

11126
6



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**SISTEMAS Y EQUIPOS DE CONTROL DE
UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
JOSÉ ARTURO ARROYO RICO**

ASESOR: ING. NICOLÁS CALVA TAPIA

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. MEX

2003

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Nijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Sistemas y Equipos de Control de una Planta Termoeléctrica"

que presenta el pasante José Arturo Arroyo Rico
con número de cuenta 8059932-4 para obtener el TÍTULO de
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

A T E N T A M E N T E,

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 24 de Septiembre de 2001

PRESIDENTE	<u>Ing. José Luis Rivera López</u>	
VOCAL	<u>Ing. Ubaldo Ramírez Urizar</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Nicolás Calva Tabla</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Jorge Buendía Gómez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Blanca de la Peña Valencia</u>	

B

A mis padres
José Arturo Arroyo Reynoso
Sara Rico de Arroyo
Porque con sus consejos y responsabilidad
supieron enseñarme un camino de bien.

A mis hermanos
J. Elizabeth, M. Susana, Sara Maria,
José Antonio y Fabiola, por su valioso
apoyo en todo momento.

A mi esposa Lilia con gran cariño
Por su comprensión y deseo de superación.

A mis querido hijos
Lilia Luz, José Arturo y Elizabeth
Por el gran amor que representan para mi.

A todos mis familiares y amigos.



INDICE**Introducción****Capítulo 1 Generalidades**

- 1.1 Centrales de generación.
- 1.2 Tipos de centrales de generación y transformación de energía.
- 1.3 Centrales termoelectricas.
 - 1.3.a Equipo principal de una central termoelectrica.
 - 1.3.b Equipo auxiliar de una C. T.
 - 1.3.c Sistemas de flujo de una C. T.
 - 1.3.d Diagrama general de una central termoelectrica.

Capítulo 2 Generador de Vapor

- 2.1 Descripción de un generador de vapor.
- 2.2 Combustión en un generador de vapor.
- 2.3 Partes principales del generador.
- 2.4 Tiro y ventiladores.

Capítulo 3 Sistemas de flujo

- 3.1 Generalidades.
- 3.2 Sistema de condensado.
- 3.3 Sistema de agua de alimentación.
- 3.4 Sistemas de extracción y drenajes.
- 3.5 Sistema de vaporización y sobrecalentamiento del generador de vapor.
- 3.6 Sistema de vapor principal.
- 3.7 Sistemas de vapor auxiliar.
- 3.8 Sistema de combustible a quemadores.
- 3.9 Sistema de aire y gases del generador de vapor.



Capítulo 4 Turbina de vapor

- 4.1 Características generales.
- 4.2 Principios de operación.
- 4.3 Partes Principales.
- 4.4 Clasificación de las turbinas.
- 4.5 Ejemplo.
- 4.6 El condensador.

Capítulo 5 El generador de corriente alterna

- 5.1 Descripción.
- 5.2 Funcionamiento del alternador.
 - 5.2.1 Inducción electromagnética.
 - 5.2.2 El alternador monofásico.
 - 5.2.3 El alternador trifásico.
- 5.3 Principios de operación del alternador.
 - 5.3.1 Generalidades.
 - 5.3.2 Puesta en servicio del alternador.
 - 5.3.3 Efecto de la excitación.
 - 5.3.4 Efecto de la velocidad del rotor.
 - 5.3.5 Efecto de la carga.
 - 5.3.6 Sincronización.

Capítulo 6 Control automático del generador de vapor

- 6.1 Descripción.
- 6.2 Control automático de combustión.
- 6.3 Control automático de flujo de agua de alimentación.
- 6.4 Sistema de control automático de temperatura de vapor.

Conclusiones

Bibliografía



Introducción

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica en nuestro país, se ha venido solicitando un mayor esfuerzo del personal que trabaja en las plantas generadoras para utilizar todos los recursos disponibles en una forma óptima, por lo que el presente trabajo está encaminado a realizar un estudio sobre los sistemas y equipos de control que constituyen dichas plantas para que de una manera más accesible, el personal pueda contar con la información necesaria para desempeñar sus funciones eficientemente.

Este trabajo constará de seis capítulos, en el capítulo 1 se hablará sobre las generalidades de una central de generación, en el capítulo 2 se tratará el tema de los generadores de vapor, siguiendo con los sistemas de flujo como capítulo 3, en el capítulo 4 se tocará el tema de las turbinas de vapor, para el capítulo 5 se analizará el generador eléctrico y como capítulo 6 se verán las características de los sistemas de control automático del generador de vapor.

Esperando que con esta información que se desarrollará se pueda optimizar de alguna manera los recursos disponibles.



Capítulo 1

Generalidades



1.1. Centrales de generación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una central de generación es una instalación completa con el objetivo de producir energía eléctrica.

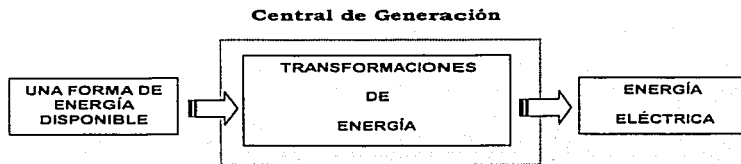


Fig. 1.1 Diagrama a bloques de transformaciones de energía en una central de generación.

La energía eléctrica se produce como resultado de una serie de transformaciones de energía (Fig. 1.1), estas transformaciones de energía se realizan precisamente dentro de la central.

La central debe contar con alguna forma de energía disponible, a partir de la cual se inician todas las transformaciones necesarias hasta llegar finalmente a la energía eléctrica.



1.2. Tipos de centrales de generación y transformaciones de energía.

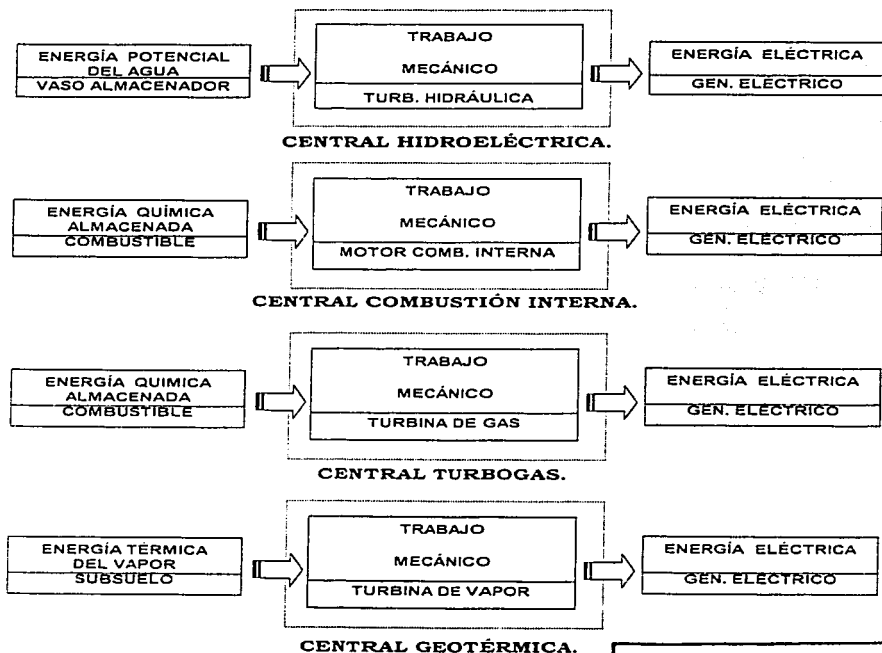
Existen diversos tipos de centrales de generación, la diferencia entre los tipos de centrales está en la forma en que se encuentra la energía disponible y en las transformaciones que se deben efectuar. Por supuesto, el equipo y dispositivos necesarios también son diferentes según el tipo de central.

Tipos de centrales de generación:

1. Hidroeléctricas.
2. De combustión interna.
3. Turbo gas.
4. Termoeléctricas.
5. Ciclo combinado.
6. Geotérmicas.
7. Núcleo eléctricas.
8. Etc.

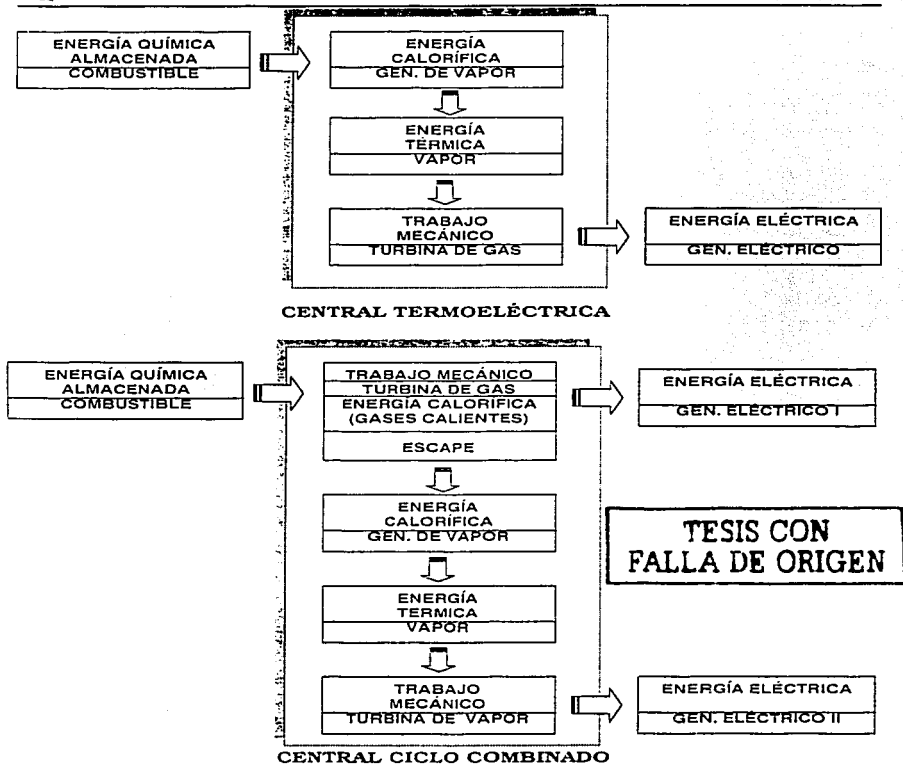


En las figuras 1.2.a hasta 1.2.f se observan las diferentes transformaciones de energía en varios tipos de centrales.



Figuras 1.2.a-d

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Figs. 1.2 e f

Figs. 1.2. Diferentes transformaciones de energía.



1.3. Centrales termoeléctricas.

Un tipo de centrales de generación, que por su número y capacidad, es muy importante en el sistema eléctrico de nuestro país es sin duda el de las centrales termoeléctricas, (C. T.).

Regresando a la figura 1.2.e para analizar según lo escrito en el punto 1, las transformaciones de energía que se efectúan en este tipo de centrales, observamos lo siguiente:

La fuente de energía disponible es un combustible (combustible, gas, diesel, carbón, etc.). La energía se encuentra almacenada en el combustible y se libera haciendo que se produzca una reacción química que en este caso es la combustión, al producirse esta, ya se tiene la primera transformación de energía es decir, que la energía química del combustible se transforma en calor (energía calorífica) en la flama y en los gases calientes producto de la combustión que se realiza en el hogar de un generador de vapor.

Si la energía calorífica de los gases se emplea para calentar agua y producir vapor, ya se tiene otra transformación de energía. Los gases ceden parte de su energía al vapor, teniendo ahora vapor con mayor energía que se denomina térmica (para diferenciar con el término de energía calorífica asignado a los gases calientes).



La energía del vapor se transforma en trabajo mecánico en una turbina de vapor con lo que se tiene otra transformación de energía. Finalmente, si la turbina está acoplada mecánicamente a un generador eléctrico, se tiene la última transformación de la energía y se llega al objetivo: la producción de la energía eléctrica.

Todas las transformaciones de energía citadas se efectúan dentro de una central termoelectrica, que cuenta con el equipo para realizarlas.

Estas transformaciones hacen que la central sea precisamente termoelectrica y no de otro tipo.

1.3.a. Equipo principal de una central termoelectrica.

Todo el equipo de una Central Termoelectrica es importante, de acuerdo a su participación directa en la obtención de energía eléctrica así como por su tamaño y costo, se clasifica como principales equipos a los siguientes:

Equipo Principal de una C. T.

- a) Generador de vapor.
- b) Turbina (y condensador).
- c) Generador eléctrico.



1.3.b. Equipo auxiliar de una C. T.

Al resto de equipo que participa directamente o indirectamente en la obtención del objetivo, se le clasifica como Equipo Auxiliar

Existe una gran variedad de Equipo Auxiliar, entre los que citamos:

Equipo Auxiliar de una C. T.

- a) Bombas.
- b) Ventiladores.
- c) Extractores.
- d) Calentadores.
- e) Enfriadores.
- f) Compresores.
- g) Eyectores,
- h) Deaerador.
- i) Tanques.
- j) Etc.

1.3.c. Sistemas de flujo de una C. T.

Se le llama Sistema de Flujo o simplemente "Sistema" a un conjunto formado por su quipo y tuberías que manejan un fluido determinado, pudiendo ser, agua



destilada, de mar, de enfriamiento, vapor, gases, combustible o cualquier otro requerido en la central. A semejanza con los humanos que tenemos un sistema circulatorio, digestivo respiratorio, etc.

Los sistemas de flujo pueden ser cerrados (formando un anillo) o abiertos.

Los equipos principales y los auxiliares se integran para formar parte de los sistemas de flujo (Fig. 1.3).

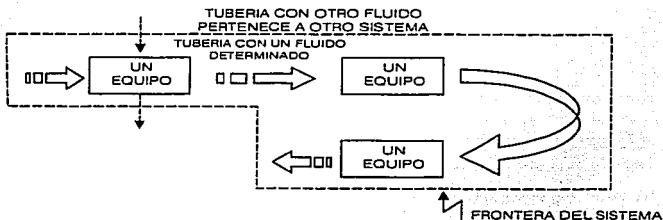


Fig. 1.3 Tuberías y equipo que forman un sistema.

Un mismo equipo puede pertenecer a varios sistemas, por ejemplo, el generador de vapor pertenece al sistema de aire-gases de combustión, al sistema de combustible, al de vaporización y sobrecalentamiento y a otros más.

Según las necesidades de cada central en particular, pueden tenerse diversos sistemas.



Entre los sistemas que podemos mencionar están:

1. Condensado.
2. Agua de alimentación.
3. Vaporización y sobrecalentamiento (agua-vapor).
4. Vapor principal.
5. Vapor auxiliar.
6. Extracciones y drenajes.
7. Combustible.
8. Aire y gases de combustión.
9. Aceite de lubricación y de control.
10. Aceite de sellos.
11. Sellos de vapor.
12. Gases N_2 , CO_2 y H_2 .
13. Enfriamiento principal.
14. Enfriamiento auxiliar.
15. Tratamiento de agua de repuesto.
16. Dosificación e inyección químicos.
17. Análisis y muestreo.
18. Agua de repuesto.
19. Agua contra incendio.
20. Agua de servicio.



21. Aire de servicio.
22. Aire de instrumentos.
23. Lubricación equipo auxiliar.
24. Agua de mar.
25. Etc.

1.3.d. Diagrama general de una central termoelectrica.

En la figura 1.4 se presenta un diagrama general de una central termoelectrica incluyendo los sistemas principales.

Este es sólo representativo de una central termoelectrica típica y puede tener variaciones en particular, según cada central real.

A simple vista parece un diagrama complicado, pero posteriormente se hacen descripciones de los equipos y sistemas incluidos en este dibujo, por lo que se aconseja consultar este diagrama en forma paralela al estudio de cada equipo en particular con el objetivo de que el lector pueda saber en cualquier momento, el punto en el que se encuentra dentro del proceso completo.

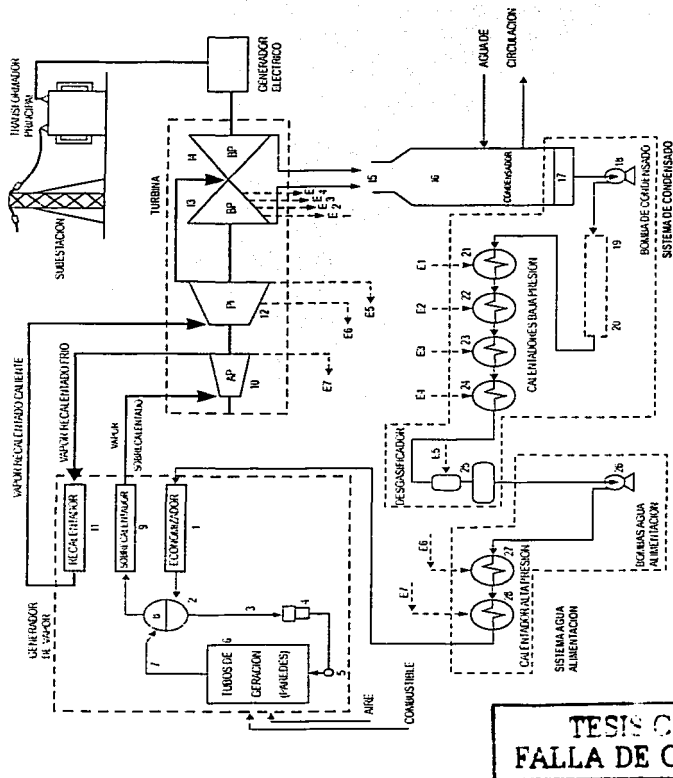


Fig 1.4 Diagrama general de una central termoelectrica.

**GENERADOR DE VAPOR.**

1. Economizador.
2. Domo.
3. Bajantes.
4. Bombas de circulación controlada.
5. Domo inferior o cabezales.
6. Tubos de generación.
7. Tubos elevadores.
8. Dispositivos de separación Agua-vapor en el domo.
9. Sobrecalentador primario.
11. Recalentador.

TURBINA

10. Turbina alta presión y primer paso.
12. Turbina presión intermedia 1 y 2.
13. y 14. Turbina baja presión.
15. Escape.

**SISTEMAS DE EXTRACCIONES.**

- E1. Extracción a calentador 1.
- E2. Extracción a calentador 2.
- E3. Extracción a calentador 3.
- E4. Extracción a calentador 4.
- E5. Extracción a calentador 5.
- E6. Extracción a calentador 6.
- E7. Extracción a calentador 7.

CONDENSADOR Y SISTEMA DE**CONDENSADO**

- 16. Condensador.
- 17. Pozo caliente.
- 18. Bombas de condensador.
- 19. Otros.
- 20. Calentadores.
- 21. Calentador baja presión 1.
- 22. Calentador baja presión 2.
- 23. Calentador baja presión 3.
- 24. Calentador baja presión 4.
- 25. Calentador 5 (deareador).

SISTEMA AGUA ALIMENTACIÓN.

- 26. Bombas agua alimentación.
- 27. Calentador alta presión 6.
- 28. Calentador alta presión 7.



