

# Calderas y Turbinas de Vapor para la Generación de Energía Eléctrica

Luis Milla Lostaunau

*Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú*

**RESUMEN:** Lo que pretende en este artículo es mostrar la importancia del uso de las calderas tubulares para la generación de vapor y el fluido de vapor producido para realizar el movimiento de las turbinas de vapor. La energía calorífica, el “calor” es un modo de manifestarse de la energía, ello es muy importante en la vida de nuestro planeta. El calor produce trabajo si se pasa de una temperatura superior a otra más baja (principio de Carnot). El dispositivo o aparato que permite transformar la energía calorífica en energía mecánica se denomina motor térmico. [1]

**ABSTRACT:** The calorific energy, “the heat” is the way of manifest of the energy, it is very important of the life planet. The heat produce work if is pass of one temperature superior to other more down (principle Carnot).

All dispositive or apparatus that permit transform the energy calorific in mechanic energy it is call thermic motor.

This transformation it is realize or the make a agent fluid whose temperature it is high previously by means one combustion it is verify out or inside of motor, it classify this in motors of combustion external.

**PALABRAS CLAVES:** Energía, calorífica, turbinas, calderas, uranio, antracita.

## I. INTRODUCCIÓN

La razón de una central de fuerza es la producción de energía, con el máximo rendimiento posible, de acuerdo con las expectativas económicas que se tengan.

Esta meta se busca tanto si se produce quemando directamente combustible, como en el caso de los motores de combustión interna, o bien usando los saltos de agua; el tipo de central que nos dé mejores

condiciones económicas, será el que deberíamos considerar de preferencia.

La utilización de la fuerza motriz para apoyar al hombre en sus trabajos más duros, ha sido una de las más grandes contribuciones en el desarrollo de los seres humanos. En el caso del uso del vapor, su primera aplicación y orientada a la obtención de energía, fue con la turbina a reacción de Hero (150 a.a. de J.C.)

Thomas Newcomen y James Watt ayudaron mucho en mejorar los mecanismos que permitían utilizar la energía contenida en el vapor.

Thomas Newcomen, un herrero muy hábil, inventó una máquina térmica de un cilindro abierto por arriba, en el interior se deslizaba un émbolo, el que iba unido por una cadena en sus extremos de un balancín fijo en su punto medio y en el otro extremo llevaba un contrapeso capaz de levantar el émbolo. El vapor introducido expulsaba el aire y se enfriaba y condensaba el vapor, mediante un chorro de agua, al crear un vacío parcial, permitía a la presión atmosférica impulsar el émbolo hacia abajo. Watt lo perfeccionó evitando el alternativo calentamiento y enfriamiento del cilindro y su cambio consistió en producir la condensación del vapor, en otro recipiente la “cámara de vacío”, como lo llamó y redujo el consumo de vapor en 75%.

Una máquina con esta innovación pudo impulsar una bomba hidráulica y mover los fuelles de fundición pero no podía mover las ruedas de la industria.

Posteriormente Boulton financista y fabricante lo animó a Watt para desarrollar la máquina y asociarse con él. En 1783 Watt consiguió la máquina de movimiento rotativo, que presentó al mercado en 1785. El mejoramiento de la máquina de vapor se vio estimulado porque los saltos de agua se habían agotado en Inglaterra, y se necesitaba encontrar energía más barata y abundante.

El mecanismo decorrerá fue descubierto accidentalmente, después, por un muchacho cuya misión era la de invertir la corredera al final de cada

carrera del émbolo. Conecto ingeniosamente el vástago de la corredera en un punto de la misma máquina dotando de movimiento alternativo.

También Watt concedió gran atención a las calderas, parte importante en la producción del vapor.

En el desarrollo de las centrales en Estados Unidos, el primer paso, hacia la producción de energía fue dado por la construcción de la central Peral Street, por el gran inventor Thomas A. Edinson en 1880, pasa New Cork Edinson Company. La Central estaba dotada de 6 alternadores bipolares, con capacidad para 10,000 luces cada uno, introduciéndose las calderas acuotubulares que desde esa época, fueron clásicas para centrales.

Por la necesidad de eliminar toda la mano de obra posible, Edinson construyó mecanismos para alimentación de carbón y evacuación de cenizas, así como conductos de humos y chimeneas de plancha de acero y motores que podían trabajar en paralelo para ventilar y enfriar eficazmente el rotor y el estator de las alternadores. En los Estado Unidos, desde el montaje de aquella famosa central el avance ha sido decisivo.[2].

