza el volumen de agua reduciendo el riesgo de explosión.

Calderas humotubulares Son calderas pequeñas, comúnmente utilizadas para producir agua caliente para calefacción y proceso, aunque las hay productoras de vapor de relativamente baja presión (hasta 12 atm).

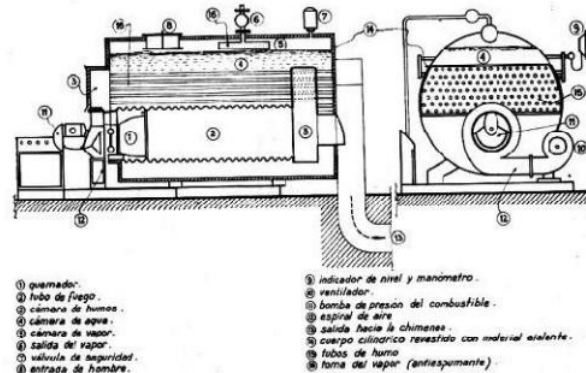


Fig. 2.7

Fig. 11.1: Caldera humotubular de un paso (Shield).

Las hay de uno o varios pasos de los gases por los tubos, de distintas configuraciones (fondo y/o piso húmedo o refractario, compactas, verticales).

Si bien la limpieza de los tubos de humo es sencilla, requieren buena calidad de agua, pues la limpieza de los tubos en su parte externa (depósitos calcáreos) es dificultosa.

Calderas acuotubulares

Los tubos de agua se unen y conforman para formar el recinto del hogar, llamado de paredes de agua. El recinto posee aberturas para los quemadores y la salida de gases de combustión. La circulación del agua puede ser natural, debida a la diferencia de densidad entre agua fría y caliente. El agua en ebullición se acumula en un recipiente llamado domo donde se separa el vapor del agua:

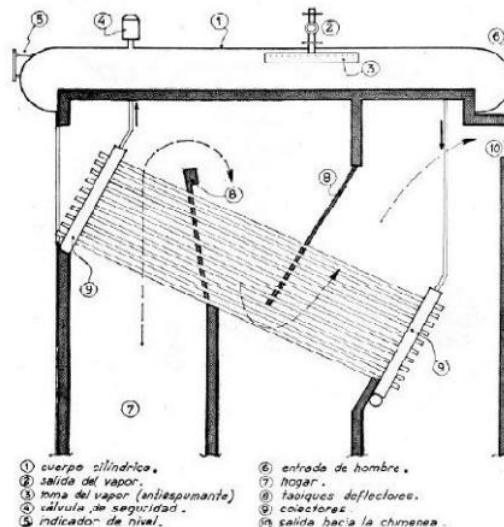


Fig. 2.10

Estas calderas son económicas por la ausencia de las bombas de líquido pero de baja producción de vapor por la baja velocidad de circulación del agua. Para obtener mayores caudales de vapor y mayores presiones se utilizan bombas de alimentación de agua, pudiendo operarse incluso por



encima del punto crítico de la campana de vapor (21.7 Mpa = 220 atm)
La figura siguiente ilustra un circuito típico del tipo Benson. Si se añade una bomba de recirculación, para mover rápidamente el agua en los tubos evaporadores, y un domo para separar el vapor se tiene el tipo Lamont.

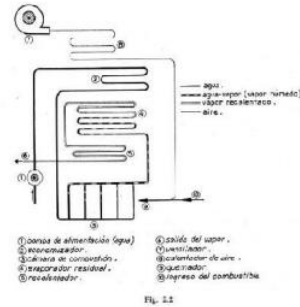


Fig 11.3: Caldera tipo Benson (Shield).

4. Ciclos de vapor

El ciclo mas simple de vapor es el de Rankine:

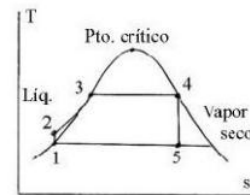


Fig. 11.4: Ciclo Rankine simple

- 1-2: bomba de alimentación.
- 2-3: calentamiento de agua a $p = \text{cte}$.
- 3-4: ebullición a p y $T = \text{cte}$.
- 4-5: expansión en turbina, maquina de vapor.
- 5-1: condensación del vapor húmedo.

Este ciclo es inadecuado para turbo maquinas ya que el vapor húmedo (4-5) arrastra gotas de agua que dañan rápidamente los álabes de las turbo maquinas.