Capítulo 2

Generador de Vapor



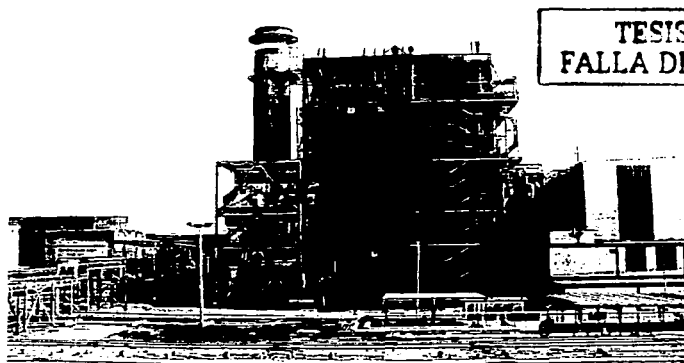
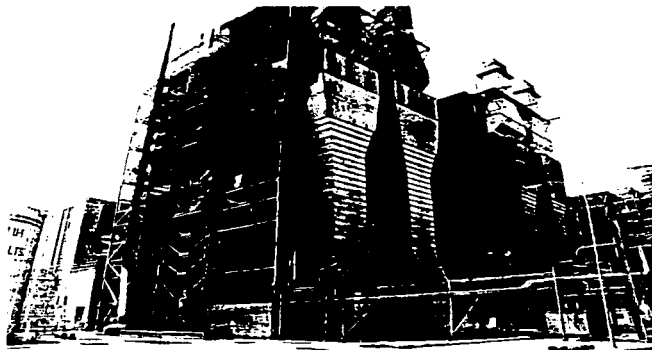
2.1. Descripción de un generador de vapor.

Las funciones principales de un generador de vapor son:

- a) Realizar una combustión para liberar energía en forma de calor.
- b) Producir vapor con determinadas características de presión y temperatura.

Un generador de vapor es un conjunto de elementos integrados y dispuestos de tal forma que se realiza una combustión y se absorbe el calor de los productos de esta combustión en forma eficiente.

En las figuras 2.1 y 2.2 se ilustran dos generadores de vapor que se seguirán utilizando posteriormente.



Figs. 2.1 y 2.2 Generadores de vapor con bombas de circulación forzada.

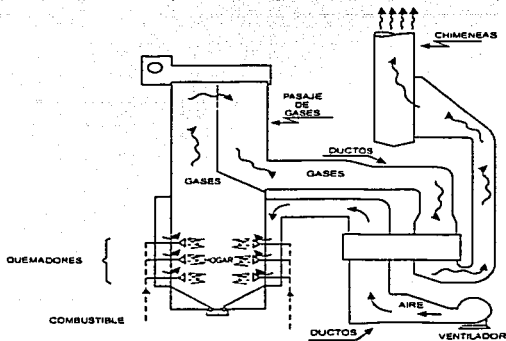


2.2. Combustión en un generador de vapor.

La combustión (del combustible y el aire necesario) se produce en un recinto llamado hogar (Figuras 2.3.a y 2.3.b).

El combustible puede ser líquido, sólido o gaseoso y se alimenta continuamente al hogar mediante los quemadores y otros dispositivos adecuados.

El aire para la combustión es manejado por unos ventiladores que lo envían a través de ductos hasta llegar a los quemadores y el hogar.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.3.a. Combustión en un generador de vapor.

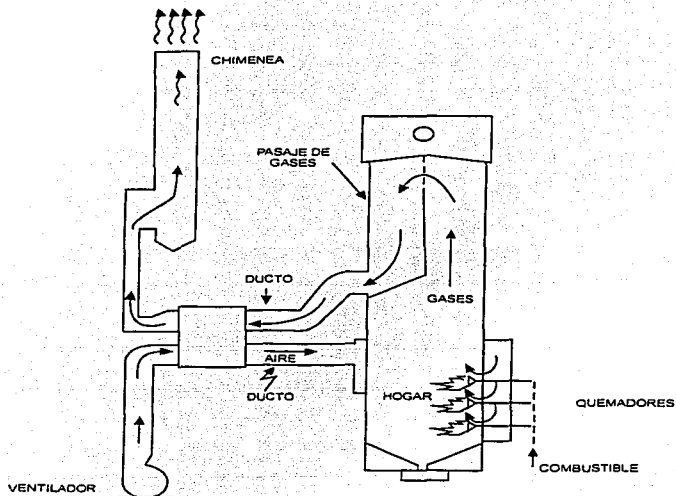


Fig. 2.3.b. Combustión en un generador de vapor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La combustión en el hogar libera el calor que será aprovechado por determinadas partes del generador de vapor para:

- a) Calentar agua.
- b) Transformar el agua en vapor.
- c) Sobrecalentar el vapor.

Los gases calientes producto de la combustión, salen del hogar y son conducidos por unos pasajes y ductos antes de escapar a la atmósfera.

En estos pasajes se encuentran otros elementos del generador de vapor que son calentados por los gases calientes. Estos elementos o partes se detallan en el siguiente punto.



2.3. Partes principales del generador.

Las partes principales de un generador de vapor son aquellos elementos que absorben calor (Fig. 2.4), y son:

- A) La caldera.
- B) El sobrecalentador.
- C) El recalentador.
- D) El economizador.
- E) Los precalentadores de aire.

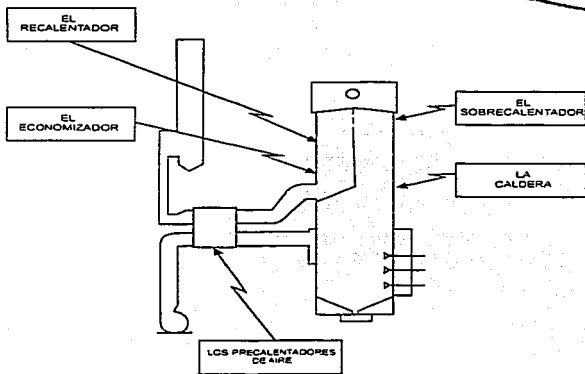


Fig. 2.4 Partes principales del generador de vapor.



A continuación se hace una descripción sencilla de cada una de estas partes. Como existen gran variedad de fabricantes, modelos y arreglos de generadores de vapor, en los ejemplos usaré los tipos más sencillos que sirvan para ilustrar los conceptos que se mencionan. En la mayoría de los casos se usará la silueta de los generadores de vapor ilustrados en las figuras 2.1 y 2.2.

A) La caldera.

La caldera es una parte o elemento que absorbe calor, perteneciente al generador de vapor.

Aunque se ha acostumbrado llamar "Caldera" a todo el generador de vapor completo, la caldera es solamente una de las partes principales que lo constituyen. Se recomienda eliminar esta práctica.

La caldera, según su origen histórico es esencialmente un recipiente con agua al que se le aplica calor para convertirla continuamente en el vapor requerido para otros procesos. Las calderas de los generadores de vapor de grandes capacidades no se parecen físicamente a la figura 2.5, esta sirve para fines explicativos.

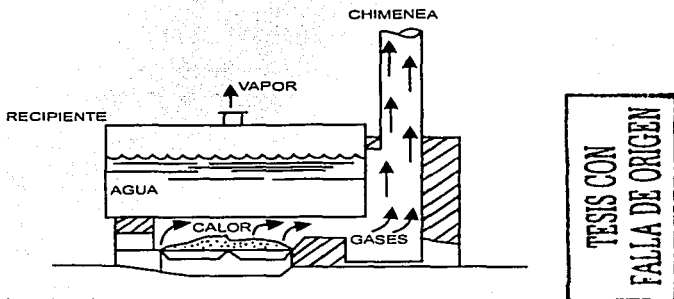


Fig. 2.5 Origen histórico de la caldera.

Es evidente que se pueda aumentar la cantidad de calor aplicado si se aumenta la superficie calentada debido a que más agua está en contacto con la superficie caliente y se produce más vapor. Una forma de aumentar la superficie es haciendo recipientes más grandes. Lo cual no es práctico ni económico, o sustituyendo el recipiente por un conjunto de tubos (mas superficie) (Fig. 2.6.a) o también haciendo que los gases calientes circulen por el interior de unos tubos que atraviesen el recipiente (Fig.2.6.b).

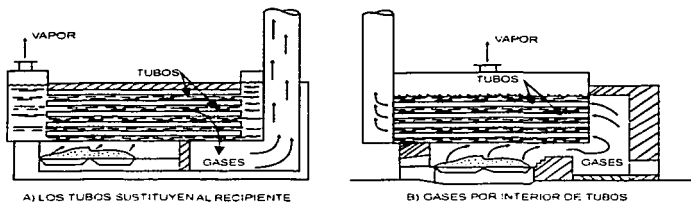


Figura 2.6 Mayor superficie de calentamiento en una caldera.

- **Clasificación de las calderas (según los gases y el agua).**

Las calderas pueden clasificarse según la distribución de los gases calientes y el agua, en dos tipos.

a) **TUBOS DE AGUA (ACUOTUBULARES)** Figura 2.6.a. Son donde el agua se encuentra en el interior de los tubos y los gases pasan por el exterior.

b) **TUBO DE HUMO (PIROTUBULARES)** Figura 2.6.b. Son donde los gases circulan por el interior de los tubos y el agua se encuentra en el exterior.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- **Calderas de grandes capacidades.**

Las calderas de los generadores de vapor modernos y de grandes capacidades como los instalados en las centrales termoelectricas son del tipo acuotubular y se constituyen por grandes cantidades de tubos (Fig. 2.7) alineados uno junto a otro y formando una pared continua que envuelve al hogar, dejando un espacio interior en donde se produce la combustión. Los tubos que están llenos de agua al calentarse produce el vapor. Los cabezales sirven para interconectar a los tubos y no están expuestos al calor.

Las calderas de Tubos de Humos presentan ciertos riesgos y no se aplican para capacidades altas. Pueden encontrarse calderas pirotubulares para muy pequeñas capacidades en procesos industriales.

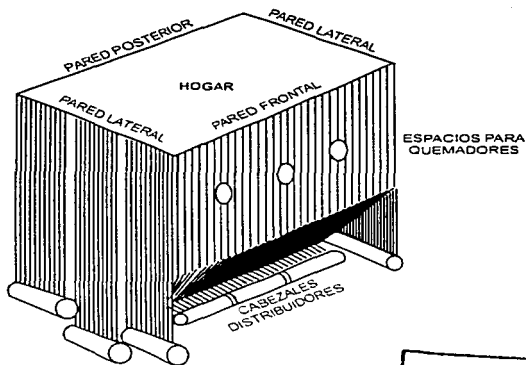


Fig. 2. 7. Paredes de una caldera.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- **Circulación del agua y el vapor.**

Cuando se está calentando la superficie de un tubo que contiene agua para producir vapor (Fig. 2.8.) debe existir interiormente una circulación efectiva al agua para evitar que las partes sometidas al calor sufran un calentamiento excesivo y lleguen a fallar.

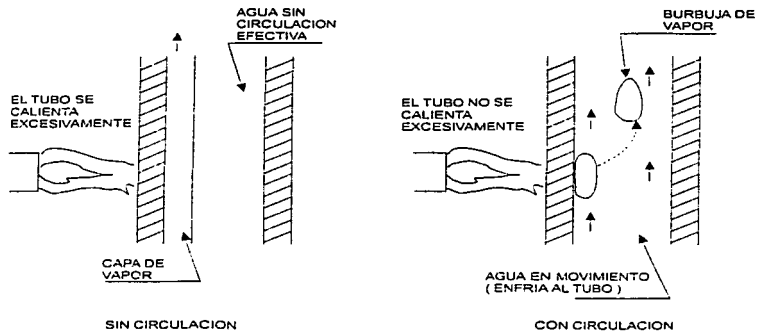


Fig 2.8. Circulación del agua y el vapor en el interior de un tubo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En las calderas de los generadores de vapor modernos, está previsto este fenómeno y se disponen de diferentes medios para producir una circulación efectiva del agua y del vapor, dentro de los tubos y recipientes que se verán más adelante.

- **Partes de la caldera.**

La caldera es aquella parte del generador de vapor, constituida por tubos, cabezales y recipientes que forman parte del circuito de circulación, de agua o de la mezcla agua - vapor.

La caldera esta constituida por partes que forman un circuito de circulación, de agua o de una mezcla agua-vapor (Fig. 2.9). A continuación se detalla lo siguiente:

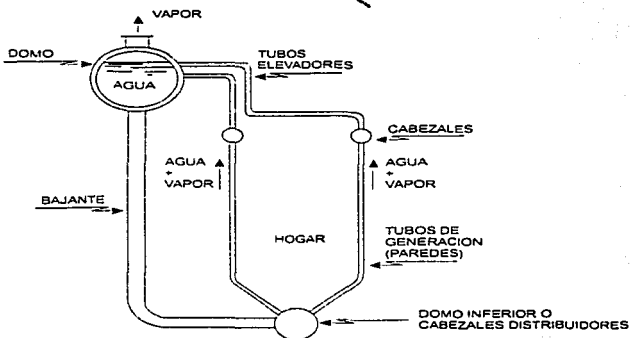


Fig. 2.9 Partes de la caldera.

- **Formas de circulación (agua-vapor)**

Existen dos tipos de circulación utilizados por C.F.E. (natural y forzada), las cuales se muestran en la figura 2.10.

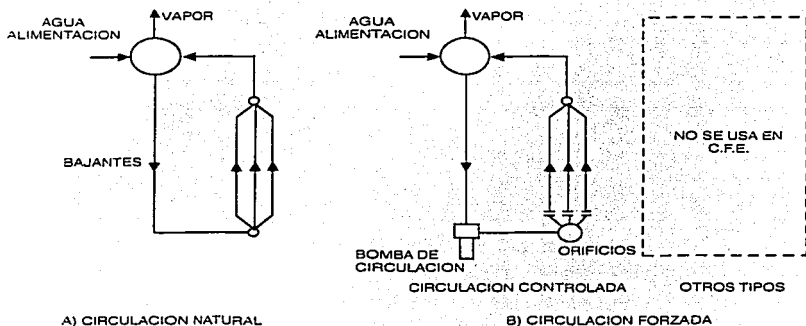


Fig. 2.10 Formas de circulación en una caldera.

La circulación natural se logra al calentar los tubos de generación (Fig. 2.11) se empiezan a producir burbujas de vapor. El peso de la columna de agua con vapor dentro de los tubos de generación es de menor peso que la columna de agua que hay en el interior de los bajantes (Fig. 2.12).

Esta diferencia de peso es una fuerza resultante que inicia la circulación de agua hacia abajo en los bajantes y de la mezcla agua-vapor, hacia arriba en los tubos de generación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

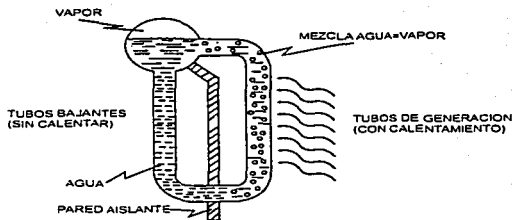


Fig. 2.11 Circulación natural.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

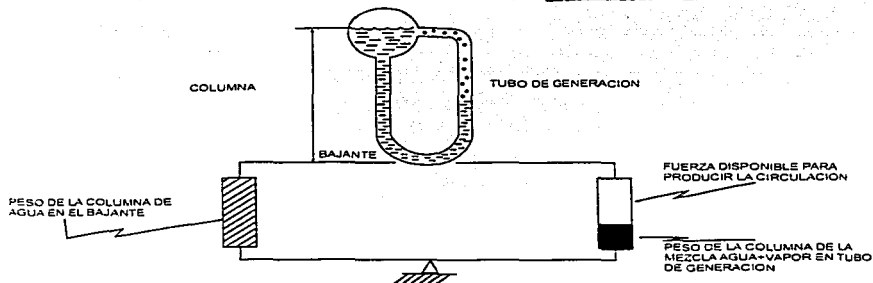


Fig. 2.12 Principio físico de la circulación natural

Como se está produciendo vapor, es necesaria la reposición continua de agua de alimentación para evitar la disminución de nivel y que la caldera quede seca.



- **Circulación forzada.**

La circulación se produce con una bomba. Existen varios tipos de Circulación Forzada, pero los objetivos de este trabajo solo se menciona el tipo de circulación presente en C.F.E., la Circulación Controlada.

- **Circulación controlada.**

Como la circulación controlada es un tipo de Circulación Forzada, es frecuente denominarlas indistintamente, se recomienda el término Circulación Controlada que es más específico. Como se indicó antes, la circulación se logra con una bomba que suministra la presión necesaria para provocarla. El uso de la bomba permite que los tubos puedan tener menor diámetro, más cambios de dirección etc., que implican mayor resistencia al flujo y no serían tolerables en la circulación natural. En la circulación controlada se tiene un domo interior (o más) que actúa como distribuidor y tiene unos orificios que sirven para compensar las diferentes resistencias, cuando hay trayectorias más complicadas que otras (Fig. 2.13).

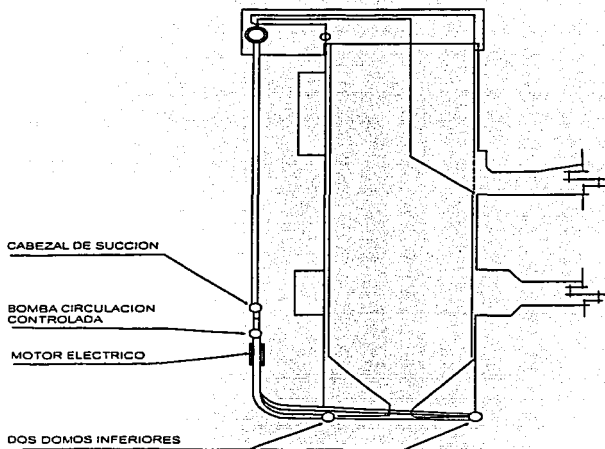


Fig. 2.13. Generador de vapor con circulación controlada.

- Separación de agua y vapor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La separación del agua y del vapor se realiza en el domo. Como el vapor tiende a arrastrar gotas de humedad al desprenderse de la superficie de agua, y esto es perjudicial para otros elementos del generador de vapor y la turbina, es necesario contar con dispositivos que eviten este fenómeno haciendo que el vapor sea seco. En la Fig. 2.14 se observan los efectos en el arrastre de agua y en el nivel de domo sin dispositivos de separación para diversas condiciones.



Los dispositivos van dentro del domo y efectúan la separación en forma mecánica, los más comunes son mostrados en la Fig. 2.15.

SEPARADORES PRIMARIOS. Inducen un movimiento rotativo ciclónico al vapor. La fuerza centrífuga sobre las gotas de agua arrastrada (más pesada) hacen que estas se proyecten a la periferia de un cilindro y escurran hacia abajo.

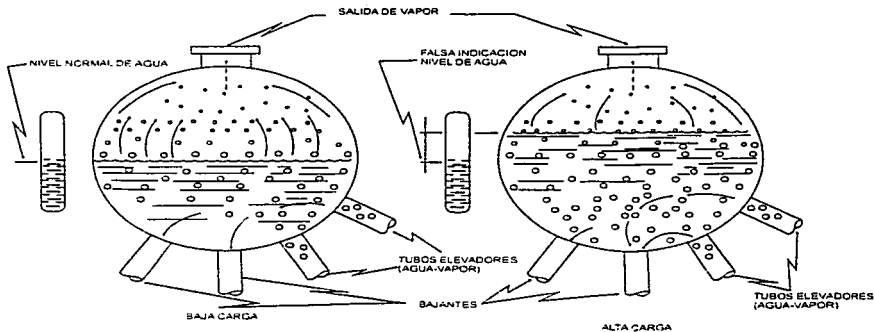
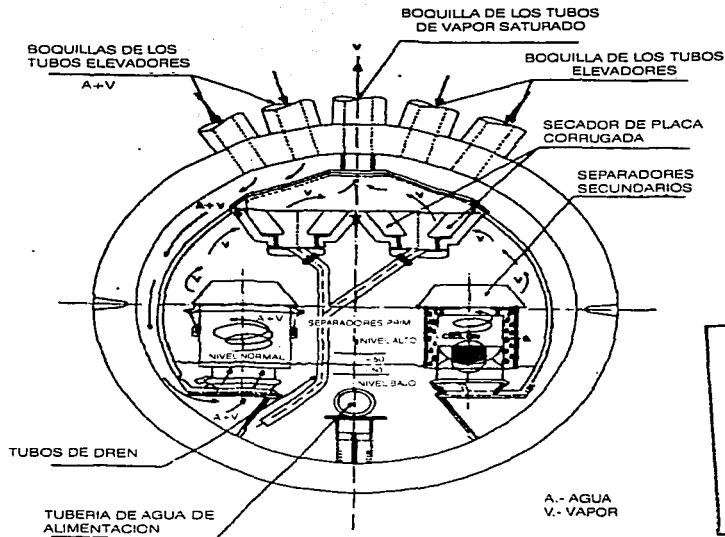


Fig. 2.14. Efecto de la cantidad de vapor producido en un domo sin dispositivos de separación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.15 Separadores de agua-vapor en el domo.