## II. EQUIPOS DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR TURBINA DE VAPOR

### A. Antecedentes

De Laval en el año 1882, investigando un movimiento giratoria de gran velocidad para una desnatadora, hallo la primera aplicación comercial de la turbina. Viendo las posibilidades de tal aparato, estudio la forma de la tobera y fue el primero en adaptarla al inyector.

Desde 1884 a 1889, De Laval proyectó pequeñas turbinas equipadas con una tobera y un solo escalón, fabricándolas de desde HP a 100,000 rpm. Hasta 100KW a 6000rpm. C.A. Parsons y C.G.CURTIS, Inglés el primero y Americano el segundo, desarrollaron las turbinas de reacción y de impulsión, respectivamente. PARSONS patentó todos los tipos de turbinas de reacción y Curtis vendió sus proyectos y planos a la General Electric Company.

Las turbinas de vapor son máquinas accionadas por un fluido en movimiento en este caso, el fluido es el vapor, el cual debido a la presión que ejerce sobre la tobera y los alabes. La turbina consta de un rotor con eje, formado por planos de circunferencia que en los bordes contienen los alabes, los cuales impulsan a la rueda que están unidas a un eje principal. La turbina de vapor acciona un generador que produce energía eléctrica transmitiéndola a través de un sistema de

líneas de transporte de energía eléctrica. Ver figuras: 1, 2, 3, 4, 5, 6,7 y 8.

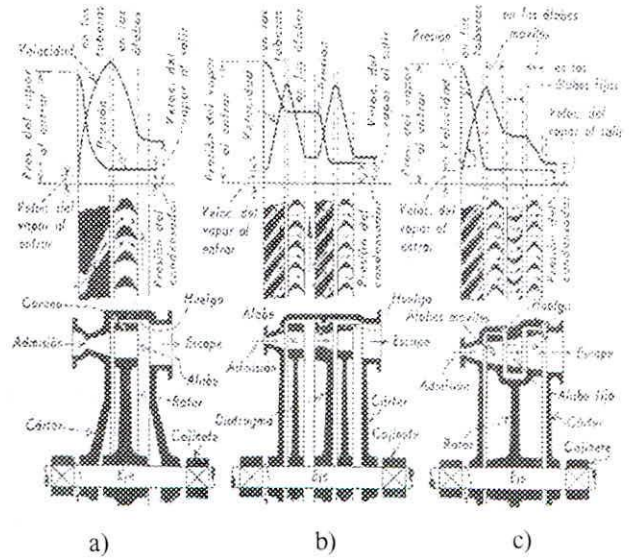


Fig.1. a) Turbina Simple de acción, b) Turbina de acción con presión escalonada (disposición Rateau) d) Turbina de velocidad escalonada (disposición Curtis)

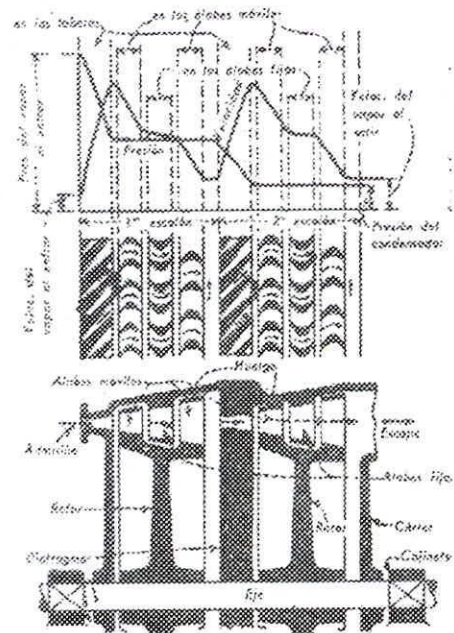


Fig.02. Turbina con escalonamientos de presión y de velocidad (Curtis)

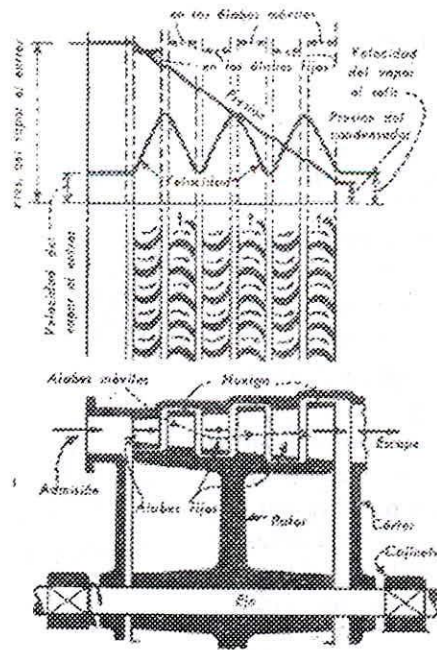


Fig. 03. Turbina de reacción (Parsons).