Para evitar esto se continúa sobrecalentando el vapor seco a $p = \text{cte}$, lográndose el ciclo Rankine con sobrecalentamiento o ciclo Hirn:

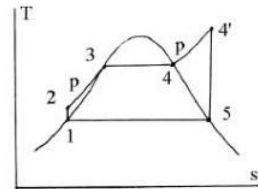


Fig. 11.5: Ciclo Hirn

Obtenido esto el circuito típico sería el de la figura:

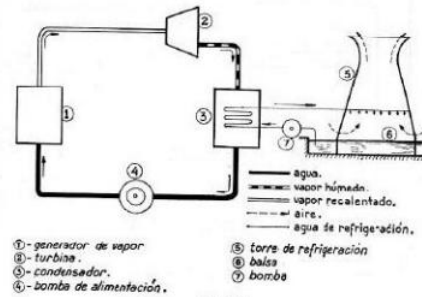


Fig. 2.1

Fig. 11.6: Generador de vapor típico.

Para maximizar el trabajo útil 4'-5 se pueden intentar diversos métodos:

- Aumentar la p de operación (energía de la bomba, materiales)
- Aumentar la T de sobrecalentamiento (materiales)
- Recalentar

Reducir la presión del condensador

El ciclo con recalentamiento consiste en extraer vapor de etapas intermedias de la turbina y volver a calentarlo a $p=cte$ en la caldera:

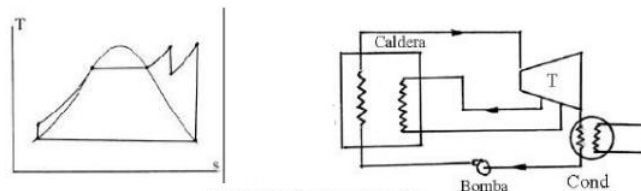


Fig. 11.7: Ciclo Hirn con recalentamiento

Con esto se logra un mayor salto entálpico sin exceder los límites impuestos por los materiales.

La presión de condensación es fundamental ya que no sólo controla el área del ciclo si no también asegura que la turbina no opere con vapor húmedo en las ultimas etapas.

El límite inferior está dado en general por la presión de vapor del agua a la temperatura a que el condensador es capaz de enfriarla.

Condensadores Son intercambiadores de calor que utilizan agua fría (de una corriente

natural o enfriada en una torre de enfriamiento) para enfriar y condensar el vapor de escape de la turbina. Al ser el flujo caliente bifásico (vapor y líquido) su diseño y operación es muy complejo.

Se debe notar que como la bomba de condensado extrae el mismo caudal másico que entra, la presión queda fijada por el cambio de volumen de vapor a líquido (del orden de 300/1), por lo que el condensador, y las últimas etapas de la turbina, trabajan a presión inferior a la atmosférica. La diferencia que esto puede producir es notable: del diagrama de Mollier (unidad 8) obtenemos sobre la curva de vapor saturado (fin de la expansión, ingreso al condensador) para:

$P=10 \text{ atm (} T=180^{\circ}\text{C), } i=677 \text{ kcal/kg}$
 $P=1 \text{ atm (} T=100^{\circ}\text{C), } i=640 \text{ kcal/kg}$
 $P=0.05 \text{ atm (} T= 35^{\circ}\text{C), } i=613 \text{ kcal/kg}$

Si el punto de ingreso a la turbina fuera 10 atm, 800°C ($i=850 \text{ kcal/kg}$), el salto entálpico sería de 173, 210 o 237 kcal/kg (10% y 37%). Al estar parte del circuito bajo vacío es inevitable que entre aire al circuito (y quizás otros gases no condensables como CO₂). Se hace necesario extraer estos gases del condensador que está bajo vacío. Esto puede hacerse con bombas de vacío (costoso) o con eyectores de vapor. Una disposición típica sería:

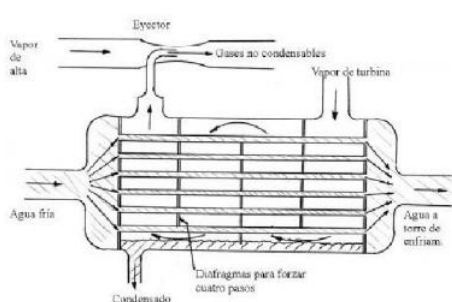


Fig. 11.8: Condensador y eyector

Los eyectores pueden ser de uno o más pasos, condensando el vapor de eyección entre pasos:

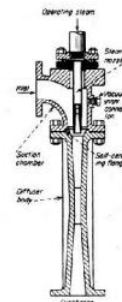


Fig 11.9: Eyector de una etapa (Perry's)