SEPARADORES SECUNDARIOS. Formados por paquetes de lámina acanaladas. El vapor pasa por una ruta tortuosa en los espacios entre láminas. Los cambios de dirección hacen que el agua se proyecte hacia las láminas y escurra por los bordes.



SECADORES. También formados con lámina acanalada, corrugada o mallas que efectúan una acción final de separación o secado, de tal forma que en las salidas de vapor saturado se obtiene vapor sin arrastre de agua.

B) El sobrecalentador.

Continuando con las partes del generador de vapor que absorbe calor, tenemos el Sobrecalentador (Fig. 2.16).

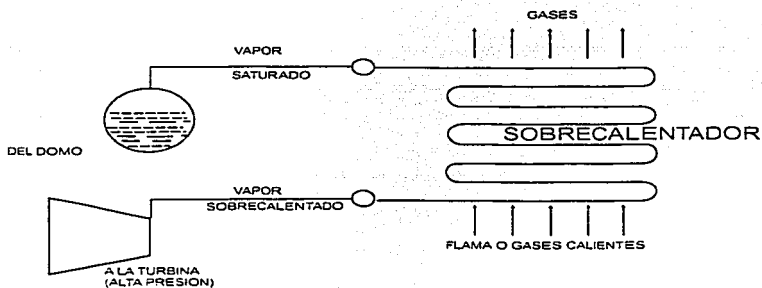


Fig. 2.16 Sobrecalentador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Recibe vapor saturado que sale del domo y lo sobrecalienta hasta la temperatura requerida por la turbina de vapor.



El vapor sobrecalentado se dirige a la turbina y va realizando un trabajo al mismo tiempo que va perdiendo su energía.

Si se usara el vapor saturado que sale del domo para enviarlo directamente a la turbina (sin sobrecalentarlo), la pérdida de energía en la turbina producirá condensación de una porción de vapor. Esta humedad es perjudicial para la turbina, por lo que el trabajo que puede efectuar el vapor está limitado por la cantidad de humedad que puede manejar la turbina.

Cuando se usa vapor sobrecalentado, puede contenerse mayor trabajo y más pasos en la turbina antes de que se forme humedad en el vapor. Además, el uso del Sobrecalentador hace que la eficiencia de la central sea mayor.

Los sobrecalentadores están formados por una gran cantidad de tubos que se conectan a un cabezal de entrada y otro de salida. En la Fig. 2.16. solamente se ilustra un tubo, pero detrás de este existe otro y así sucesivamente, formando una red por donde circulan los gases.



Los sobrecalentadores pueden ser horizontales como el de la Figura 2.16, o verticales y pueden ser localizados en varios lugares del generador de vapor.

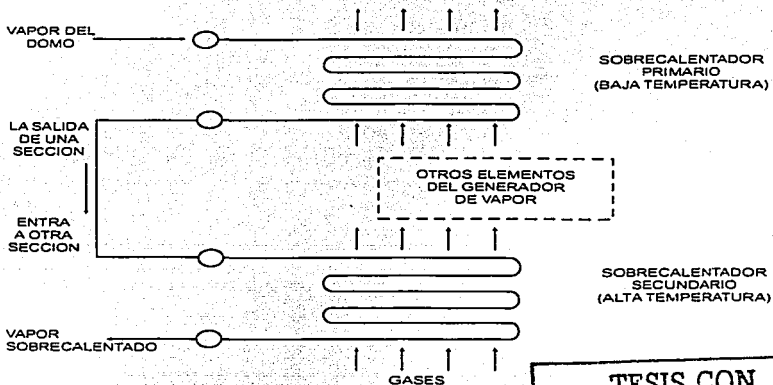


Fig. 2.17 Sobrecalentador formado por 2 secciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los sobrecalentadores pueden estar formados por varias secciones (Fig.2.17) conectadas en serie de tal forma que la salida de una sección va a la entrada de otra sección posterior, es decir que la temperatura se va elevando por pasos.



A la primera sección se le llama Sobrecalentador primario, a la segunda, secundario, y así sucesivamente. También se les puede denominar Sobrecalentador de baja temperatura, de temperatura intermedia, de alta temperatura, etc., las secciones del Sobrecalentador no necesariamente están adyacentes (en el recorrido de los gases), pudiendo existir otros elementos del generador de vapor (que también los gases calientan) entre dos secciones del Sobrecalentador.

✓ Tipos de sobrecalentadores

Dependiendo de su localización dentro del generador de vapor y de la forma como observen el calor, los sobrecalentadores pueden ser de dos tipos, radiantes y convectivos (Fig. 2.18.a y Fig. 2.18.b).

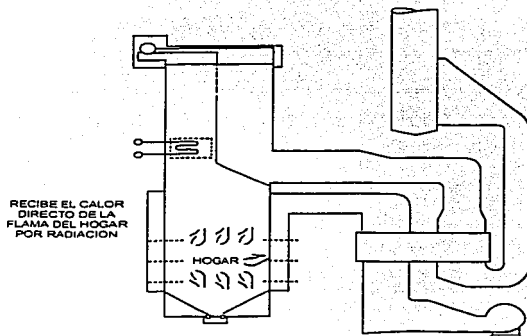


Fig. 2.18.a. Sobrecalentador radiante.

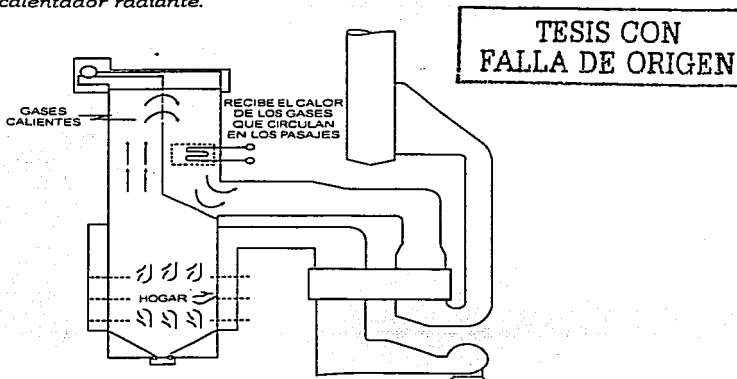


Fig. 2.18.b. Sobrecalentador convectivo.

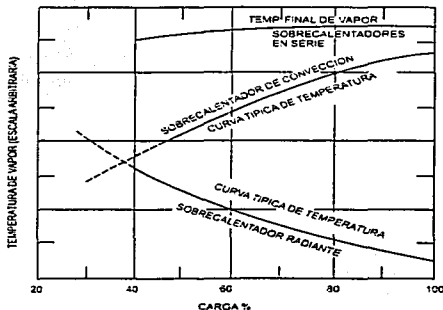


Sobrecalentadores Radiantes.

Están localizados en la parte superior del hogar y reciben el calor directamente de la flama, por Radiación. Con este tipo de sobrecalentadores, la temperatura del vapor de salida disminuye cuando se aumenta la carga (Fig. 2.19).

Sobrecalentadores Convectivos.

Están localizados en los pasajes de los gases calientes y reciben el calor de estos por convección (en este caso, los sobrecalentadores no alcanzan a "ver" a la flama del hogar). Su comportamiento es tal que la temperatura de salida del vapor aumenta cuando se aumenta la carga.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.19 Comportamiento de la temperatura de salida en los sobrecalentadores.



Sobrecalentadores Radiantes-Convectivos.

Cuando un Sobrecalentador se encuentra en una zona intermedia (entre los dos descritos anteriormente), será una combinación de ambos, es decir, un Sobrecalentador Radiante-Convectivo.

Entre más cercano se encuentre del hogar, será más radiante. Entre más lejano se encuentre del hogar, será más convectivo.

C) El Recalentador.

Es otro elemento o parte del generador de vapor que también absorbe calor.

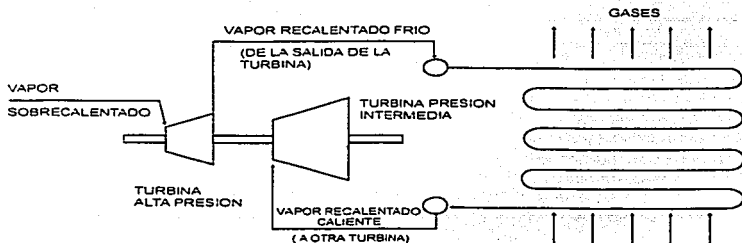


Fig. 2.20 El recalentador

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



El vapor que ya trabajó en la turbina, sale con menor presión y temperatura, pero puede volverse a recalentar para seguir aprovechándose y trabajar en las etapas restantes o en otra turbina.

El recalentador recibe vapor denominado "recalentamiento frío" proveniente de la salida de la turbina de alta presión (Fig. 2.20) y lo recalienta "Recalentado caliente" a la temperatura requerida por las etapas restantes de la turbina. (Turbina de Presión Intermedia).

Las características y el comportamiento del recalentador son semejantes a los del sobrecalentador, pero el recalentador opera a una presión menor (Fig. 2.21).

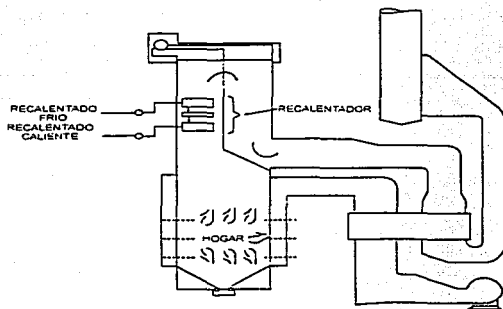


Fig. 2.21. El recalentador en un generador de vapor.

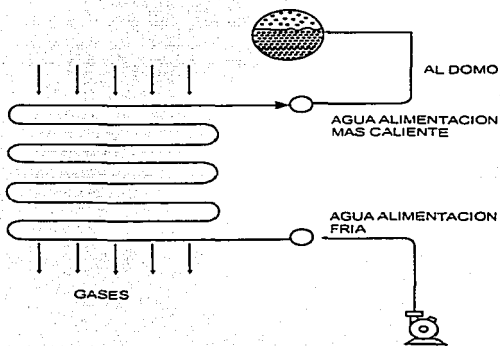


D) El Economizador

Es otra parte o elemento, que absorbe calor en el generador de vapor.

Aprovecha el calor de los gases antes que escapen a la atmósfera por la chimenea.

Reciben agua de alimentación "fría" (Fig. 2.22.a) y calientan hasta una temperatura muy cercana a la ebullición (saturación) para enviarla al domo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.22.a El economizador.



o **Forma de los economizadores.**

Por la forma de los tubos que constituyen el economizador estos pueden ser:

1. Lisos.
2. Aleteados.

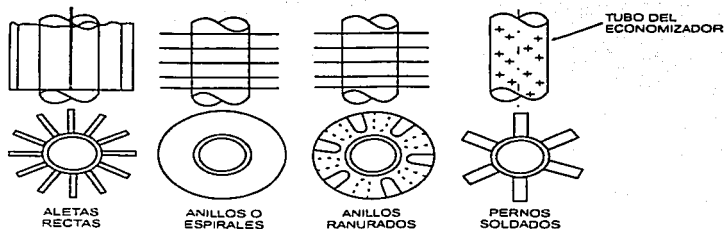


Fig. 2.22.b. Formas diversas de economizadores aleteados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



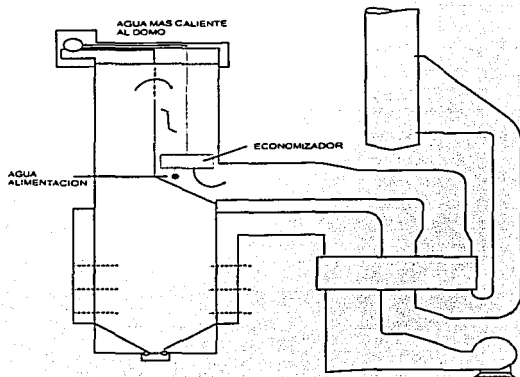
Los economizadores aleatados permiten mayor absorción de calor, porque representan mayor superficie de calentamiento. En la figura 2.22.b. se ilustran algunos tipos de economizadores con costillas soldadas, anillos completos, anillos ranurados y pernos soldados, pero pueden ser de otras formas diversas.

Con el uso del economizador el agua (más caliente) que llega al Domo requiere menos calor extra para evaporarse.

Se llamó economizador por estas dos razones:

- a) Aprovecha el calor de los gases que de otra forma se retirarían a la atmósfera sin aprovecharse.
- b) Se requiere menos calor para evaporar el agua en la caldera y por lo tanto menos combustible.

El economizador siempre se encuentra en la salida de los gases, después de los sobrecalentadores y del recalentador.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.22.c Economizador en un generador de vapor.

E) Los Precalentadores de aire.

En nuestra lista de partes principales que absorben calor en el Generador de Vapor, tenemos en último término a los Precalentadores de aire.

El uso de Aire caliente, para la combustión, mejora las condiciones de esta, además aumenta la eficiencia del Generador de Vapor.

Los precalentadores de aire reciben aire frío del exterior y lo calientan para enviarse al hogar. El medio calefactor se analizará en el siguiente punto.



• Tipos de precalentadores de aire, según su medio calefactor.

TIPOS DE CALEFACTOR

a) Aire-vapor.
b) Aire-gases.

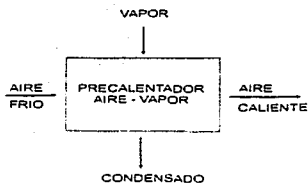


Fig. 2.23.a

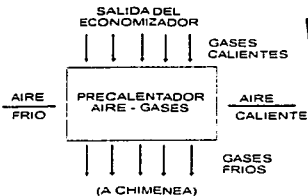


Fig. 2.23.b

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figs. 2.23 Precalentadores de aire.

Precalentadores Aire-Vapor. (Fig. 2.23.a). El medio calefactor es el vapor obtenido de otros puntos del proceso. El aire se calienta con el vapor, produciendo aire caliente, el vapor que perdió su energía se transforma en condensado. El aire y el vapor no se mezclan.

Precalentadores de Aire-Gases (Fig. 2.23.b). El medio calefactor son los gases calientes que salen del economizador y aún contienen energía antes de tirar estos gases a la atmósfera por la chimenea, pasan por el precalentador Aire-Gases, en donde cede el calor al aire necesario para combustión.



Los gases que salen del precalentador Aire-Gases, están más fríos y ahora si pueden enviarse a la chimenea sin que se desperdicien grandes cantidades de calor. El aire y los gases no se mezclan.

▪ **Combinación de precalentadores aire-gases y aire-vapor.**

En general, los combustibles que se usan en los generadores de vapor contienen algo de azufre, por lo tanto, los gases producto de la combustión contienen óxidos de azufre. Si estos gases se hacen pasar por un precalentador de Aire-Gases (Fig. 2.23.c), van enfriándose y cediendo su calor al aire. Si la temperatura de los gases bajan mucho puede llegar hasta un punto llamado "punto de rocío". En este punto se forman ácidos corrosivos (producto de óxidos de azufre y de la humedad), que atacan a los componentes metálicos del precalentador Aire-Gases.

Una forma de evitar la corrosión en los precalentadores Aire-Gases es haciendo que el aire por calentarse no llegue muy frío al precalentador, así los gases no se enfrían tanto. Como los gases no se enfrían más abajo de la temperatura del aire que entra, la corrosión se evita calentando un poco el aire antes que entre al precalentador Aire-Gases (Fig. 2.23.d). El calentamiento previo del aire se efectúa en un precalentador Aire-Vapor.

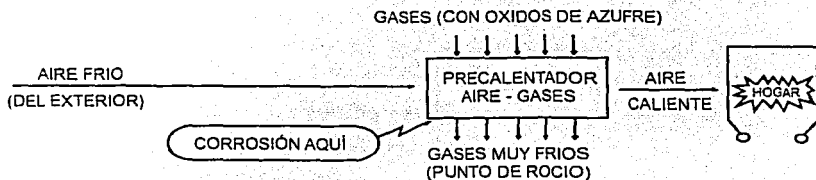


Fig. 2.23.c. Corrosión en un precalentador aire gases.

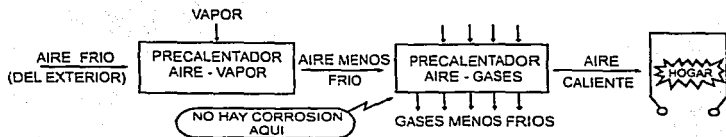


Fig. 2.23.d. Combinación de precalentadores para evitar la corrosión.

TEJES CON
FALLA DE ORIGEN



- **Clasificación de los precalentadores de aire según su principio de operación.**

Según la forma en que realizan la transferencia de calor, los precalentadores de aire pueden ser:

a) **Precalentadores Recuperativos.** El calor se transfiere directamente (de los gases calientes o del vapor), en un lado de una superficie, al aire en el otro lado. Generalmente son tipo tubular.

b) **Precalentadores Regenerativos,** El calor se transfiere indirectamente (de los gases calientes) al aire a través de un elemento intermedio, almacenador de calor.

- **Ejemplo de precalentadores de aire.**

Precalentadores Aire-Vapor tipo Recuperativo (Fig. 2.24): Están formados por un conjunto de tubos horizontales con aletas. En el interior circula vapor que cede al aire.



El conjunto se instala en un ducto de aire del generador de vapor.

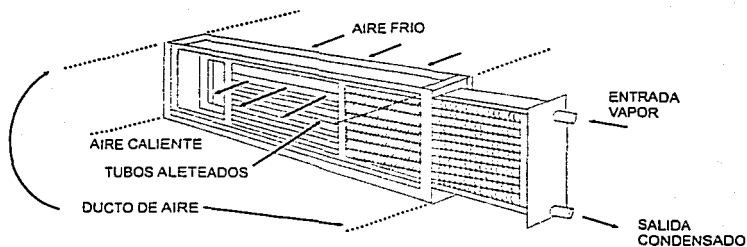


Fig. 2.24 Precalentadores Aire-Vapor tipo recuperativo.

Precalentadores Aire - Gases Tipo Recuperativo, (Fig. 2.25): Formado por un conjunto de tubos por cuyo interior circulan los gases calientes. El aire circula por el exterior de los tubos.

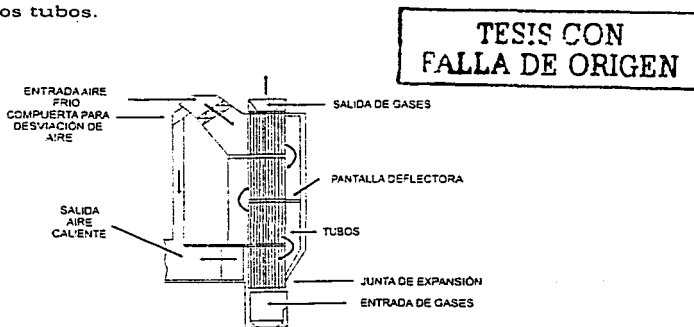
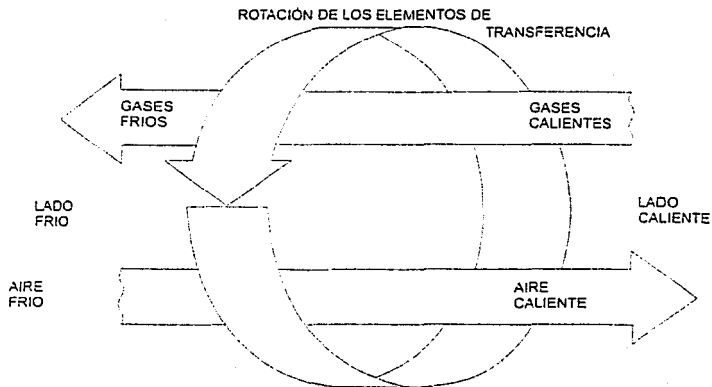


Fig. 2.25. Precalentador Aire - Gases Tipo Recuperativo.