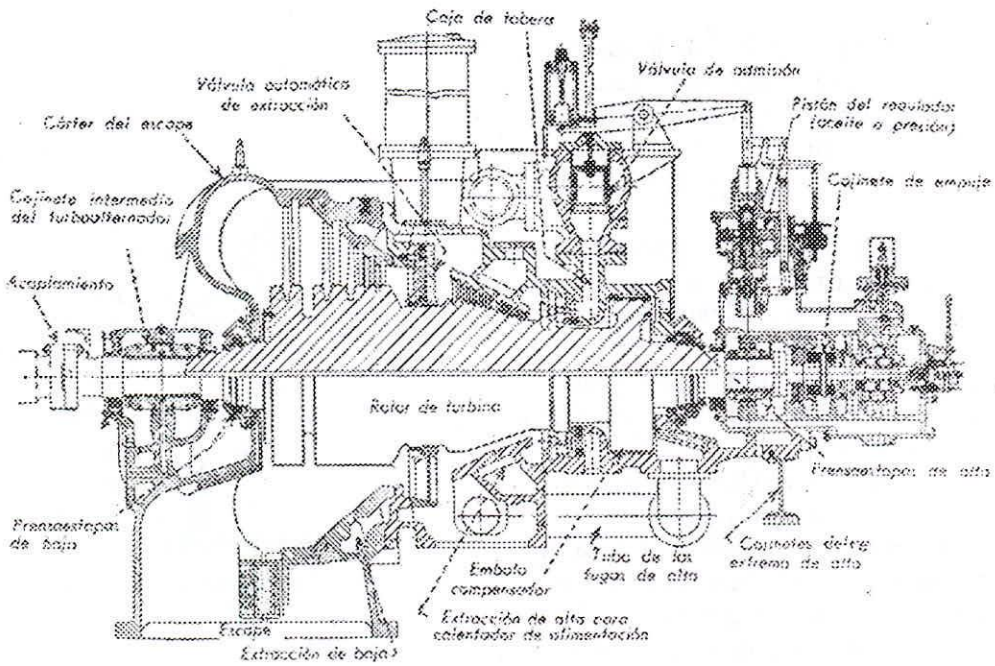


Fig.4. Corte longitudinal de una turbina (con extracción de vapor) de 10000 Kw, 3600 r.p.m.