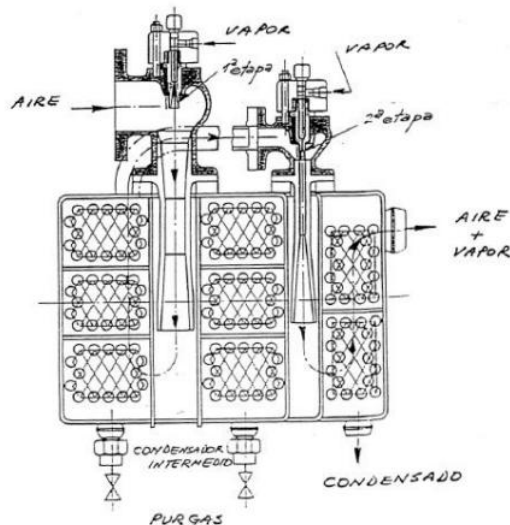


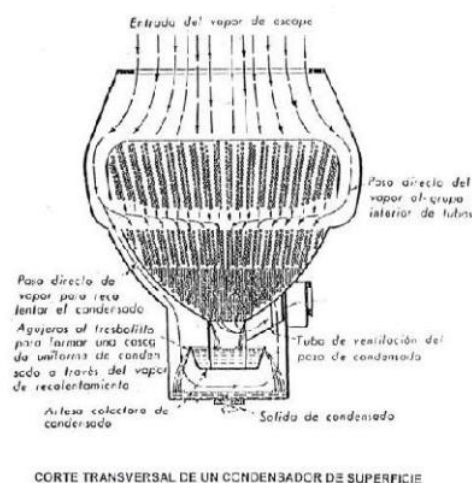
Fig. 11.10: Eyector de 2 etapas con condensación intermedia (Gannio)

Los condensadores pueden ser de superficie o de mezcla.

a) Condensadores de superficie:

El agua fría circula por tubos y el vapor por el exterior de los tubos (mayor área de transmisión de calor) El diseño busca minimizar las pérdidas de carga debidas al paso del vapor y aprovechar el intercambio entre el liquido ya condensado y el vapor. Parte del vapor puede utilizarse para volver a calentar el condensado a la salida, creando así un poco de regeneración (el agua que retorna a la caldera esta menos fría que lo estaba al condensar).

La figura siguiente ilustra una disposición típica:



Se aprecia que los tubos de agua están más próximos a medida que el vapor se va enfriando y condensando

b) Condensadores de mezcla:



Cuando, aparte de la turbina, hay otros usos del vapor que hacen necesario reponer una cantidad sustancial de agua, pueden utilizarse condensadores de mezcla, en los que el vapor condensa por contacto con el agua fría:

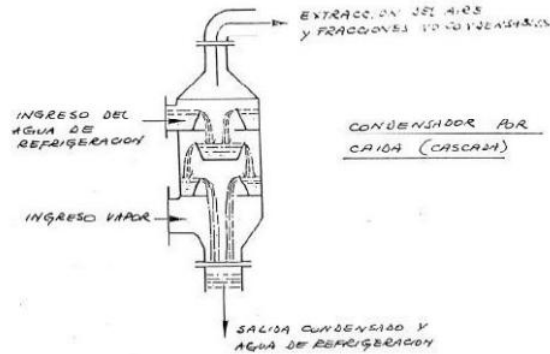


Fig. 11.12: Condensador de mezcla (Gannio)

Estos condensadores también pueden ser apropiados si hay abundante agua fría de buena calidad (arroyos de montaña).

La condensación puede mejorarse pulverizando el agua fría:

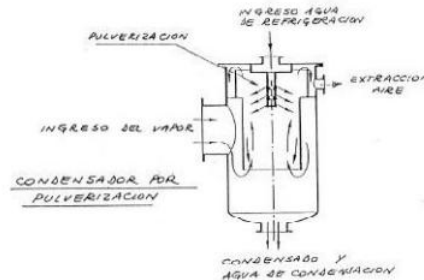
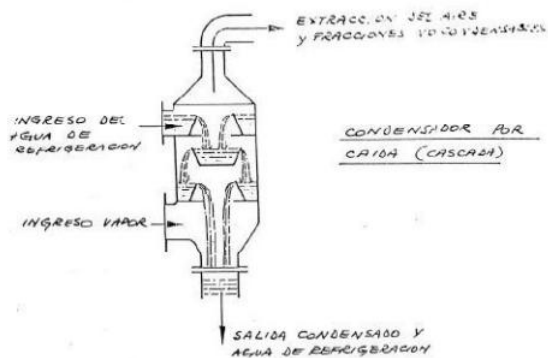