Pre calentador Aire-Gases Tipo Regenerativo (Fig. 2.26): Está formado por un tambor conteniendo paquetes de laminillas (llamadas canastas) que son los elementos almacenadores de calor. La corriente de gases pasa por las canastas y las calienta, como el tambor esta girando continuamente por medios mecánicos, las canastas calientes llegan a una corriente de aire frío y ceden su calor, calentando al aire.

Un sistema de sellos rotativos evita que los gases y el aire se mezclen.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

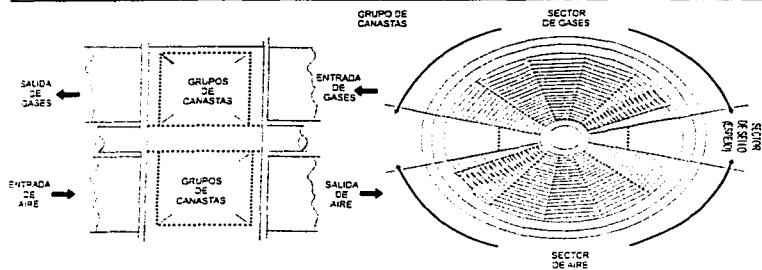
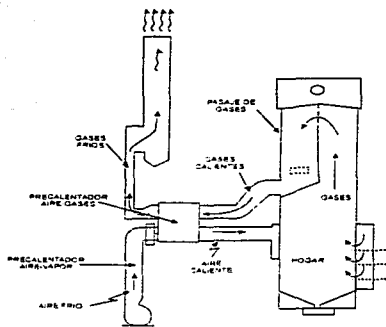


Fig. 2.26. Precalentador Aire-Gases Regenerativo.

- Ejemplos de precalentadores de aire en un generador de vapor.

En la figura 2.27.a. se ilustran los conceptos descritos anteriormente.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 2.27.a. Ejemplo de precalentadores de aire en un generador de vapor.

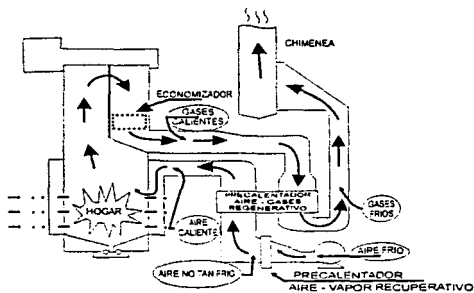


Fig. 2.27.b. Ejemplo de precalentador de aire en un generador de vapor.

ESTE CON
FALLA DE ORIGEN

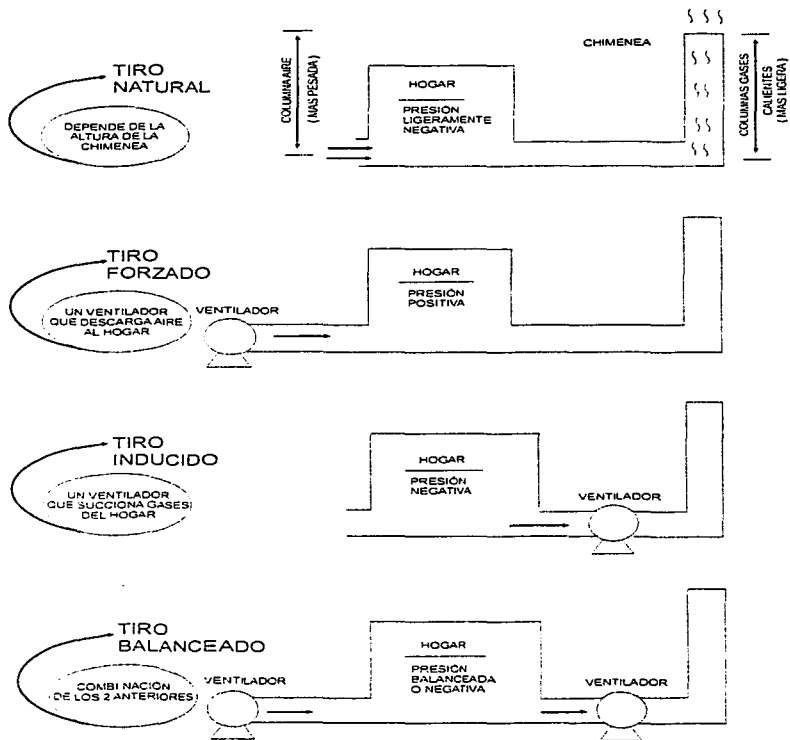


Fig. 2.28 Formas de tiro en un generador de vapor.



2.4 Tiro y ventiladores.

En un generador de vapor se requiere de un flujo de aire para producir la combustión. También se requiere que circulen los gases calientes (producto de la combustión).

El aire y los gases se confinan en conductos y pasajes durante su recorrido dentro del generador de vapor.

Para producir el flujo dentro de estos pasajes se requiere crear una diferencia de presiones mediante ventiladores y otros medios.

❖ Tiro.

Es un término usado comúnmente para referirse a la presión (Estática) en el hogar, en un ducto de aire o en pasaje de gases.

El termino TIRO aplicado a un generador de vapor se refiere a la forma en la que se logra la circulación del aire y de los gases.



❖ Ventiladores

Un ventilador es una máquina que mueve cantidades de aire o de gases de un lugar a otro. Para lograrlo proporciona la suficiente energía para vencer la resistencia al flujo.

Físicamente, un ventilador es esencialmente un rotor con aspas y una carcasa que lo envuelve y dirige al aire o gases descargados por el impulsor, estos pueden ser de dos tipos, dependiendo de la forma en que se maneja el fluido.

a) Ventilador radial o centrifugo. Es muy semejante a una forma centrifuga. El aire o gas se mueve radialmente hacia el exterior de las aspas y descargan en una carcasa que rodea al Impulsor en forma de caracol, este se muestra en la Fig. 2.29.

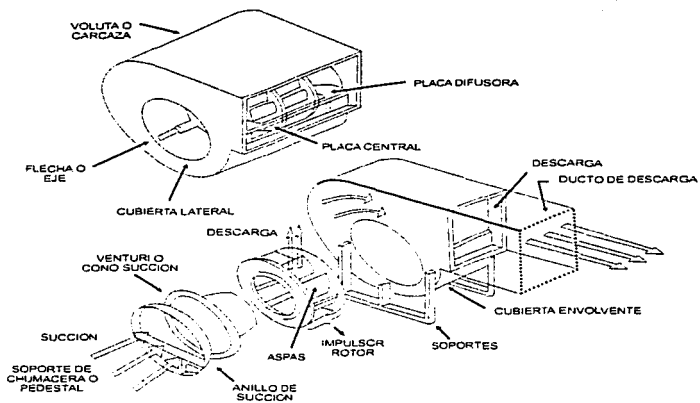


Fig. 2.29 Ventilador radial o centrífugo.

b) Ventilador Axial (Fig. 2.30). El aire o gas. Se mueve en forma paralela al eje de giro del ventilador.

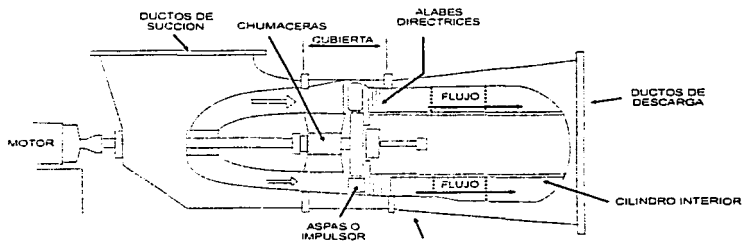


Fig. 2.30 Ventilador Axial

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Partes principales de un generador de vapor.

Las partes principales del generador de vapor descritos anteriormente se concentran en las figuras 2.31 y 2.32:

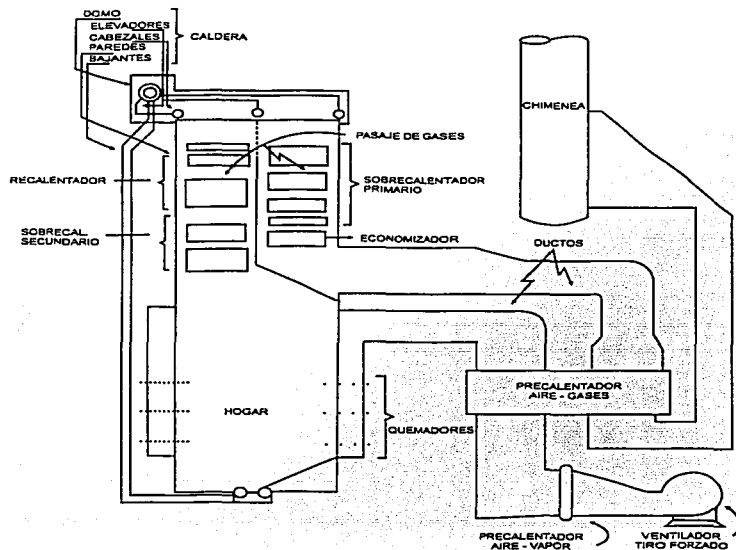


Fig. 2.31 Partes principales de un generador de vapor.



Capítulo 3

Sistemas de flujo.



3.1. Generalidades.

La forma de representación de cada uno de los sistemas mencionados, es mediante diagramas normalizados que detallan en forma esquemática cada uno de los diferentes dispositivos, instrumentos, equipos y accesorios que constituyen los sistemas principales de una central.

Dichos diagramas son denominados Diagramas de Tubería e Instrumentación y son de gran utilidad para la interpretación de los diferentes procesos de Generación de la Energía Eléctrica.

3.2. Sistema de condensado.

El agua resultante en el condensador, producto de la condensación del vapor de escape, se envía nuevamente al generador de vapor a través de dos sistemas, el primero de los cuales es el Sistema de Condensado.

La función del sistema de condensado es extraer el agua del condensador (Fig. 3.4), y hacerla pasar por una serie de equipos que le aumentan gradualmente su temperatura hasta llegar al Deaerador. El aumento de temperatura hace que esta llegue menos fría al Generador de Vapor, además de que aumenta la eficiencia del ciclo.



Descripción.

El sistema de condensado cuenta con el siguiente equipo:

- a) *Condensador.* Descrito posteriormente.
- b) *Pozo caliente.* Se denomina así a la parte inferior del condensador en donde se colecta el condensado.
- c) *Bombas de condensado.* Extraen el agua del pozo caliente y proporcionan la presión necesaria para que el agua pase por los calentadores y llegue al Deareador. Son bombas de presión baja comparadas con las bombas e Agua de Alimentación.
- d) *Calentador de baja presión.* Son equipos que aumentan la temperatura del agua (Fig. 3.1) del sistema condensado.

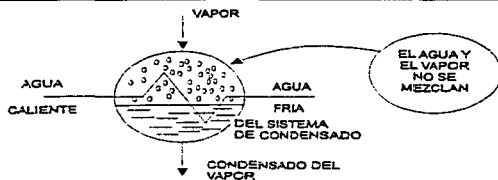


Fig. 3.1 Calentador de contacto.

El agua al calentarse circula por el interior de los tubos. Mientras que por el exterior circula vapor. El agua se calienta y el vapor se enfría. Son calentadores de contacto.

El agua pertenece al sistema de condensado y el vapor se toma de las extracciones de turbina. El agua de condensado y el vapor de la extracción no se mezclan.

El número de calentadores es variable en cada central, las unidades más grandes cuentan con 4 calentadores de baja presión. A cada calentador se le asigna un número progresivo.

Es usual encontrar a los calentadores 1 y 2 instalados físicamente en el cuello del condensador. En este último caso el camino seguido por el sistema de condensado y por el sistema de las extracciones no se altera.

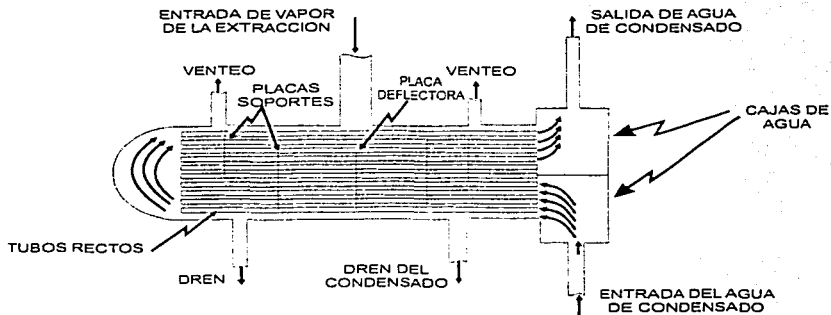


Fig. 3.2 Calentador de agua de baja presión.

e) *Deareador*. Es un equipo que cumple simultáneamente con dos funciones.

1. Es un calentador de agua.
2. Elimina los gases disueltos en el agua (Deaeración).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para lograrlo, está diseñado de tal manera que el agua del sistema de condensado llega al deareador y se fracciona en pequeñas gotas mediante charolas y otros dispositivos (Fig. 3.3)

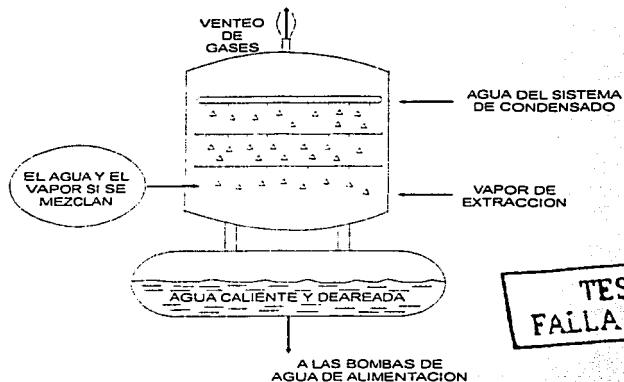


Fig. 3.3 Deareador (calentador de mezcla)

Se alimenta vapor de tal forma que arrastra los gases disueltos en el agua y estos salen por un venteo en la parte superior del Deareador. Si el agua no se dearea, los gases disueltos producen corrosión en el Generador de Vapor.

La mezcla del vapor con el agua también produce un calentamiento y por lo tanto el deareador es un calentador de mezcla a diferencia de los descritos en el punto anterior, que son los de contacto.



El agua deaerada y caliente se almacena en un depósito interior llamado Tanque de Oscilación, de donde es succionada por las bombas de agua de alimentación pertenecientes a otro sistema.

Al Deaerador se le asigna un número progresivo dentro de los calentadores, en el ejemplo le corresponde en número 5.

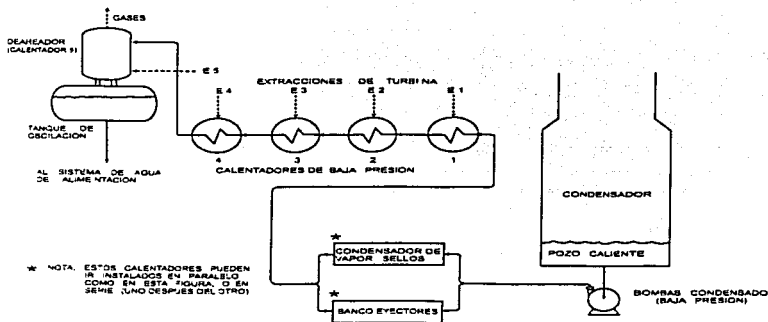


Fig. 3.4 Sistema de condensado (simplificado).

3.3. Sistema de agua de alimentación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El agua que retorna al generador de vapor es manejada por dos sistemas: El Sistema de Condensado y el Sistema de Agua de Alimentación.



El primero de ellos se describió anteriormente y el otro se describe a continuación.

La función del Sistema de Agua de Alimentación, como su nombre lo dice, es el alimentar agua al generador de vapor para reponer la que se convirtió en vapor y conservar el nivel constante en el Domo.

El agua debe tener la presión necesaria para vencer a la presión existente en el Generador de Vapor y poder entrar.

El agua de alimentación que anteriormente era de condensado, se extrae de la parte inferior del Deareador (Tanque de Oscilación), (Fig. 3.4) y durante su recorrido con destino al generador de vapor va pasando por algunos calentadores que le aumentan gradualmente su temperatura. El objetivo es que el agua no llegue tan fría al generador de vapor (economizador, domo, etc.) con lo que se disminuye el consumo de combustible además que se aumenta la eficiencia del ciclo.

Descripción:

El Sistema de Agua Alimentación, cuenta con el siguiente equipo:



a) *Bombas de agua de alimentación.* Son bombas de alta presión para que el agua circule por los calentadores y llegue al generador de vapor. Normalmente son bombas de varios pasos o etapas.

b) *Calentadores de alta presión.* Son semejantes a los calentadores de baja presión, pero los calentadores de alta presión operan con presiones de agua (y de vapor) mucho mayores. También son calentadores de contacto (Fig. 3.5) en donde el agua de alimentación y el vapor de la extracción no se mezclan.

El agua pertenece al Sistema de Agua de Alimentación y el vapor se toma de las extracciones de la Turbina.

También se les asigna un número progresivo a estos calentadores. En la figura 3.6 le corresponden los números 6 y 7.

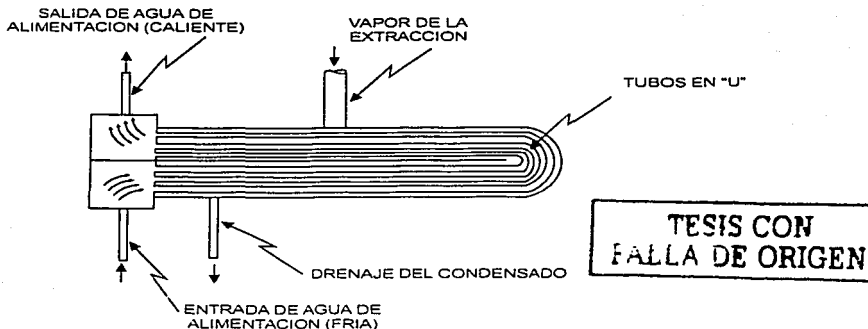


Fig. 3.5 Calentador de agua de alimentación.

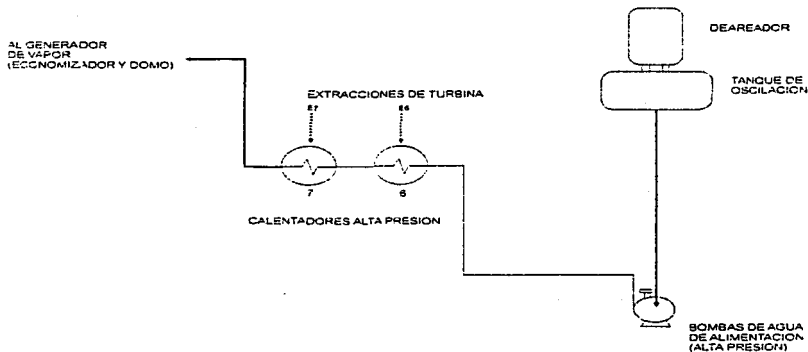


Fig. 3.6 Sistema de agua de alimentación (simplificado).