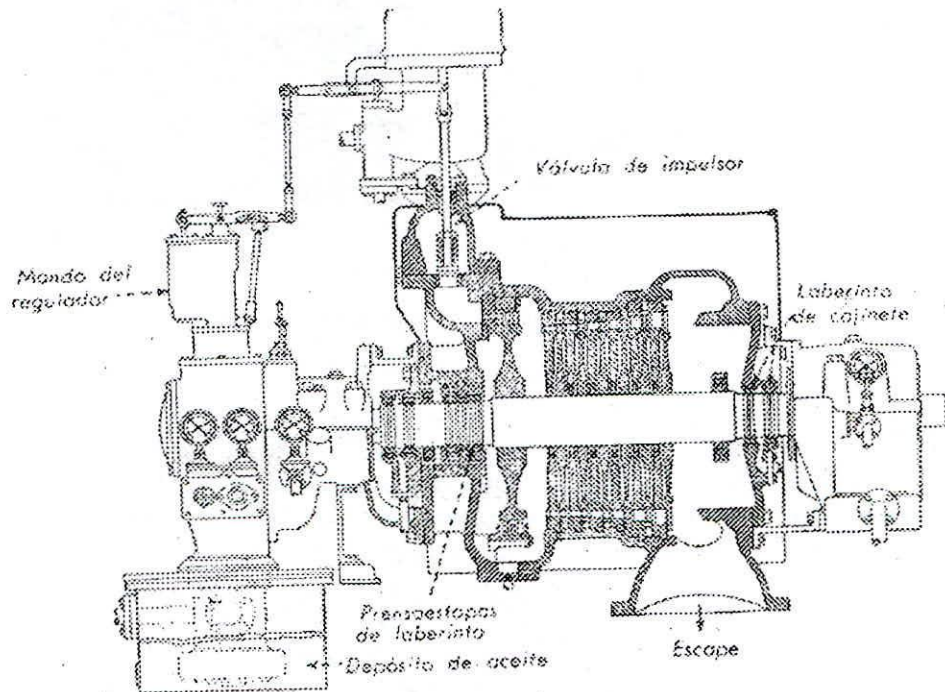


Fig.5. Turbina de vapor sin condensación y válvula accionada por válvula impulsora.

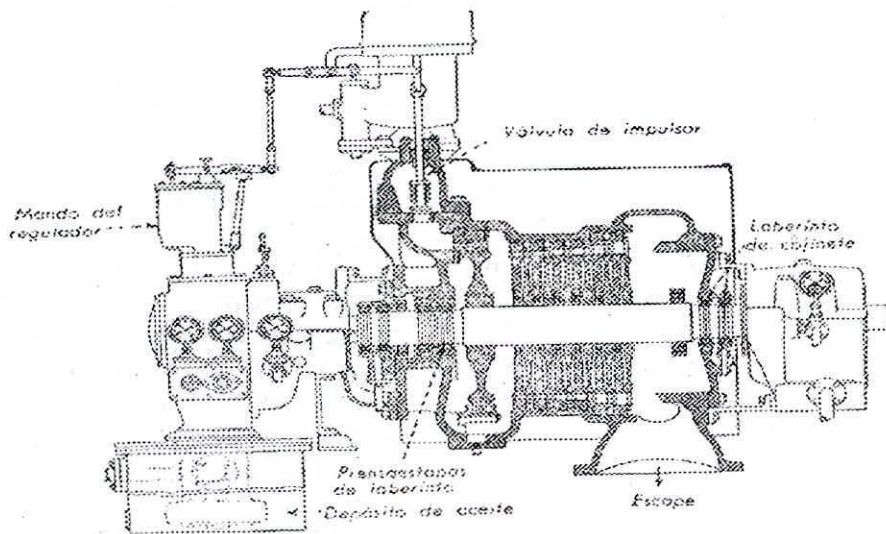


Fig. 6. Turbina de extracción automática con condensación y válvula de impulsor

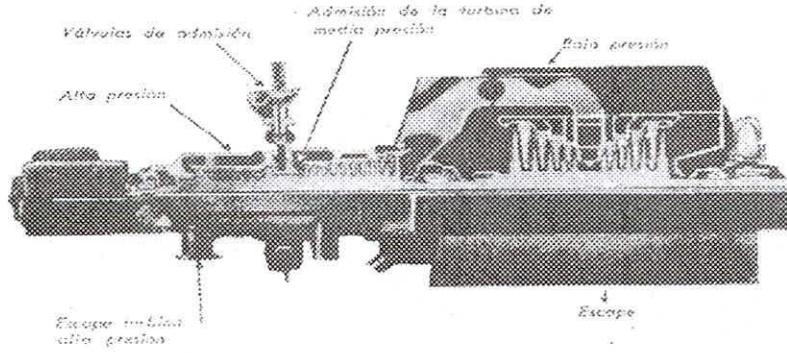


Fig.7. Moderna turbina con recalentamiento, de la General Electric

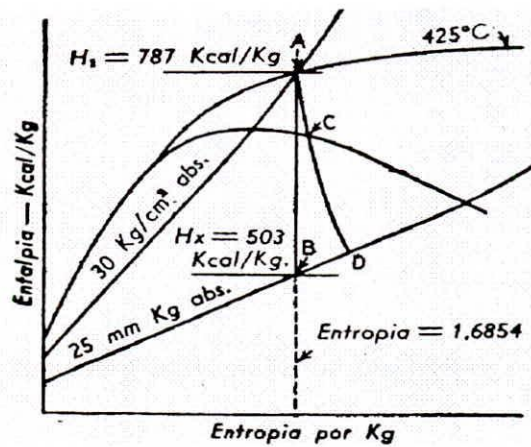


Fig.8. Típica curva de expansión de una turbina

Las turbinas están constituidas por tres elementos principales el cuerpo del rotor, que contiene las coronas giratorias; la mitad inferior del carter y la mitad superior, ambas conteniendo las coronas fijas. Todos los materiales deben poder soportar presiones y temperaturas. El árbol de rotor se construye generalmente de acero forjado y las paletas están fresadas de bloques macizos de acero.