Fig. 11.13: Condensador por pulverización (Gannio)



Existen también condensadores de mezcla barométricos, que aprovechan el peso de la columna de agua para mantener vacío

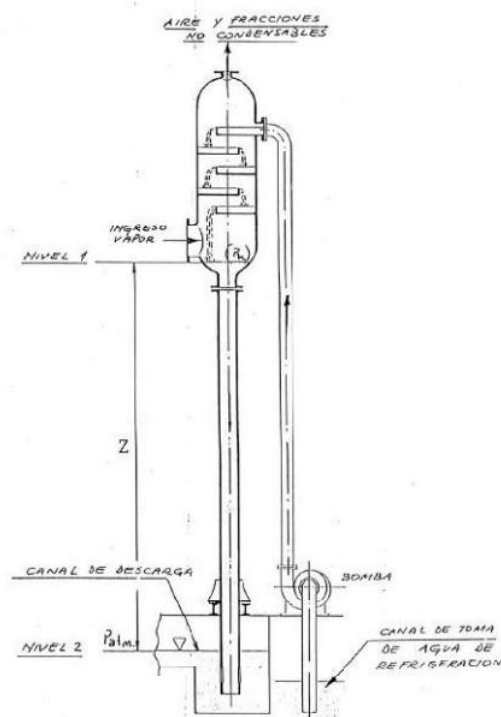


Fig. 11.14: Condensador barométrico (Gannio)

Agua, aire, combustible

El agua del ciclo de vapor debe cumplir requisitos de limpieza en lo que respecta a minerales en disolución, que causan depósitos en los tubos, y sustancias corrosivas (azufre, cloro, hidrógeno libre). Por lo tanto es necesario minimizar las pérdidas de vapor para reducir el consumo de agua. Esto es particularmente importante en las calderas de inyección directa (Benson) y humotubulares, donde el agua evapora dentro o sobre la superficie de los tubos. Las calderas tipo Lamont, en las que el vapor se separa en el domo, admiten agua de menor calidad. El aire para la combustión se alimenta por medio de sopladores de gran capacidad. Es común precalentar el aire aprovechando el calor de los gases de chimenea y/o pasarlos cerca de las paredes inferiores o el piso de la caldera, antes de llegar a los quemadores.

Las calderas pueden quemar casi cualquier tipo de combustibles sólidos (carbón, madera, residuos industriales o urbanos), líquido (fuel oil, gas oil, diesel oil) o gaseoso (gas natural, gas de horno petroquímico, etc.). sin embargo en nuestro país las grandes instalaciones productoras de electricidad funcionan casi exclusivamente con gas natural. Las calderas mas pequeñas (calefacción, proceso) pueden funcionar a fuel oil o gas oil pesado, aparte del gas natural. El aire y el combustible se alimentan al hogar por quemadores, orificios circulares en el centro de los cuales se inyecta el combustible. El aire ingresa por el sector anular, que está



provisto de persianas ajustables para controlar el caudal de aire. El conducto de ingreso de aire suele tener forma de caracol para dar al aire una rotación que sirve para estabilizar la llama y acortarla. También pueden haber alabes de guía para controlar la rotación. En el quemador también se ubican sensores de llama, termocuplas, llamas piloto y otros controles y accesorios.

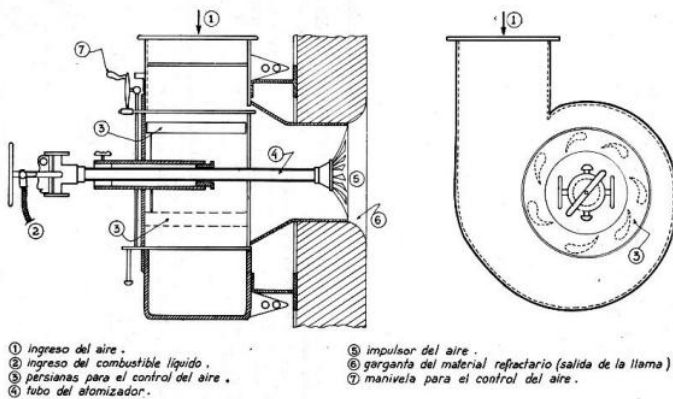


Fig 11.15: Quemador típico (Shield)