3.4. Sistemas de extracción y drenajes.

Las extracciones de vapor que se toman de la turbina se usan principalmente para los calentadores de agua del sistema de condensado y del sistema de agua de alimentación. Como se mencionó anteriormente, el uso de estas extracciones aumentan la eficiencia del ciclo.

Descripción.

En esta sección se describe brevemente el recorrido seguido por el vapor y la forma como se recupera este condensado producido por el vapor al enfriarse (Fig. 3.7). No se debe confundir este condensado con el agua del sistema de condensado que circula por el interior de los tubos.

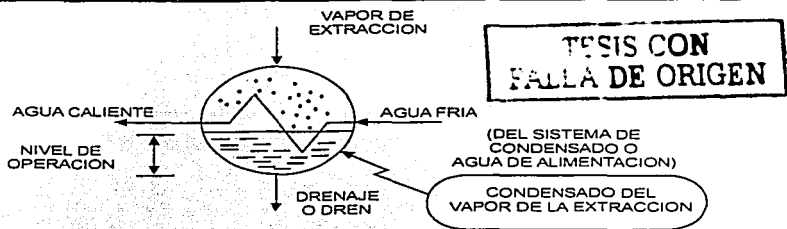


Fig. 3.7 Extracción en el calentador.

Los calentadores están diseñados para operar con determinado nivel de agua. Como continuamente está entrando vapor y produciéndose condensado, este último debe desalojarse para evitar que suba el nivel y se inunde el calentador.

El condensado del vapor es agua caliente con energía calorífica que puede ser aprovechada en otros calentadores de menor temperatura, por lo que se tiene una línea llamada Dren o drenaje que sirve para desalojar el agua y enviarla al próximo calentador de más baja temperatura (Fig. 3.8), en donde junto con el vapor de la otra extracción contribuye a aumentar la temperatura del agua del sistema de condensado o de agua de alimentación.

El condensado del calentador 7 se recupera al 6; el del 6 al deareador (calentador 5).



El deaerador no es un calentador de contacto y por lo tanto no forma condensado (el vapor se mezcla con el agua).

Del calentador 4 se envía al 3, del 3 al 2, del 2 al 1 y del 1 al condensador.

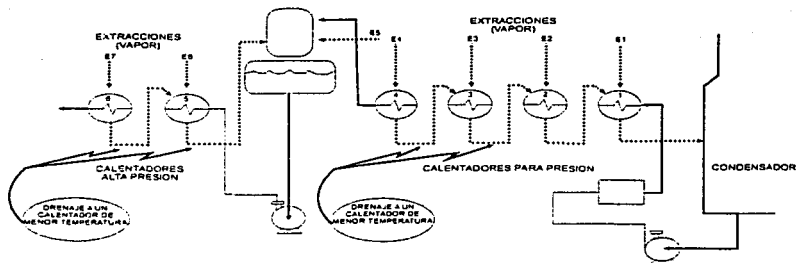


Fig. 3.8 Sistema de extracciones y drenajes (simplificado).

3.5. Sistema de vaporización y sobrecalentamiento del generador de vapor.

**TENS CON
FALLA DE ORIGEN**

El sistema de vaporización y sobrecalentamiento tiene como objetivo principal efectuar la producción de vapor su sobrecalentamiento y recalentamiento a las condiciones de temperatura y presión adecuadas para ser enviado a la turbina.



Básicamente este sistema describe los elementos y equipo que constituyen el generador de vapor por lo tanto es necesario y muy importante tener una concepción clara de todo lo que en el se indica. Observar figura 3.9.

El equipo principal que constituyen este sistema es:

1. Economizador.
2. Domo superior.
3. Domo inferior.
4. Sobrecalentador.
5. Recalentador.
6. Bombas de circulación forzada.
7. Tanque de evaporización instantánea.
8. Tanque colector de purgas.

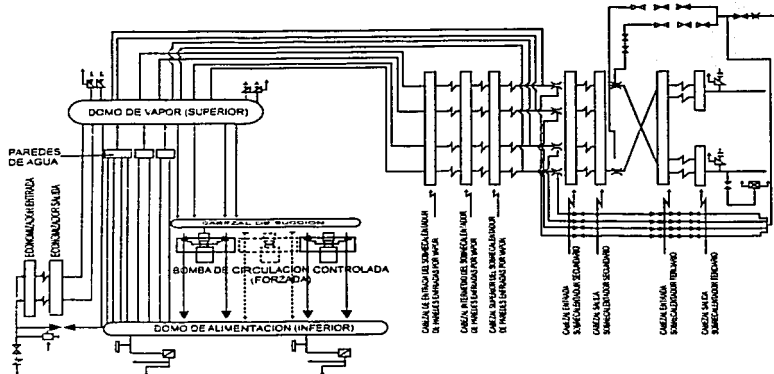


Fig. 3.9. Diagrama simplificado del generador de vapor lado de agua y vapor.

Descripción.

El sistema se inicia en línea de llegada al economizador. A esta línea se une otra línea de menor diámetro que proviene de la descarga de las bombas de condensado cuya finalidad es efectuar el llenado inicial del generador de vapor cuando no se tiene presión en el mismo. Antes de conectar el cabezal de entrada del economizador en algunos casos se tiene una línea de muestreo para análisis químicos del agua de alimentación.

El agua de alimentación circula por el interior de los tubos del economizador y los gases de la combustión por el exterior, produciéndose un



intercambio de calor de los gases al agua, lo que permite que el agua de alimentación incremente su temperatura cercana a la saturación (temperatura a la que el agua empieza a vaporizarse) correspondiente a la presión existente en el domo.

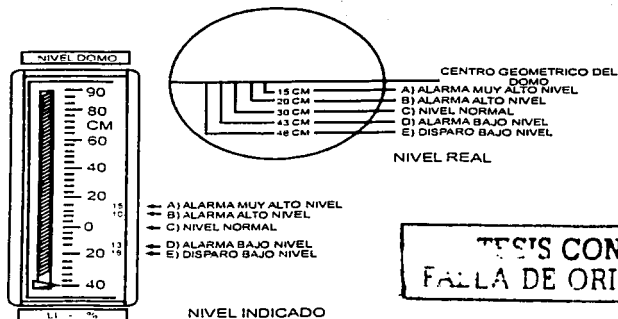
En la entrada y salida del economizador existen detectores de presión y temperatura así como señales para registro en la sala de control.



Del cabezal de salida del economizador se dirigen las líneas de alimentación de agua al domo y en dichas líneas se localiza el venteo del economizador el cual debe estar abierto cuando se hace el llenado inicial del economizador cerrado en operación normal. A este venteo, se conecta a una línea del sistema de nitrógeno que se utiliza para almacenaje del generador de vapor cuando se tenga fuera de servicio por periodos largos.

El agua es conducida hasta el domo superior a través de 2 tuberías, e introducida a él por sus 2 extremos a través de un cabezal interno que va a todo lo largo del domo, este arreglo es con el fin de evitar inestabilidad en el nivel del domo, a la hora de ser alimentado y para mantener uniforme la temperatura a todo lo largo del mismo.

El nivel del agua del domo se deberá mantener en el nivel cero de los indicadores que se localizan en la sala de control pero realmente se encuentran a 30 cm. Aproximadamente abajo del centro geométrico del domo. Como se aprecia en la figura siguiente.



Una vez en el domo, desciende agua por los tubos bajantes hacia el cabezal de succión de las bombas de circulación forzada del generador de vapor en el cual se encuentra en una línea de dosificación de fosfatos. Estas bombas son para capacidad teórica de 50% del total necesario en la unidad por lo que se tienen dos bombas como mínimo. Algunos diseños cuentan con tres bombas de las cuales dos están normalmente en servicio y una se tiene fuera de servicio, en reserva para usarse cuando sea necesario.



Del cabezal de succión sale una línea para cada bomba cuya descarga es en dos líneas y cada línea cuenta con una válvula de bloqueo que también opera como válvula no retorno (esto es para evitar retorno de flujo cuando se encuentra en una bomba fuera de servicio). Las dos líneas de descarga de la bomba van a unirse al domo inferior.

Del domo inferior el agua se distribuye a las paredes de agua (laterales, frontal y posterior) por donde ascenderá debido a la presión proporcionada por las bombas de circulación forzada y por el fenómeno de convección hasta el domo superior. Dichas paredes forman el hogar del generador de vapor por lo tanto están expuestas directamente a la flama de los quemadores y a medida que el agua sube a través de los tubos pierde densidad y se convierte en vapor saturado húmedo el cual se separa en el domo superior.

La mezcla de agua y vapor en el domo contiene aproximadamente entre 20 y 40% de agua. Esta mezcla se hace pasar por los separadores primarios ciclónicos, donde se realiza la mayor separación de agua del vapor en un espacio pequeño mediante la fuerza centrífuga. Después el fluido abundante en vapor se dirige hacia arriba, el separador secundario el cual desvía el flujo de vapor a través de placas corrugadas dispuestas con poca separación entre ellas, las cuales cambian constantemente la dirección del vapor, forzando el contacto de las pequeñas gotas de agua con la película de agua que se forma sobre las placas lo que provoca una mejor separación de las gotas. El caudal de vapor a la salida del



separador secundario, descarga horizontalmente en el espacio superior del domo reduciéndose de esta forma el vector de velocidad ascendente.

El vapor saturado seco fluye desde el domo superior a través de una serie de tubos de conexión, al cabezal de entrada a la primera etapa del Sobrecalentador denominado generalmente "Sobrecalentador de baja temperatura". Aquí es donde se efectúa el sobrecalentamiento inicial.

Del cabezal de salida del Sobrecalentador de baja temperatura el vapor fluye hacia el cabezal de entrada de una segunda etapa de sobrecalentamiento denominado "Sobrecalentador de temperatura Intermedia". En este tramo de recorrido, a cada una de las líneas de vapor, llega una línea de menor diámetro proveniente del domo cuya función es proporcionar una atemperación constante con vapor saturado.

En algunos diseños en un paso intermedio del Sobrecalentador de temperatura intermedia, se tiene una atemperación primaria para control de temperatura del vapor antes de entrar a la última etapa de sobrecalentamiento.



Del cabezal de salida del sobrecalentador de temperatura intermedia, el vapor se dirige hacia la última etapa de sobrecalentamiento denominada "sobrecalentador de alta temperatura" este recorrido lo efectúa a través de dos tuberías en las cuales se encuentran instalados los atemperadores que se encargan de controlar la temperatura del vapor sobrecalentado que se dirigirá hacia la turbina. Esto lo logra introduciendo mayor o menor cantidad de agua proveniente de la descarga de las bombas de agua de alimentación mediante una mayor o menor apertura de las válvulas de control de atemperación.

El vapor atemperado llega al cabezal de entrada del sobrecalentador de alta temperatura donde incrementa su temperatura al valor de diseño necesario para enviarlo a la turbina. Esto lo hace al pasar por cada uno de los elementos de dicho sobrecalentador para finalmente llegar al cabezal de salida del sobrecalentador de alta temperatura. De aquí el vapor sobrecalentado a la temperatura adecuada y con la presión de diseño es enviado como vapor principal, a través de dos tuberías, a la turbina de alta presión.

3.6. Sistema de vapor principal.

El vapor producido en el generador de vapor con las características de presión y temperatura adecuada, es enviado hacia la turbina en la cual convierte la energía



térmica que contiene, en trabajo mecánico para mover el generador eléctrico al cual se encuentra acoplada.

En las unidades modernas las turbinas generalmente constan de varias etapas y son denominadas "compuestas".

La admisión de vapor se efectúa a través de válvulas cuya función puede ser de control o de corte total de flujo, dependiendo de las condiciones operativas de la turbina.

El sistema de vapor principal y turbina tiene por objeto describir el camino que recorre el vapor en el interior de la turbina en cada una de sus etapas hasta llegar a la descarga hacia el condensador principal, incluyendo los componentes relacionados con la operación y protección de la misma.

En la figura 3.10 se observa el diagrama simplificado de este sistema.

El equipo principal que constituye este sistema simplificado es el siguiente:

1. Turbina de alta presión.
2. Turbina de presión intermedia.
3. Turbina de baja presión.
4. Carcazas de la turbina.



5. Válvula de paro principal (de estrangulamiento).
6. Válvulas reguladoras (de control).
7. Válvulas de paro recalentado.
8. Válvulas interceptoras.

TITULO CON FALLA DE ORIGEN

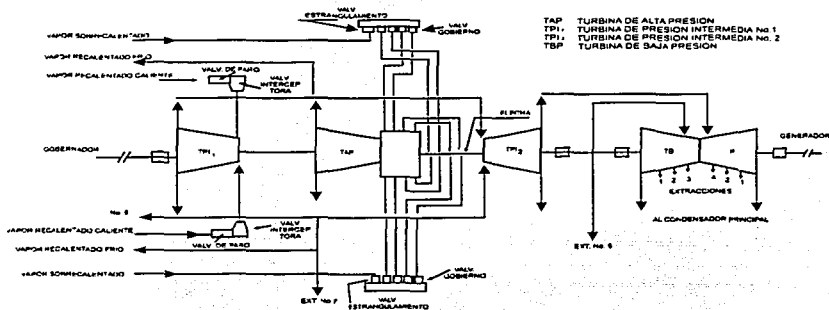


Fig. 3.10 Diagrama simplificado del sistema de vapor principal.

Descripción.

El vapor producido por el generador de vapor, es conducido a través de dos tuberías hasta las cajas de vapor: en cada una de estas tuberías, antes de que se unan a las cajas de vapor, se encuentra una línea de drenaje (drenaje de línea de vapor principal) con su válvula motorizada, controlada desde la sala de control. Este drenaje se utiliza durante los arranques de unidad para calentar las



tuberías y controlar la temperatura del vapor que se admite en la turbina. Durante el paro de la unidad, este drenaje se abre para eliminar el condensado que llegase a formar con cargas menores de 20% y cuando las válvulas de estrangulamiento se hayan cerradas, para drenar el condensado formado por el vapor que queda atrapado en las líneas.

En seguida el vapor llega a las válvulas de estrangulamiento, las cuales, en operación normal se deberán encontrar totalmente abiertas al presentarse un disparo de la turbina deberán cerrar instantáneamente, cortando el flujo de vapor. Durante el rodado de la turbina las válvulas de estrangulamiento se mantienen cerradas (las válvulas de gobierno se encuentran totalmente abiertas) mientras el vapor admitido a la turbina es regulado con las válvulas piloto. Dependiendo del tipo de rodado que se haya escogido (el arco 0 pleno presenta la ventaja de que se tiene un calentamiento más uniforme) las válvulas piloto regulan el flujo de vapor hasta que hayan abierto toda su carrera (arranque a arco pleno) o hasta que la turbina haya alcanzado 3,380 r.p.m. (arranque de arco parcial) a partir de lo cual las válvulas de gobierno cierran parcialmente a una posición equivalente a la apertura de las válvulas piloto y éstas junto con las de estrangulamiento. Se deberán abrir lentamente al 100%.

Después de las válvulas de estrangulamiento, se encuentran las válvulas de gobierno, encargadas de regular en operación normal el flujo de vapor de la turbina, las cuales son controladas por el gobernador principal, cuya función es



proporcionar las válvulas gobernadoras de tal forma que la turbina gire con una velocidad constante de 3,600 r.p.m.

Las cuatro válvulas gobernadoras de cada caja de vapor, descargan cada una de ellas en una tubería ajustable que termina en las toberas del paso curtis.

En la parte más baja de cada una de estas tuberías, se encuentra una línea de drenaje, que descargan a un bloque de orificios que tiene la única finalidad de coleccionar el condensado de las 4 líneas de vapor que le corresponden, para que ahí sea drenado a través de una válvula motorizada al condensador. Esta válvula constituye uno de los 3 drenajes de la turbina, los cuales son controlados desde la sala de control. Los drenajes de la turbina deberán permanecer abiertos cuando la unidad se encuentre generando menos del 20% de carga (generalmente en arranque y paros de la unidad), cuando se detecte alta temperatura diferencial entre la carcasa interior y exterior de las turbinas de alta presión, presión intermedia y cuando se tenga alta temperatura diferencial entre el metal y el vapor en el paso curtis.

Así pues, el vapor es admitido al paso curtis, donde la velocidad que lleva el vapor (proporcionada por las toberas) producen un par de los alabes sobre los que incide y la magnitud de este par depende del número de toberas que se encuentran arrojando vapor sobre los álabes y que a su vez depende del número de válvulas de gobierno que se encuentran abiertas, de las 8 que contienen las



cajas de vapor. Por lo anterior, es que el paso curtis constituye el elemento de regulación de velocidad de la turbina.

En el paso curtis se tiene otra línea de drenaje que descarga al condensador principal a través de su válvula motorizada, la cual se opera desde la sala de control y de la misma forma constituye otro de los drenajes de la turbina.

El vapor al fluir a través de la turbina de alta presión, proporciona un par al rotor, perdiendo por ello gran parte de su presión y temperatura, por lo que al salir de ellas es retornado a través de dos tuberías denominadas de vapor recalentado frío, a la caldera, para que recupere la temperatura perdida y pueda volver a trabajar en las siguientes etapas de la turbina.

En cada una de las 2 líneas de vapor recalentado frío, se tiene una línea de drenaje que descarga al condensador principal a través de la válvula neumática, al cual dispone de control automático, que la manda abrir cuando detecta alto nivel en su pierna colectora de condensado o también se puede controlar desde un conmutador en la sala de control.

El vapor retorna del generador de vapor a través de dos tuberías denominadas de vapor recalentado caliente, con la temperatura que recuperó en los elementos del recalentador.



En cada una de las dos tuberías de vapor recalentado caliente, antes de las válvulas de paro, se encuentra una línea de drenaje que descarga al condensador principal a través de una válvula motorizada, la cual es controlada con su interruptor desde la sala de control y que se debe abrir durante los arranques y paros de la unidad, cuando esta tenga menos de 20% de carga.

Las válvulas de paro de recalentado tienen la función de cerrarse cuando se presente un disparo de turbinas (en forma similar a como lo hacen las válvulas de estrangulamiento con el vapor sobrecalentado) cortando el suministro de vapor recalentado a la turbina. Estas válvulas se abrirán totalmente cuando sea restablecido el disparo de turbina.

Después de las válvulas de paro, se encuentran las válvulas interceptoras (cuyo funcionamiento es similar a las válvulas de gobierno) que tiene como finalidad regular el flujo de vapor recalentado que se admite en la turbina. Estas válvulas empezarán a abrir con la misma señal de temperatura de las válvulas de gobierno pero en mayor proporción que estas, de tal forma que aproximadamente al 50% de la apertura de las válvulas de gobierno, las válvulas interceptoras se encontraran totalmente abiertas. El cierre de las válvulas interceptoras se hará de la misma forma que las de gobierno, es decir cuando se presente un disparo de turbina o momentáneamente cuando exista un súbito rechazo de carga de la red del sistema eléctrico.



De esta forma el vapor recalentado es admitido a la turbina de presión intermedia No. 1, produciendo un par en su rotor al fluir a través de sus álabes de reacción en dirección hacia el gobernador. Al salir el vapor de la turbina de presión intermedia No. 1, se dirige a la No. 2, utilizando para ello el espacio entre la carcaza interior y exterior. En este espacio intercarcazas se encuentra la línea de drenado que descarga al condensador a través de la válvula motorizada y que es otro de los drenes de la turbina cuya operación ya se explicó anteriormente.

El vapor fluye a través de los álabes de reacción de la turbina de presión intermedia No. 2 con dirección hacia el gobernador, produciendo un par en su retorno y contribuyendo a que este gire. Al salir el vapor de esta turbina es conducido a través de 2 tuberías superiores a la turbina de baja presión.