Las turbinas trabajan alta presión y temperatura, donde se producen diversas pérdidas especialmente en los ejes y en el escape, debido a su alta velocidad el sistema de lubricación de las mismas es muy importante. De otro lado tenemos la refrigeración, mediante sistemas cerrados, refrigerados por serpentinas de agua.

Existe también la tendencia a la refrigeración por hidrógeno.

Se realizan también pruebas experimentales

### B. Características de las Turbinas

Se investigan de la mejor manera valiéndose de la llamada relación del cielo Ranking o característica de rendimiento de la máquina. Supongamos que suministramos a una turbina vapor a la presión absoluta de  $28 \text{ Kg/cm}^2$  y una temperatura total de  $425^\circ\text{C}$ , realizándose el escape de  $25 \text{ mm}$  absolutos de Hg. Si la turbina fuese una máquina ideal, sin rozamientos ni pérdidas de otra clase, la expansión sería adiabática y tendría lugar según la curva AB de la figura 8 en este caso el calor convertido en trabajo sería  $787 - 503 = 284 \text{ Kcal/Kg}$ .

El Calor no transformado en trabajo origina mayor calor en el escape que en el caso de expansión adiabática y la expansión real corresponde a la curva ACD.

$$W_{HP} = \frac{633}{(H_1 - H_x)N}$$

$$W_{KW} = \frac{560}{(H_1 - H_x)NE}$$

Donde,  $W_{KW}$  = Kg de vapor gastados por KWH

$W_{HP}$  = Kg de vapor gastados por HP-h

E= rendimiento del alternador (decimal) incluyendo pérdidas mecánicas

N= relación (decimal) de rendimiento del ciclo Rankine

Se puede estudiar los resultados de pruebas experimentales, refiriéndose a la cantidad de agua consumida o a la relación del ciclo Rankine. Se deben conocer las presiones y temperaturas iniciales y finales antes de poder establecer cualquier relación real. Aunque es cierto que los alabes rinden más con vapor recalentado que trabajando con vapor saturado variado los rendimientos de los escalones a lo largo de la curva de expansión ACD, la reacción totalizada del ciclo Rankine sirve para comparar turbinas con presiones y temperaturas iniciales muy diferentes.

### C. Rendimiento de las turbinas

Se pueden dividir en dos grupos: los de impulsión de alternadores y las que se usan en servicios auxiliares.

- 1) *Turbinas Auxiliares*: Son hasta de 2000HP, se usan para mover los ventiladores de tino forzado e inducido, las bombas de alimentación de calderas y otras bombas diversas. Estas turbinas trabajan a la misma presión inicial y temperatura que las unidades principales, su presión de escape, depende la utilización del vapor en el ciclo. Son máquinas de contrapresión con uno otras escalones, para mejorar el rendimiento no se justifican económicamente.
- 2) *Turbo alternadores*: Se dividen en dos grandes grupos los que pasan de 7500KW y los de más de 10,000 KW el primero es de industrial. Pueden llevar condensador según necesidades del vapor, trabajan a 3600RPM.  
Los turbo alternadores de mayor potencia usados en las centrales de luz y fuerza llevan siempre condensador.  
Una excepción es la gran turbina de contrapresión, que se antepone a una central ya existente de la baja presión.

### D. Combustibles y Combustión

Los combustibles se encuentran en estado sólido, líquido y gaseoso. Los sólidos se clasifican como lignitos, huellas y antracitas, existiendo grados intermedios.

Las diversas calidades de carbón son: turba, lignito, hulla grasa, hulla magra, semiantracita y superantracita.

Las hullas magras a hullas propiamente dichas se subdividen en inferiores (de llama larga) y superiores (de llamacorta).

- 1) *El Carbón*: Las características físicas adicionales del carbón; son cuatro propiedades:
  - a) Humedad
  - b) Material volátil
  - c) Cenizas
  - d) Carbono fijo

Además es necesario un valor térmico, la potencia calorífica, expresada en Kcal/Kg tal como se recibe el carbón, incluyendo la humedad. [2]

- 2) *El Petróleo*: De las diversas teorías expuestas sobre el origen del petróleo, la mas aceptada es lo que considera descendiente de la fauna marina abundante desde centenares de miles de años, que fue cubierta por depósito de sedimentos bajo los cuales se descompuso en hidrocarburos.