El vapor de la turbina de baja presión es admitido por su parte central, donde el flujo de vapor se divide y fluye con direcciones opuestas a través de los álabes, produciendo un par en el rotor, para luego ser descargado al condensador principal.

En cada uno de los extremos de la turbina de baja presión en la descarga final del vapor hacia el condensador, se encuentran una serie de toberas distribuidas en un anillo radial y que son alimentadas con agua de la descarga de las bombas de condensado. Dichas toberas tienen la finalidad de refrigerar la



zona de escape de la turbina de baja presión para evitar que la temperatura en dicha zona sobrepase los 70°C, para evitar esfuerzos innecesarios debido a la expansión de las partes de la cámara de escape y posibles desalineamientos de los cilindros interiores, lo cual podría causar rompimiento de sellos.

3.7. Sistemas de vapor auxiliar.

El sistema de vapor auxiliar tiene la finalidad de proporcionar vapor a los siguientes equipos:

- a) Eyectores.
- b) Deareador.
- c) Atomización a quemadores.
- d) Calentadores de aire vapor.
- e) Generador vapor/vapor.

El generador vapor/vapor produce vapor secundario que a su vez alimenta a los siguientes equipos.

- a) Calentadores de succión del tanque de almacenamiento de aceite combustible.
- b) Calentadores de succión del tanque de día de aceite de combustible.



- c) Calentador principal de aceite combustible.
 d) Venas de calentamiento.
 e) Fosas de recepción de furgones de combustible.

El equipo principal del sistema de vapor auxiliar está constituido básicamente por el generador de vapor/vapor, los calentadores de aire a vapor, tuberías, válvulas motorizadas, válvulas neumáticas y la instrumentación necesaria para medición y control, (ver diagrama simplificado Fig. 3.11).

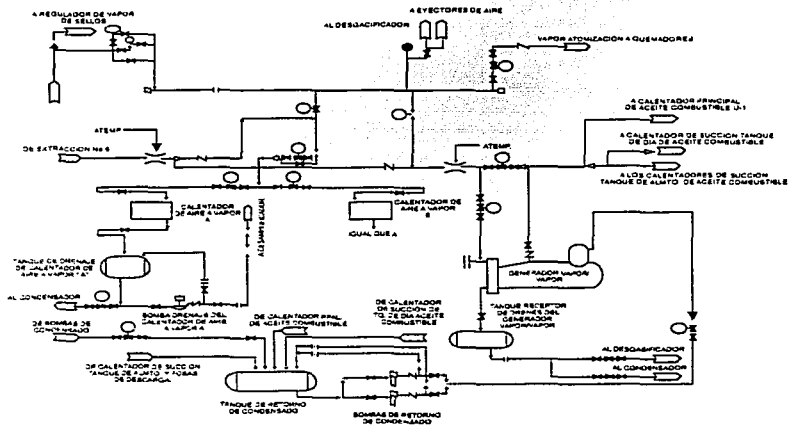


Fig. 3.11 Diagrama simplificado de tubería e instrumentación. Sistemas de vapor auxiliar.

**Descripción.**

El suministro de vapor auxiliar es tomado del cabezal de entrada del sobrecalentador terciario pasando a través de una estación de válvulas motorizadas reductoras de 180 a 18 Kg/cm².

Este cabezal normalmente alimenta vapor al deareador, a los eyectores de aire y vapor de atomización a quemadores de aceite combustible, mediante una válvula motorizada controladora de presión.

El vapor necesario para la operación de los calentadores de aire a vapor y el generador vapor/vapor se obtiene de la extracción No. 6 y cuando no se tiene la suficiente presión en este suministro, se alimenta del vapor auxiliar mediante dos válvulas motorizadas que abren automáticamente al bajar la presión de la extracción No. 6 (presión normal 20 Kg./cm²).

El suministro de vapor auxiliar al deareador se efectúa durante los arranques cuando aun no existe presión de vapor en la extracción No. 5. Este suministro controla la presión del deareador mediante una válvula motorizada controladora de presión y un tanque de atemperación donde este vapor se combina con agua proveniente del sistema de condensado y cuyo drenaje se envía al condensador.



El vapor empleado para efectuar la atomización del aceite combustible en los quemadores del generador de vapor debe tener ciertas condiciones de presión y temperatura, por lo que se cuenta con una válvula motorizada controladora de presión y un tanque de atemperación donde este vapor se combina con agua proveniente del sistema de condensado y cuyo drenaje se envía al condensador.

El suministro de vapor proveniente de la extracción No. 6 se atempera con agua del sistema de condensado para después dividirse en dos líneas, la primera lo conduce a los calentadores de aire de vapor, cuenta con una válvula motorizada que controla la presión a dichos calentadores en 7 kg/cm^2 , se cuenta además con dos válvulas motorizadas de control de temperatura, una para cada calentador que admite el vapor necesario para mantener la temperatura de aire que pasa a través del calentador, con lo que se condensa y se recupera como se describió anteriormente.

El vapor de la extracción No. 6 que se emplea en el generador vapor/vapor recibe otra atemperación con agua del sistema de condensado y se controla su presión mediante una válvula motorizada para mantener 7 kg/cm^2 de presión de vapor secundario aproximadamente.



El condensado formado se colecta en el tanque receptor de drenes y se envía al deareador o al condensador según sea el caso. El repuesto de agua para la formación del vapor secundario se ha visto ya en la descripción del generador vapor/vapor. Este vapor secundario se emplea en el siguiente equipo.

- a) Calentador principal de aceite combustible.
- b) Calentador de succión de tanque de día de aceite combustible.
- c) Venas de vapor en zona de tanque de día y en tanque de almacenamiento.
- d) Calentador de succión del tanque de almacenamiento.
- e) Calentador de fosa de recepción y calentamiento de carros tanque.

El sistema cuenta, en el cabezal de vapor con una válvula motorizada controladora de presión, que abre cuando se tenga baja presión en el cabezal de vapor secundario que sirve como respaldo.

3.8. Sistema de combustible a quemadores.

La obtención de una combustión eficiente en los generadores de vapor que utilizan combustóleo pesado, requieren en gran parte que este sea suministrado a determinados valores de presión, flujo y temperatura. El sistema de combustible a quemadores tiene la función de proporcionar continuamente un flujo adecuado de combustible bajo las condiciones requeridas, esto se muestra en la Fig. 3.12.



El equipo principal que constituye este sistema es el siguiente.

1. Tanque de día.
2. Calentadores de succión de tanque de día.
3. Filtros fríos.
4. Bombas de combustible a quemadores.
5. Válvula de control de presión de descarga de bombas.
6. Calentadores principales.
7. Filtros calientes.
8. Medidor de flujo.
9. Válvulas de control.
 - a) De combustible a quemadores.
 - b) De flujo mínimo.
 - c) De derivación.
10. Válvula de corte.
11. Quemadores.
 - a) Cañón de quemador.
 - b) Válvulas de vapor y combustible.

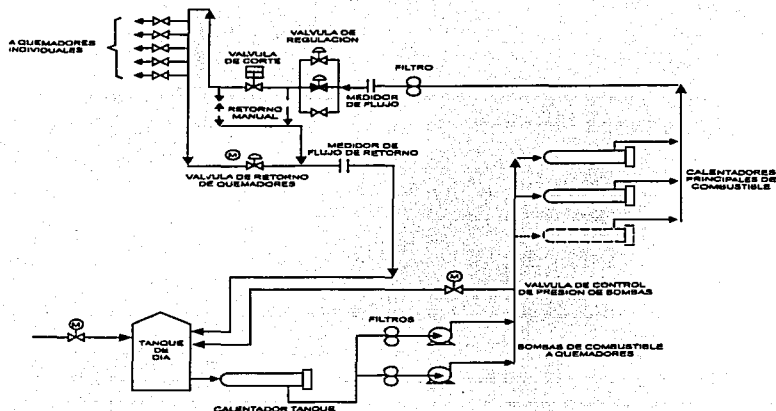


Fig. 3.12 Sistema de aceite combustible a quemadores (diagrama simplificado).

Descripción.

El aceite combustible se encuentra inicialmente en el tanque de día. Donde sale y pasa por el calentador del tanque de día. En donde se eleva la temperatura, reduciendo la viscosidad al valor requerido para su manejo. La temperatura del vapor se establece mediante un controlador local o mediante una estación de control remota. El calor que proviene del generador vapor/vapor calienta al combustible produciendo un condensado que se recupera hacia el tanque de retorno de condensado.



El combustible pasa por los filtros, en donde se quedan los sólidos y materias extrañas, y llega a las bombas de combustible a quemadores, en donde se eleva la presión hasta un valor controlado por una válvula automática. La presión se controla, haciendo recircular hacia el tanque de día, una parte de flujo de combustible. Cuando no se tiene flujo de combustible hacia los quemadores por que está cerrada la válvula de corte, esta válvula de control de presión maneja todo el flujo y entonces puede calentarse el combustible dentro del tanque de día hasta un valor deseado.

El combustible de alta presión pasa por los calentadores principales en donde aumenta la temperatura hasta el valor requerido para la atomización. El vapor proviene del generador vapor/vapor, pasa por una válvula de control, finalmente sale como condensado que se recupera. La temperatura del combustible se establece mediante una estación selectora desde la sala de control.

El combustible caliente pasa por otros filtros, por uno o varios medidores de flujo y llega a un grupo de válvulas de control. El combustible pasa por una válvula de control principal o por la válvula de flujo mínimo y llega a la válvula de corte.

Cuando la válvula de corte esta cerrada, se mantiene un pequeño flujo mediante una línea de retorno y una válvula de operación manual.



Después que se ha restablecido el disparo del generador de vapor y se han cumplido con los permisos necesarios, puede abrirse la válvula de corte, y entonces el combustible pasa al cabezal de quemadores.

El combustible que llega al cabezal esta caliente pero el que se encuentra en el cabezal esta frío, por lo que es necesario una recirculación para que el caliente desplace al frío y entonces se tengan las condiciones de temperatura requerida para la atomización.

El combustible retorna hacia el tanque diario a través de la válvula de retorno, pasa por los medidores de flujo de retorno y llegan nuevamente al tanque de día.

Cuando se enciende un quemador, primero debe abrir la válvula de vapor para asegurar una buena atomización, después abre la válvula de combustible. El vapor y el combustible llegan al soporte mediante conexiones flexibles y entran al cañón del quemador, pasa por el cuerpo del quemador y llegan a la boquilla o ficha, en donde se mezcla y atomiza al interior del hogar para participar en la combustión.



El apagado del quemador se produce cerrando la válvula de combustible y la válvula de vapor.

Cuando se apaga un quemador, no es conveniente que se quede el combustible en línea después de la válvula del quemador, ni en las mangueras, ni en el cañón del quemador. Para evitarlo, abre la válvula de lavado que comunica vapor a la línea de combustible produciendo una acción de limpieza. Como el combustible arrastrado entra al hogar, es requisito que se encuentre encendido el piloto para asegurar la combustión.

3.9. Sistema de aire y gases del generador de vapor.

En las unidades generadoras de vapor se requiere que exista un flujo apropiado de aire para suministrar la cantidad apropiada, para efectuar la combustión y para desalojar los gases producto de la combustión. Este flujo que circula por los ductos de aire, arreglos del hogar, elementos de intercambio de calor, ductos de gases y chimeneas lo forma y mantiene un arreglo de ventiladores y chimeneas que conforma al sistema de aire y gases del generador de vapor en algunos casos la presión diferencial requerida para establecer este flujo se logra mediante una chimenea o una combinación de ventiladores y chimeneas.



La presión estática mantenida en el hogar, ductos de aire o gases y chimenea se conoce como "tiro". El tiro se clasifica en tiro forzado, tiro inducido, tiro balanceado y tiro natural. El término "tiro forzado" se emplea cuando el aire y los gases fluyendo en un generador de vapor se mantienen con presiones arriba de la atmosférica. Esto implica necesariamente el empleo de un ventilador de tiro forzado. (hogar positivo o presurizado).

Cuando el aire o los productos de combustión fluyen en el generador de vapor bajo la influencia de un decremento continuo de presión debajo de la atmosférica, se dice que el sistema opera bajo tiro inducido. Este es el caso donde se emplea únicamente una chimenea para mantener la presión negativa o se puede auxiliar con un ventilador de tiro inducido para aumentar la presión diferencial.

El término "tiro natural" en combinación con chimeneas se emplea para designar la presión diferencial ocasionada por la gravedad, en este caso, una diferencia de densidad entre el gas caliente en la chimenea y el aire más frío del ambiente resulta en una presión negativa, o tiro natural en la entrada de la chimenea.

El tiro balanceado se refiere a un punto en el sistema donde el tiro es igual a cero (presión estática igual a presión atmosférica), este término describe a una



unidad en la que la presión en el hogar es ligeramente menor que la presión atmosférica. Este tipo de tiro involucra el empleo de ventiladores de tiro forzado y tiro inducido.

Actualmente, en generadores de vapor de alta capacidad, los tipos de tiro más empleados son el tiro balanceado y el tiro forzado.

Independientemente del tipo de tiro con que se opere un generador de vapor, se cuenta con algunos de los equipos o componentes que a continuación se enumeran:

1. Ventilador de tiro forzado.
2. Ventilado de tiro Inducido.
3. Ventilador recirculador de gases.
4. Ventilador de aire o pilotos.
5. Ventilador de aire para enfriamiento de detectores de flama.
6. Calentadores de aire a vapor.
7. Calentadores regenerativos de aire.
8. Equipo auxiliar (compuertas diversas, cajas de aire, ductos, etc.).

En la figura 3.13 se presenta un diagrama simplificado de sistema de aire y gases de un generador de vapor.

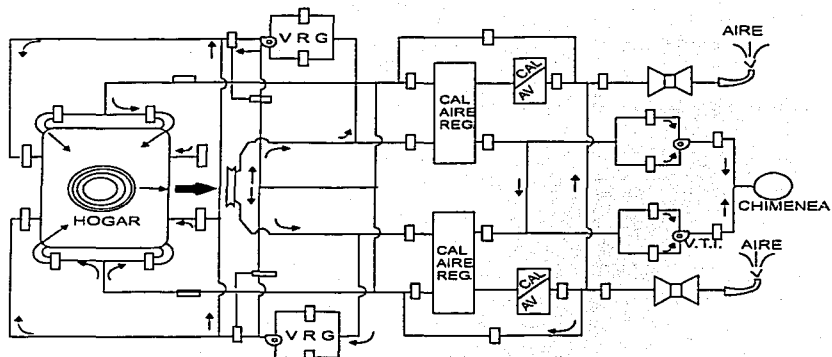


Fig. 3.13 Sistema del generador de vapor lado aire y gases.

Descripción.

Este sistema se deberá poner en servicio para proceder al encendido del generador de vapor, esta operación involucra la siguiente secuencia:

- Barrido o purga del hogar.
- Encendido de quemadores.
- Operación normal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Purga o barrido del hogar.

Esta operación se efectúa para eliminar los gases residuales que pudieran encontrarse en el interior del hogar y ductos que en un momento dado, al encender algún piloto o quemador pudieran hacer explosión con los consecuentes daños al equipo.

El barrido del hogar realiza a través de los ductos del sistema, tanto del lado aire como del lado gases.

Para poder efectuar el barrido el hogar se deberá poner en servicio el siguiente equipo:

- a) Precalentadores de aire regenerativo.
- b) Ventiladores de tiro forzado.
- c) Ventiladores de enfriamiento a detectores de flama.

En forma automática, las siguientes compuertas del sistema se abren completamente, compuertas de aislamientos de los calentadores de aire regenerativos y de aire a vapor, compuertas de descarga de los ventiladores de tiro forzado, recirculador de gases y ventilador de tiro inducido.



Las compuertas de aire de quemadores permanecen cerradas, las compuertas de aire auxiliar abren para modular la presión diferencial de cajas de aire y hogar, las compuertas de entrada de los ventiladores de tiro inducido abren para controlar la presión del hogar y las de los ventiladores de tiro forzado abren para suministrar un flujo de aire del 30 al 40 % del flujo total.

Una vez cumplidos los permisos de los sistemas del generador de vapor lado aire, lado gases y de combustible se puede iniciar la purga del hogar. Después de dos minutos de iniciada arranca los ventiladores recirculadores de gases. La duración total del barrido es de 5 minutos, después de los cuales se puede iniciar el encendido de los quemadores.

El orden de puesta en servicio del equipo del sistema es el siguiente:

1. Calentadores de aire a vapor A y B.
2. Ventilador de enfriamiento de los detectores de flama.
3. Calentadores regenerativos de aire A y B.
4. Abiertas compuertas de entradas salida, lado aire y lado gases de los precalentadores regenerativos.
5. Sistema de enfriamiento de cámara de T.V.
6. Ventilador de tiro forzado A.
7. Ventilador de tiro forzado B.



Una vez efectuada esta secuencia, el sistema quedará en servicio. El ventilador recirculador de gases entra en servicio durante la purga del hogar y en operación normal con cargas arriba del 25%, regulando el flujo con sus compuertas de acuerdo a la carga de la unidad.



Capítulo 4

Turbina de vapor



4.1. Características generales.

Una turbina de vapor es una máquina que convierte la energía del vapor en trabajo mecánico, esto en una central termoeléctrica. Este trabajo se emplea para mover un generador eléctrico que transforme el trabajo a energía eléctrica.

La turbina de vapor es la más simple, la más eficiente y completa de las máquinas que usan vapor. Comparadas con otras máquinas, tiene las siguientes ventajas:

- a) Ocupa poco espacio.
- b) Es ligera en peso.
- c) Es bastante eficiente.
- d) Funcionamiento relativamente silenciosos y sin vibraciones.

4.2. Principios de operación.

El vapor entra a una tubería en donde se expansiona, obteniéndose un chorro de vapor con gran velocidad (Fig. 4.1)

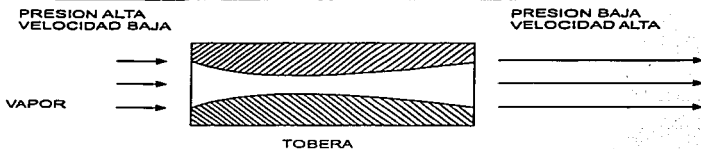


Fig.4.1 Tobera.

El vapor de alta velocidad puede ser aprovechado para mover una rueda, en dos formas diferentes. (Fig. 4.2)

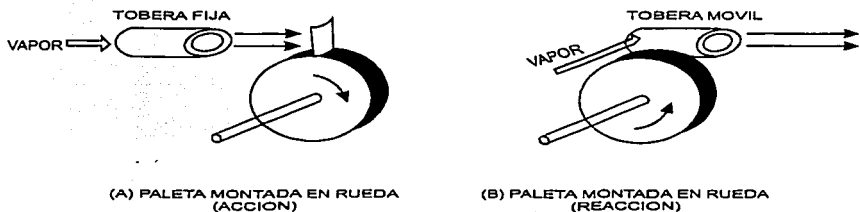


Fig. 4.2 Vapor moviendo una rueda.

a) La tobera se encuentra fija y el chorro de vapor se dirige en contra de una paleta móvil. La fuerza del chorro actúa sobre la paleta y la impulsa, produciendo el movimiento de la rueda. Este principio se conoce como acción o impulso.

b) La tobera se encuentra montada en la rueda y puede moverse libremente. La alta velocidad del vapor de salida provoca una reacción en la tobera, haciendo que



la rueda se mueva en sentido opuesto al chorro de vapor, este principio se conoce como reacción.

En los dos casos, la energía térmica del vapor (presión y temperatura) se convirtió en trabajo mecánico en la rueda.