El petróleo está compuesto de carbono e hidrogeno en combinaciones químicas llamadas hidrocarburos. Juntamente con el carbono y el hidrógeno hay pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno y azufre. [2]

- a) *Características Comparativas*: Para comparar los productos del petróleo aplicados en ingeniería, hay diversas características que pueden utilizarse como indicadores de la conveniencia de un producto a un caso particular.

La viscosidad de un petróleo es la medida de su fluidez y viene afectada por la temperatura.

El punto de congelación de un aceite se determina colocando una muestra en un recipiente con un termómetro introducido en el mismo.

El punto de combustión es una medida de su volatilidad.

El punto de combustión siempre superior al de inflamación es la temperatura a la cual los vapores desprendidos del aceite

contaminan ardiendo con llama permanente después de retirada la llama de prueba [2]

- 3) *El Gas Natural*: Es uno de los principales combustibles gaseosos para obtención de energía. En su estado natural, inodoro, incoloro, arde con llama ligeramente luminosa y altamente explosivo cuando se mezcla con el Aire. [2]  
Sus principales componentes son el metano  $CH_4$  y el etano  $C_2H_6$  con pequeñas cantidades de bióxido de carbono y nitrógeno.
- 4) *Gas Fabricado*: Se usan algunos gases artificiales para la regeneración de vapor, ejemplo el gas de altos hornos y el gas de hornos de coque. El primero es un subproducto de la industria siderúrgica, que se forma al fabricar lingote de hierro. [2]

#### E. Generadores de Vapor

- 1) *Las Calderas*: Las calderas son los generadores de vapor y es un recipiente donde hierve el agua, cuyo vapor extensión, constituye la fuerza motriz de la máquina.  
La generación del vapor necesario para la turbina se realiza en calderas de varios tipos, actualmente se fabrican calderas ágiles con poco agua circulante en los tubos y capaces de alcanzar su régimen en un tiempo muy breve, produciendo rápidamente la cantidad de vapor necesario, para la turbina.

La evaporación de agua se efectúa en una multitud de tubos vaporizadores dispuestos oportunamente (en partes verticales y en parte inclinadas) de modo que estén expuesto lo más posible, a la radiación directa de la llama; se ha comprobado que la transmisión de calor se efectúa, en su mayor parte por radiación.

Las calderas constituidas de este modo se llaman de paredes apantalladas de tubos, por estar los tubos distribuidos a lo largo de todas las paredes.

Además del concepto que la radiación es más activa en los tubos, se ha constatado la importancia de la radiación de los gases luminosos, la misma que aumenta con el producto del espesor promedio de los gases alrededor de los tubos y del por ciento de los gases triatómicos ( $CO_2$  Y  $H_2O$ ), la tendencia de las calderas de paredes apantalladas de tubos es la de mantener los mismos en rarecidos con el fin de aumentar el espesor de los gases que circulan.

En lo que se refiere al volumen de la cámara de combustión es necesario fijar sus dimensiones de tal manera que la temperatura de equilibrio de los

gases no exceda el límite de de  $1350^{\circ}C$  para no solicitar excesivamente los metales de los tubos. Ver figuras: 10 y 11.

Existen generadores de vapor de paredes apantalladas de tubos fabricados por firmas Suizas, Alemanas, Inglesas cuya potencia puede alcanzar más de 1000tons/hora. Existen también calderas monotubulares del tipo Benson y Sulzer sin cuerpos cilíndricos y con paredes totalmente apantalladas, constituidas por un único tubo largo de 600 a 1500mts dispuestos en la cámara de combustión y dividido en tres zonas, de precalentamiento de agua de vaporización y recalentamiento de vapor.

En estas calderas de agua es impulsada por bombas que garantizan la circulación suficiente para evitar peligrosos recalentamientos y quemadura de los tubos. [3]

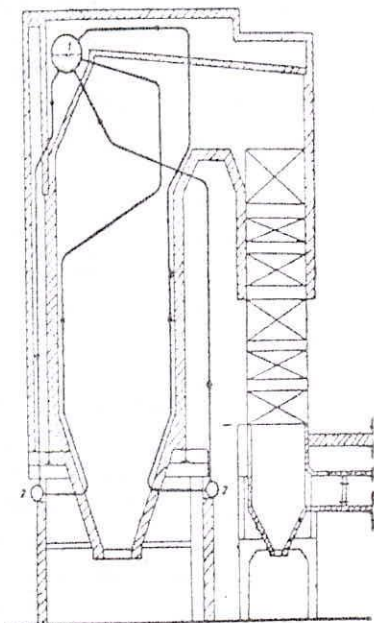


Fig. 9. Vista parcial de una Caldera

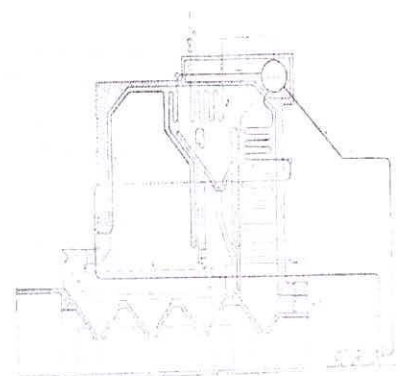


Fig. 10 Bombeo del agua al domo

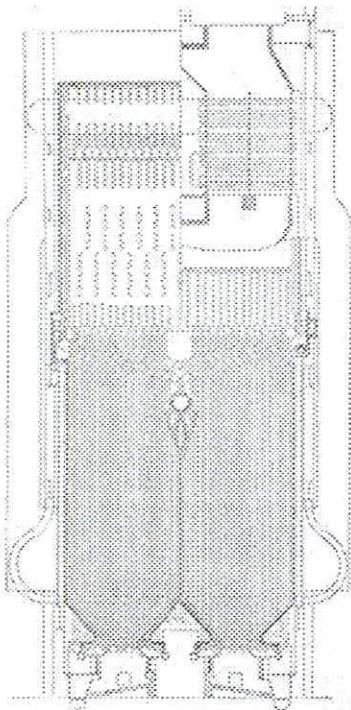


Fig.11. Vista de las paredes de la caldera y su hogar

#### F. *Sistemas de Combustión*

El poder calorífico inferior de los combustibles más usados es de unos 7,500 Cal/Kg; para carbón y 1800Cal/Kg para lignito y 8000 Cal/Kg; para combustibles líquidos y combustibles gaseosos.

Para los carbones tamaño mediano empleados en unidades hasta 80tm/hora de vapor se puede utilizar el método de quemarlos sobre rejillas o de pulverizarlos. Si el carbón se emplea pulverizado, hay que reducirlo previamente en polvo finísimo utilizando molinos de varios tipos que funcionan por aplastamiento o por impacto. [3]

El gas de horno de coque se obtiene al fabricar el coque por destilación del carbón. El proceso de coquización a elevada temperatura produce un gas de potencia calorífica superior a 440 Kcal/m<sup>3</sup>C, el proceso de baja temperatura lo produce a 7120 a 8900 Kcal/ m<sup>3</sup>. El gas de HOrno de coque esta compuesto por CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>,Co, H<sub>2</sub>, Ch<sub>4</sub>, C<sub>2</sub> H<sub>4</sub> su potencia varía entre 4200 a 6500 Kcal/m<sub>3</sub> ó 9800 a 10,340 Kcal por/Kg .

El gas natural se usa en cantidades mayores que el gas fabricado. Varias centrales térmicas de importancia, situadas cerca de yacimientos petrolíferos, queman únicamente gas natural.

1) *Uranio*: Es el combustible que se usa en las centrales nucleares, hay combustión: la reacción de

la fisión produce calor y este se transfiere al gua para generar vapor.

Es el uranio en estado natural es una mezcla de tres isótopos (átomos cuyos núcleos tiene el mismo número de protones y electrones, pero diferente número de neutrones y distinto peso atómico). Uno de estos isótopos el del uranio 235 se desintegra fácilmente cuando un neutrón libre, partícula subatómico de gran energía penetra en él y alcanza su pesado núcleo. Este se parte en dos fragmentos que se alejan a altísima velocidad, y además se produce la emisión de dos o tres nuevos neutrones. La energía cinética de los fragmentos del núcleo se convierte en calor cuando aquellos chocan con los átomos vecinos, y los neutrones recién creados y liberados causan una reacción en cadena iniciando nuevas fisiones en otros átomos de U<sub>235</sub>. [3]

### I. ACCESORIOS DE LAS CENTRALES DE VAPOR

Aparte de la anteriormente descrito en las centrales de vapor tenemos los elementos transmisores de calor, los calentadores del agua de alimentación y evaporadores, tratamiento de agua de alimentación, colectores de polvo, economizadores y calentadores de aire, realentadores, conductos, tuberías, tiro, transporte de carbón y cenizas, bombas y otros de los cuales vamos a describir algunas,

#### A. *Bombas de alimentación*

Entre los muchos accesorios presentes en una central térmica (ventiladores, reguladores, instalaciones para combustible, etc), tenemos las bombas de alimentación que son los órganos más importantes de la central y representan el "corazón" del ciclo térmico del cual depende la regularidad de marcha de conjunto caldera-turbina-precaldentador, desareador.