4.3. Partes principales.

Las partes principales de una turbina de vapor son:

Rotor. Parte móvil de la turbina que lleva montadas las ruedas con paletas o las toberas móviles (las paletas y toberas móviles se conocen como álabes).

Toberas fijas. Transforman la presión del vapor en velocidad.

Carcasa. Cubierta o envolvente de la turbina en donde van montadas las toberas fijas.

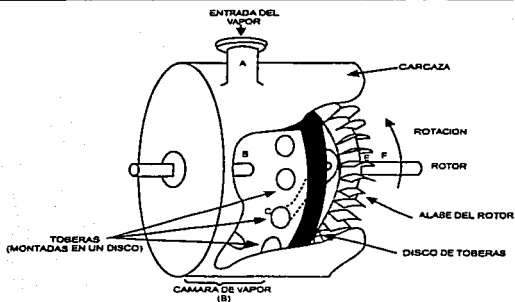


Fig. 4.3 Partes principales de una turbina. (Flujo de vapor A-B-C-D-E-F)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4. Clasificación de las turbinas.

Las turbinas se clasifican de muchas formas, entre las principales están:

A. Turbinas. Según el principio de operación (Fig. 4.4).

- a) De acción o impulso.
- b) De reacción.
- c) Combinadas.

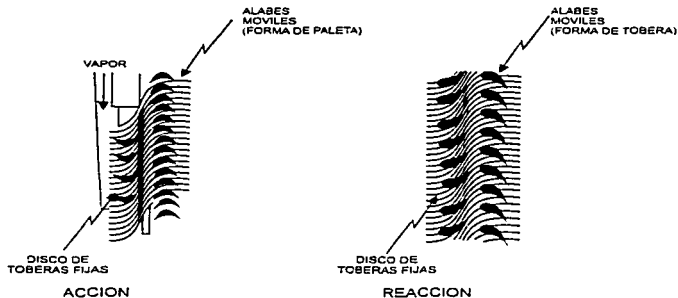


Fig. 4.4 Forma de los álabes de las turbinas según su principio de operación.

Obsérvese que los dos tipos tienen toberas fijas y la diferencia entre ellos está en los álabes móviles.



Las turbinas de acción y de reacción pueden estar formadas por varios pasos o etapas. El vapor que sale de una rueda de alabes pasa a otra y así sucesivamente, se les llama turbinas de etapas múltiples, entonces tiene un rotor con varias ruedas y sus respectivos discos de toberas.

Las turbinas combinadas están formadas por ruedas de dos tipos, las primeras son acción y las últimas son de reacción

B. Turbinas. Según recalentamiento (Fig. 4.5)

- Sin recalentamiento.
- Con recalentamiento.

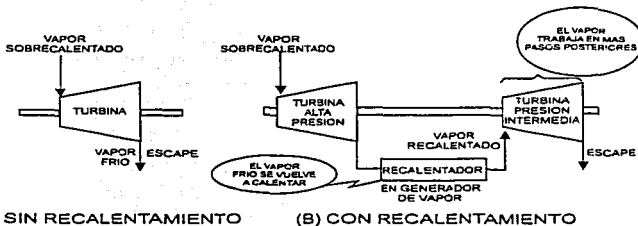


Fig. 4.5 Recalentamiento del vapor para las turbinas.

El recalentamiento permite seguir aprovechando el vapor en otras etapas de la turbina, o en otra turbina.



C. Turbinas. Según extracciones (Fig. 4.6)

- a) Con extracciones.
- b) Sin extracciones.

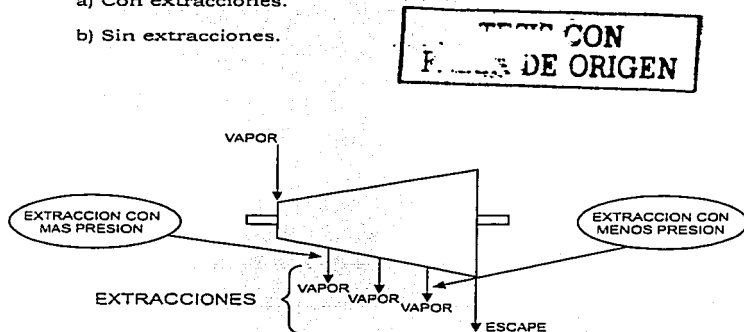


Fig. 4.6 Turbina con extracciones.

Se extraen pequeñas cantidades de vapor en el recorrido interior de una turbina de varias etapas. El vapor se aprovecha en otros procesos (calentadores de agua, de aire, etc.). Las extracciones aumentan la eficiencia de la central. La presión de vapor de las extracciones van disminuyendo según su localización en la turbina.

D. Turbinas. Según el escape (Fig. 4.7)



a) Con condensación.

b) Sin condensación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

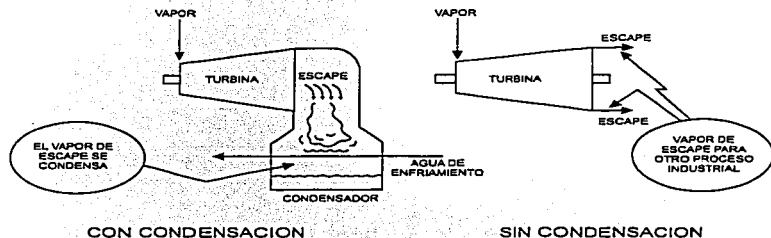


Fig. 4.7 Turbinas con o sin condensación.

E. Turbinas. Según el flujo de vapor. (Fig. 4.8).

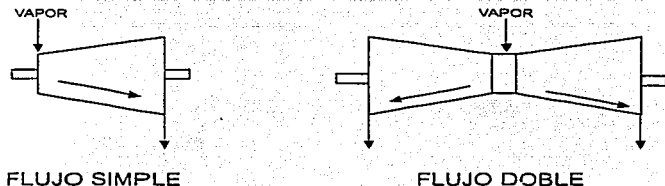


Fig. 4.8 Turbinas con flujo simple y doble.

**Turbinas compuestas.**

Los tipos de turbina anteriores pueden agruparse en diferentes formas de tal manera que cuando el vapor sale de una turbina entra a otra y así sucesivamente. Entonces cada turbina será un componente del grupo y se dice que forman una turbina compuesta (en inglés "compound").

Los términos siguientes se usan en inglés por no existir aún una traducción correcta aceptada.

F. Turbinas compuestas

- a) Tandem compound.
- b) Cross compound.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

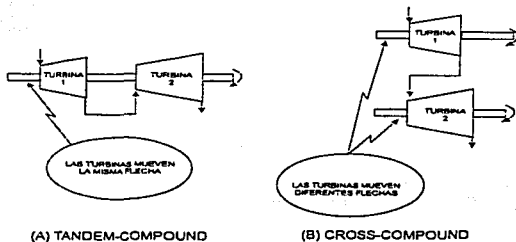


Fig. 4.9 Turbinas compuestas.



4.5. Ejemplo.

En la figura 4.10 se verá el ejemplo de una turbina típica de una central termoelectrica (diagrama simplificado) y en la figura 4.11 se tiene un diagrama completo de una turbina tandem compound con recalentador.

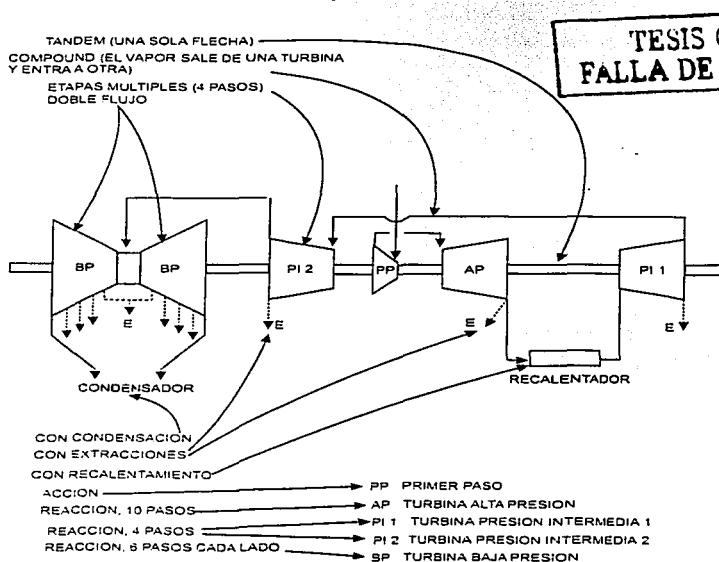


Fig. 4.10 Turbina típica.

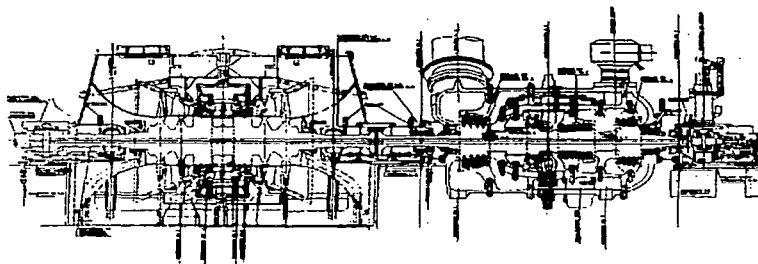


Fig. 4.11 Turbina tandem compound con recalentamiento.

4.6. El condensador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El vapor que sale por el escape de una turbina, dependiendo del diseño de esta última, puede seguir dos caminos diferentes.

- a) Usarse para otros procesos (turbina sin condensación).
- b) Condensarse (turbina con condensación).

En el caso de las centrales termoelectricas de la Comisión Federal de Electricidad, el vapor se condensa, lo que permite aprovechar más energía y recuperar el agua para alimentarse de nuevo al generador de vapor.



La condensación del vapor de escape se efectúa en el condensador (Fig. 4.12). La condensación es un proceso inverso a la ebullición.

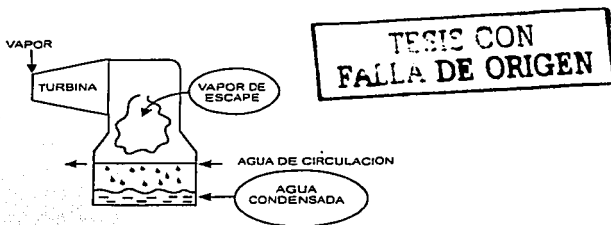


Fig. 4.12. Condensador.

El condensador es una gran cámara que se encuentra en la parte inferior del escape de la turbina. La cámara está atravesada por miles de tubos y en el interior de los tubos circula el agua necesaria para el enfriamiento de vapor.

El vapor al hacer contacto con los tubos fríos, se condensa formándose gotas que se precipitan a la parte inferior del condensador.

El agua de enfriamiento se conoce como 'agua de circulación' y la proporcionan las bombas de circulación de la torre de enfriamiento, pudiendo ser aguas negras tratadas, agua de alguna laguna o del mar. Se requieren grandes cantidades de agua de circulación. El agua de circulación sale con mayor temperatura y se envía a unas torres de enfriamiento o se desecha nuevamente a la laguna, o al mar, según corresponda.

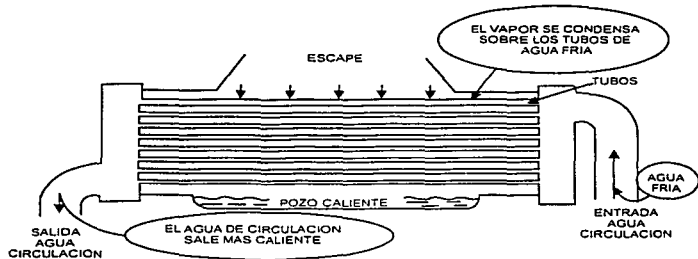


Fig.4.13 El condensador con los flujos de agua.

La condensación del vapor produce una presión negativa o de vacío dentro del condensador (presión inferior a la atmosférica). Fig. 4.14.

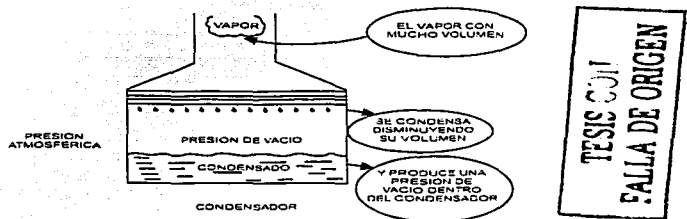


Fig. 4.14. Vacío en el condensador.



Capítulo 5

El generador de corriente alterna



5.1. Descripción.

1) *Generalidades.* El generador eléctrico es el equipo más importante de las centrales termoelectricas a vapor, ya que transforman la energía mecánica que recibe de la turbina, en energía eléctrica que entrega a la subestación, como lo ilustra la figura 5.1.

Todo el equipo de las centrales tienen como objeto lograr la correcta operación del generador, puesto que es quien genera la energía eléctrica, que es la razón de la existencia de las centrales generadoras de la electricidad.

La turbina al recibir el impulso de vapor, hace girar al rotor del generador, por lo cual se dice que le entrega su energía mecánica. El excitador es un generador de corriente alterna (C.A.), esta corriente al pasar a través de rectificadores, se convierte en corriente directa (C.D.), la que es alimentada al rotor del generador, para que se genere la energía eléctrica.

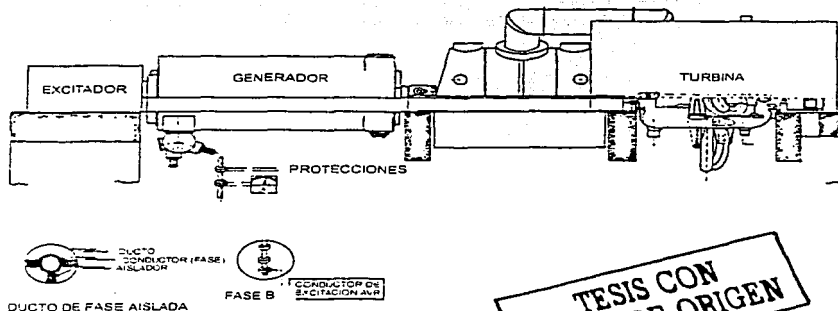
Esa energía así generada, es de corriente alterna, con una frecuencia eléctrica de 60 Hertz (ciclos por segundo), con una tensión eléctrica hasta de 20,000 volts, y una potencia real de 300,000 kw debido a que este generador produce corriente alterna que se le llama también alternador. La turbina por razones de eficiencia debe girar a elevadas velocidades. Por lo cual en esta central termoelectrica gira a 3,600 rpm y se acopla directamente al alternador.



El alternador consta básicamente de un estator y de un rotor como se ilustra en la figura 5.2.

2) *El estator.* Se compone de las piezas carentes de movimiento, entre ellas tenemos un circuito magnético, formado por un conjunto de láminas de fierro al silicio, en forma circular y aislada una de las otras para minimizar a las corrientes de Foucault.

En su parte interior, este núcleo está ranurado de manera uniforme para alojar en esas ranuras las bobinas del estator.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.1 El turbogenerador.

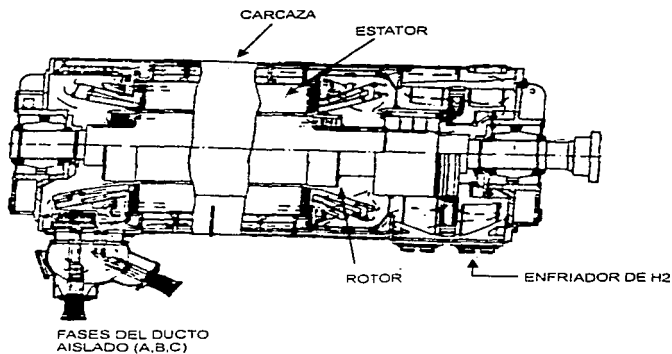


Fig. 5.2 El alternador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

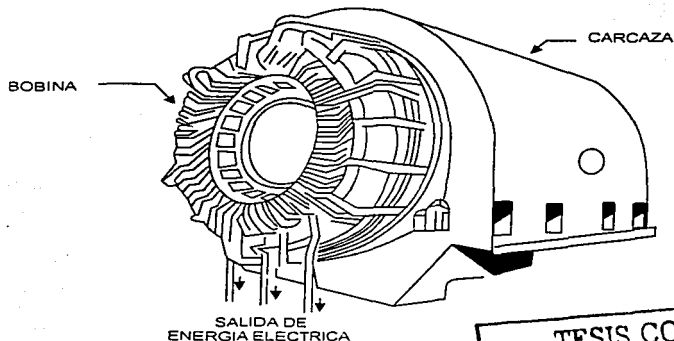


Fig. 5.3 El estator.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esas bobinas son de cobre en forma de solera de bastante calibre para alternadores de gran capacidad, estas bobinas están aisladas entre sí y con respecto al núcleo nominal. Por muy diferentes materiales, tales como papel pescado, tela cambray, tela de lino, baquelita, epoxy, fibra de vidrio, etc.

Las bobinas están colocadas en las ranuras del núcleo y este a su vez está apoyado en el interior de la carcasa.

De las bobinas del estator, salen las puntas que conducen la energía eléctrica al exterior del alternador, como lo ilustra la figura 5.3.



3) El rotor. Esta formado por un núcleo laminado de forma cilíndrica, apoyado en la flecha y ranurado longitudinalmente, para alojar en dichas ranuras a las bobinas del rotor, como se muestra en la figura 5.4.

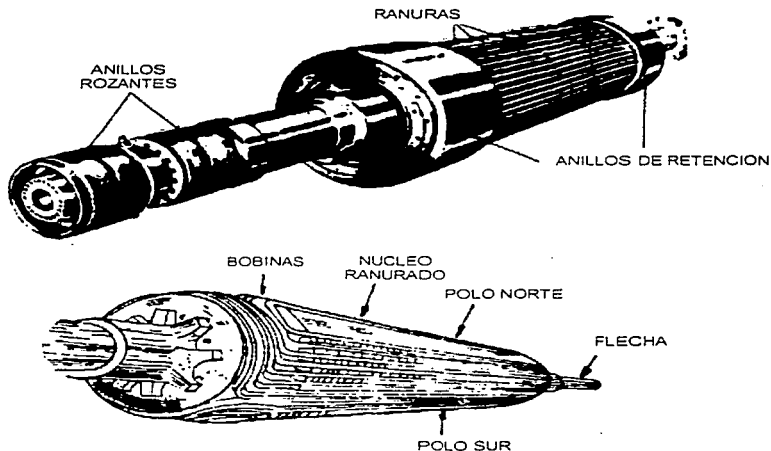


Fig. 5.4 El rotor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las bobinas del rotor están conectadas de manera que al recibir la corriente directa que les alimenta el excitador forman dos polos magnéticos, un polo norte y un polo sur. Hay generadores de menor capacidad como 500 Kw., cuyo rotor tiene cuatro polos norte-sur-norte-sur.

La gran mayoría de los excitadores tienen una salida de corriente directa en su estator, por ello para alimentar el rotor del alternador, se usan un par de "anillos rozantes" como se muestra en la figura 5.5.

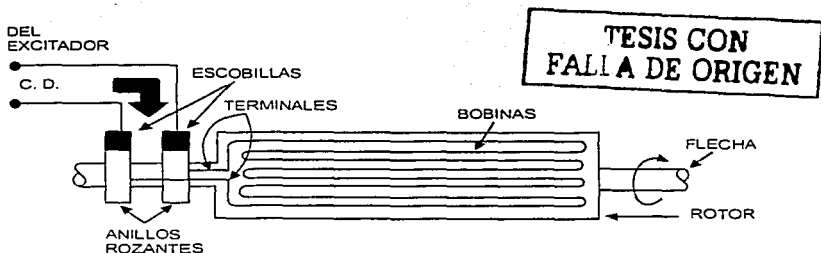


Fig. 5.5 Anillos rozantes.