La potencia de las bombas puede alcanzar el 2 - 3% de la potencia del grupo que prevee también para su accionamiento, motores de alta tensión y a menudo de miles de kilovatios.

Existe un problema para asegurar el funcionamiento impecable de las bombas y la duración de las mismas, son los relativos a la formación de vapor al interior de su cuerpo; peligro que se presenta cuando la presión de aspiración disminuye por debajo del valor de la tensión de vapor correspondiente a la temperatura del agua y cuando la bomba marcha en vacío. [3]



### B. Automatismo y Regulación

Es conveniente el control automático y el ejercicio es dirigido por una computadora, se logra considerables economías de combustible y una utilización de los grandes grupos térmicos en zonas del diagrama de carga diario.

Los aparatos de regulación más comunes incluyen la dosificación de combustible, la regulación de la velocidad de los ventiladores, el ajuste de la temperatura de vapor recalentado, el mantenimiento de nivel correcto del agua de la caldera, la regulación de la presión de las bombas de alimentación, etc.

### C. Condensadores

En los primeros condensadores el agua de enfriamiento se mezclaba directamente con el vapor descargado por la turbina. En este caso pierde las características favorables de un ciclo cerrado, debido al vapor condensado mezclado con el agua de enfriamiento, es difícilmente recuperable para el ciclo.

El sistema de multieyector a chorro, siempre que el agua de enfriamiento se suficientemente pura para emplearse como agua de alimentación de la caldera. El condensador eyector es muy simple y no requiere manutención.

Los condensadores de superficie, la transmisión del vapor y el agua se hace a través de la superficie de un haz de tubos y tienen mayor importancia en las turbinas de vapor de cualquier tamaño. [3]

#### A. Instalación para el agua de refrigeración de los condensadores

La ubicación de una central de vapor, si es de elevada potencia, debe ser escogida en un lugar que dispone de gran caudal de agua necesario para la condensación del vapor descargado de la turbina.

#### B. Eyectores y bombas de extracción del condensador

A fin de mantener un grado elevado de vacío en el condensador. Para un buen rendimiento del ciclo, es necesario alejar constantemente del condensador los gases no condensables. El aire es el primer enemigo del condensador y puede introducirse a lo largo de los ejes de la máquina, a través de la brida de las tuberías y de la turbina.

Los eyectores de una o más etapas sirve óptimamente, donde el vapor entra con cierta presión en la primera etapa y se expande aumentando su velocidad en la sección más reducida del eyector, en este punto la depresión que se ha creado, aspira el aire a través de un orificio conectado con la toma de aire del condensador.

## IV. CONCLUSIONES

El conocimiento de las calderas y las turbinas de vapor nos muestran la importancia de una forma de transformación para la obtención de energía térmica que sirva producir movimiento en las turbinas de vapor, la misma que actualmente es poco conocida, siendo su uso restringido en nuestro país.

Las centrales eléctricas de vapor encontraron un vasto desarrollo en los Estados Unidos, en Europa y Asia; en el caso del Perú, solo en algunas capitales de Departamento se han utilizado por ejemplo en Chiclayo, en Iquitos, en la Southern, en los Ingenios azucareros.

Debemos propiciar el estudio y el dominio de la tecnología del uso del calor en las calderas tubulares y las turbinas de vapor como medio de generación eléctrica.

## REFERENCIAS

- [1] Alvarez Callejon, *Maquinas Térmicas Motores*, Alfa Omega, México 2006.
- [2] D. José Ramírez Vásquez, *Máquinas Motrices Generadores de Energía Eléctrica*, Enciclopedia CEAC Electricidad, Ediciones CEAC S.A., España, 1980
- [3] Van Wylen, *Fundamentos de Termodinámica*, Limusa Willey, México 2002.