De esta manera aun cuando gira el rotor a 3,600 r.p.m., la alimentación de C.D. a las bobinas del rotor será efectiva (ese es el caso de la unidad No. 5).



Los turbogeneradores de esta central son de 300,000 kw. con salida de corriente directa del excitador (al pasar por rectificadores, montados en su estator), por ello no se usan anillos ni escobillas, efectuándose la alimentación por el interior de la flecha, como se aprecia en la Figura 5.6 (a excepción de la unidad No. 5).

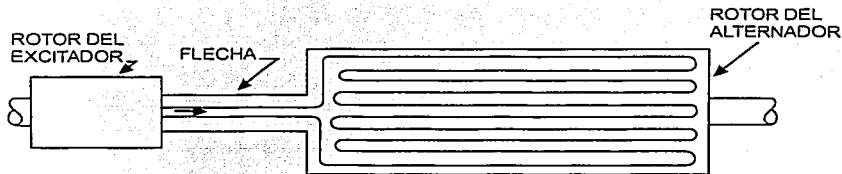


Fig. 5.6 Rotor sin anillos ni escobillas.

En estas condiciones no hay chisporroteos ni problemas de mantenimiento de anillos ni escobillas.

TESIS CON
...A DE ORIGEN



5.2. Funcionamiento del alternador.

5.2.1. Inducción electromagnética.

Se debe recordar lo siguiente:

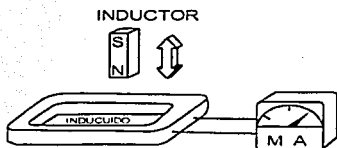
- a) El campo magnético variable al cortar los conductores de una bobina, induce en ella una tensión eléctrica, llamada fuerza electromotriz (FEM).
- b) El elemento que produce el campo magnético variable, se llama inductor.
- c) La bobina donde se induce la tensión se llama inducido.
- d) El campo magnético variable induce corriente alterna.
- e) La tensión inducida aumenta, al aumentar la intensidad del campo magnético y este aumenta con la intensidad de corriente que lo produce.
- f) La tensión inducida aumenta, aumentando la rapidez de variación del campo magnético inductor.
- g) La tensión inducida aumenta, al aumentar la cantidad de vueltas de la bobina del inducido.

5.2.2. El alternador monofásico.

5.2.2.1. Generación de un ciclo eléctrico.



Se sabe que el imán permanente proporciona un campo magnético constante que es incapaz de inducir corriente alguna, por ello (Fig.5.7), es necesario moverlo para que en la bobina cruce un campo magnético variable que si induce una corriente alterna (C.A).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.7 El campo magnético variable induce C.A.

El miliamperímetro, indica que el movimiento alternativo de su aguja, que el sentido de la corriente inducida esta cambiando, por lo cual se trata de la corriente alterna.

El imán permanente esta actuando como inductor y tiene la desventaja de no poder variar "la Intensidad de su campo magnético" por lo cual será sustituido por el electroimán alimentado con corriente directa el cual producirá un campo magnético, constante idéntico al imán.



En la figura 5.8 el electroimán es el rotor del alternador monofásico que proporciona el campo magnético variable requerido para la inducción. Para simplificar en la ilustración se omiten los anillos rozantes y las escobillas necesarias para alimentar el rotor.

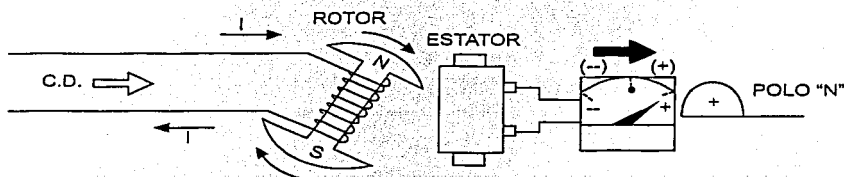


Fig. 5.8 Inducción debida al polo norte.

Al pasar el polo norte del rotor frente a la bobina del estator, se induce en la bobina una corriente en sentido (+), la aguja del miliamperímetro se mueve de cero a máximo (+) y regresa a cero, indicando que se ha llevado a cabo el medio ciclo (+).

Al pasar el polo sur, frente a la bobina del estator (Figura 5.9), en ella se induce una corriente en sentido (-).

CON
FOLIA DE ORIGEN

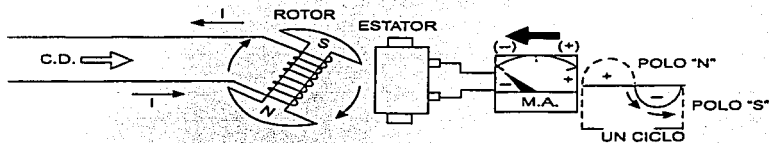


Fig. 5.9 Inducción debido al polo sur.

La aguja del miliamperímetro se mueve de cero a máximo (-) y regresa a cero, indicando que se ha llevado a cabo otro medio ciclo pero ahora (-) de esta manera.

El rotor de dos polos magnéticos, al dar una vuelta completa produce un ciclo eléctrico.

5.2.2.2 Frecuencia eléctrica generada.

- a) Efectos de la velocidad del rotor.

Si el rotor de dos polos, gira a razón de una vuelta por cada segundo tendremos una frecuencia de un ciclo por segundo.

En cambio si lo hacemos girar a sesenta vueltas por segundo tendremos una frecuencia de 60 ciclos por segundo (60 hz.).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Cuando el rotor gira 60 vueltas en un segundo, en 60 segundos que tiene un minuto alcanzará a dar 60 veces más vueltas que en un segundo.

O sea $60 \times 60 = 3,600$ vueltas por minuto; como una vuelta es lo mismo que una revolución, será lo mismo decir 3,600 r.p.m.

En conclusión el rotor de dos polos debe girar a 60 vueltas por segundo, equivalente a 3,600 rpm, para producir la frecuencia de 60hz.

El rotor de dos polos cuando gira 25 vueltas por segundo, produce una frecuencia de 25 ciclos por segundo; pero 25 vueltas por segundo equivalen a $25 \times 60 = 1,500$ r.p.m. por lo tanto el rotor debe girar a 1,500 r.p.m. para generar 25 hz.

Los datos anteriores ponen en evidencia que la frecuencia eléctrica depende de la velocidad de rotación del rotor, ya que con 1,500 r.p.m., la frecuencia es de 25 hz. y con 3,600 r.p.m. es de 60 hz. o sea que...

A mayor velocidad de rotación del rotor, la frecuencia eléctrica es mayor también.

b) Efecto del número de polos del rotor.



Veamos ahora como podemos cambiar la cantidad de los polos magnéticos, en el rotor del alternador. Recordemos que el sentido de la corriente directa en las bobinas, determina la ubicación de sus polos Norte-Sur.

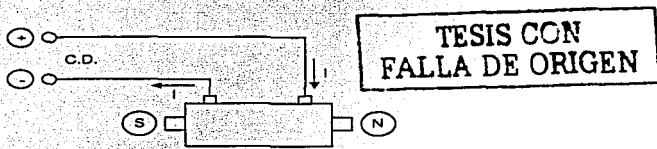


Fig. 5.10 Los polos dependen de la forma de alimentación.

La regla que tendremos presente, indica que el lado por donde entra la corriente, crea un polo norte y por donde sale crea un punto sur (Fig. 5.10).

Con las cuatro bobinas del rotor mostrado en la figura 5.11, se pueden obtener dos o cuatro polos, de acuerdo con la conexión que se haga con ellas.

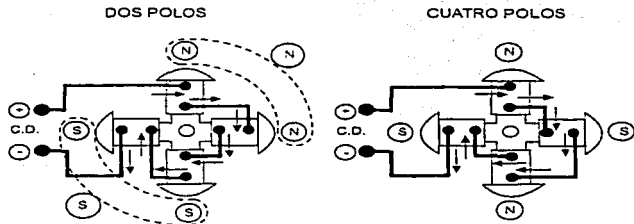


Fig. 5.11 Polos del rotor.



Se recomienda analizar con detenimiento estas conexiones.

El rotor de cuatro polos al dar una vuelta completa produce ahora dos ciclos, como se ve en la figura 5.12.

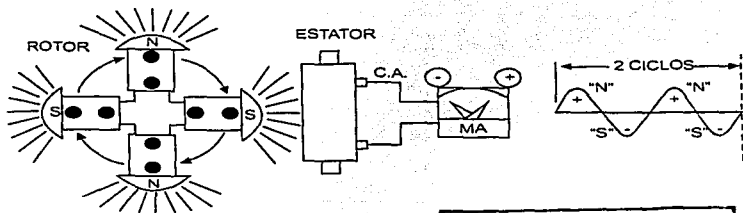


Fig. 5.12 Rotor de cuatro polos.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En este caso al dar una vuelta el rotor, habrán pasado frente a la turbina del estator, los cuatro polos y cada polo genera medio ciclo de manera que en una vuelta corresponde a dos ciclos.

Este rotor de cuatro polos al girar a 30 vueltas por segundo (1,800 r.p.m.), genera una frecuencia de 60 ciclos por segundo, puesto que cada vuelta genera dos ciclos. En cambio el rotor de dos polos al girar a la misma velocidad de 30 vueltas por segundo (1,800 r.p.m.) solamente genera una frecuencia de 30 ciclos por segundo puesto que cada vuelta genera un ciclo. Veamos entonces que para



una misma velocidad (1,800 r.p.m.) con dos polos se generan 30 c.p.s. y con cuatro polos se generan 60 c.p.s., o sea:

Para una misma velocidad del rotor a mayor cantidad de polos se genera, mayor frecuencia eléctrica.

Por un lado hemos visto que al aumentar la velocidad del rotor, la frecuencia eléctrica aumenta y por otra parte hemos constatado que a mayor cantidad de polos del rotor se tiene mayor frecuencia eléctrica. Esto quiere decir que la frecuencia eléctrica (f) generada, es directamente proporcional a la velocidad del rotor (r.p.m.) y la cantidad de polos (p) como lo indica la fórmula siguiente:

$$f = \frac{\text{RPM} \times P}{120}$$

Usando esta fórmula, se obtiene la frecuencia (f) para diferentes velocidades del rotor y números de polos (p), en la tabla siguiente:



VELOCIDAD DEL ROTOR (RPM)				
c.p.s.	2 polos	4 polos	8 polos	16 polos
25	1,500	750	375	187.5
30	1,800	900	450	225
50	3,000	1,500	750	375
60	3,600	1,800	900	450

Observación. Para fines prácticos de operación de generadores, se debe pensar que el rotor de un alternador ya tiene de fábrica su cantidad de polos y que no es sencillo ni tampoco deseable cambiar. Por tal motivo se debe precisar que la frecuencia eléctrica generada, depende de la velocidad de rotación del rotor y que a mayor velocidad de rotación del rotor, mayor frecuencia generada se tendrá.

Como se sabe, las turbinas de vapor son eficientes a alta velocidad y con ella hacen girar el rotor del alternador, por ello es característico que los rotores de los alternadores de centrales termoelectricas a vapor, tengan dos polos, ya que de esa manera deben girar a alta velocidad (3,600 r.p.m.) para generar la frecuencia de 60 Hertz.

5.2.2.3 Tensión eléctrica generada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a) Efecto de la corriente de excitación.



En el alternador monofásico se conecta un voltímetro a la bobina del estator para medir la tensión eléctrica generada (F_{em}), en dicho estator, además se pone un rotor de dos polos alimentado por una corriente directa de excitación, a través de un reóstato de campo (70) para regular la corriente de excitación, un amperímetro para medir esa corriente de excitación y un Interruptor llamado quebradora de campo (41) como se ilustra en la figura 5.13.

En este alternador se tiene un circuito de corriente directa, llamado de excitación y además se tiene otro circuito de corriente alterna, llamado de producción.

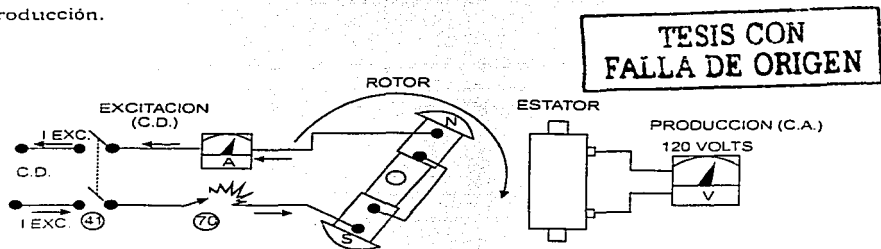


Fig. 5.13 Influencia de la excitación.

Inicialmente el interruptor de campo (41) debe estar abierto y el reóstato (70), debe estar en su posición de máxima resistencia, una vez que el rotor alcanza su velocidad de 3600 rpm, el interruptor (41) es cerrado y se procede a excitar gradualmente al rotor, disminuyendo el reóstato (70), hasta alcanzar un



ampere de intensidad de corriente de excitación, en cuyas condiciones el voltímetro indica una tensión inducida a 120 volts, en este ejemplo.

En el proceso de excitación se observa que:

Al aumentar la corriente de excitación en el rotor, la tensión generada también aumenta.

Esto se debe a que un aumento de corriente de excitación, aumenta la intensidad del campo magnético del rotor.

b) Efecto de la velocidad del rotor.

En los turbogeneradores la velocidad de rotación depende del vapor que entra a la turbina; ese vapor se regula mediante válvulas controladoras actuadas por un mecanismo regulador de velocidad (65) el cual abre más las válvulas para aumentar la velocidad y las cierra para disminuir la velocidad de la turbina y del rotor del alternador.

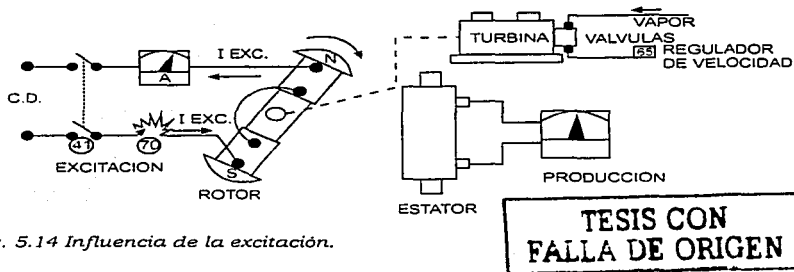


Fig. 5.14 Influencia de la excitación.

Si el alternador de la figura 5.14 opera con 1,000 r.p.m. Por ejemplo, se excita de manera que produzca una tensión generada de 100 volts y luego se le incrementa velocidad desde 1,000 r.p.m. hasta 2,000 r.p.m. Observándose que aún cuando no es aumentada la corriente de excitación, la tensión generada aumenta.

Lo anterior es posible debido a que al incrementar la velocidad del rotor, es aumentada la rapidez de variación del campo magnético inductor y se sabe que cuando esto sucede aumenta la tensión eléctrica generada (inducida), por tal motivo se concluye que:

Al aumentar la velocidad de rotación del rotor del alternador, la tensión generada en el estator, también aumenta.

c) Efecto de las espiras del rotor.



Se sabe que al aumentar las espiras (vueltas), en una bobina, la intensidad de campo magnético también aumenta.

Si se aumentan las espiras de las bobinas del rotor, conservando constante la corriente de excitación, la intensidad del campo magnético del rotor aumentará y con ello también aumentará la tensión generada. Por lo anterior se concluye:

Al aumentar las espiras del rotor del alternador, la tensión generada en el estator también aumenta.

d) Efecto de las espiras del estator.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El alternador con rotor de dos polos, aparece en la figura 5.15, de manera simplificada con una sola bobina en el estator.

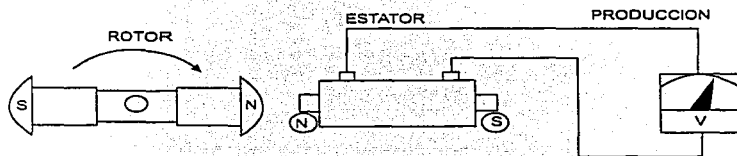


Fig. 5.15 Estator con una bobina, rotor de dos polos.



Se observa que el polo norte del rotor, induce un polo norte en el estator, lo cual es una regla en la inducción magnética.

Aumentando ahora otra bobina en el estator, pero ubicada diametralmente opuesta a la primera, se logra el mejor aprovechamiento del campo magnético (Fig. 5.16).

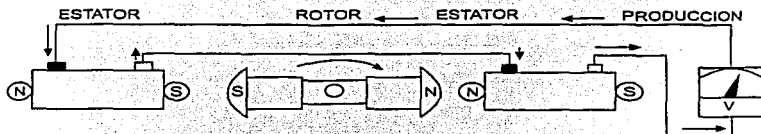


Fig.5.16 Estator con dos bobinas, rotor con dos polos.

Considerando que un polo norte debe inducir en el estator un polo norte y que un polo sur debe inducir un sur, las conexiones de las bobinas del estator deben practicarse como se ilustra en las figura 5.16 para que no se contrapongan y se anulen los polos magnéticos inducidos por el rotor, con los polos que produce la corriente generada en el estator. Obsérvese que se ha respetado la regla de que por donde entra la corriente a la bobina, crea un polo norte por donde sale crea un polo sur.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las mismas dos bobinas del estator deben conectarse de manera diferente, si el rotor es de 4 polos, como se ilustra en la figura 5.17.

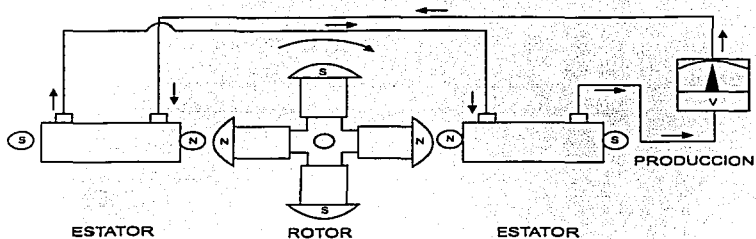


Fig. 5.17 Estator con dos bobinas, rotor con 4 polos.

De no hacerse las conexiones mostradas, el campo magnético del rotor se verá neutralizado por el campo magnético de la corriente inducida en el estator y el resultado será que no habrá producción.

En ambos casos, con rotor de dos polos (Fig. 5.16), o con rotor de 4 polos (Fig.5.17), al aumentar las espiras del estator aumentará la tensión generada; esto se debe a que una misma intensidad de campo magnético del rotor, contará una mayor cantidad de espirales, induciendo una tensión por cada espira cortada, sumándose cada tensión y resultado una mayor tensión. En resumen, se tiene que...

Al aumentar las espiras de las bobinas del estator, la tensión generada en el mismo estator, es mayor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**Observaciones.**

Se ha visto que la tensión generada en el estator de un alternador se puede aumentar en las formas siguientes:

- a) Aumentando la corriente de excitación. Que es la solución práctica, de operación.
- b) Aumentando la velocidad del rotor. No es práctica por alterarse la frecuencia eléctrica.
- c) Aumentando las espiras del rotor. Es solución de diseño.
- d) Aumentando las espiras del estator. Es solución de diseño.

Por tal motivo, para fines prácticos de operación.

La tensión generada, se regula con la excitación.

5.2.2.4. Potencia eléctrica generada.

Fijada la tensión eléctrica que el alternador puede generar, la corriente que salga del estator va a depender de la cantidad de aparatos eléctricos que tenga que alimentar el generador, pero el límite de la intensidad de corriente que puede alimentar el generador lo marcará la temperatura de las bobinas del estator, ya que la corriente elevará la temperatura de las bobinas del estator, ya que la



corriente calentará esas bobinas de acuerdo con la intensidad que solicita la carga.

Habiéndose fijado la intensidad de corriente máxima que el alternador puede entregar sin calentar peligrosamente a las bobinas del estator (no más de 85° C), esa será su corriente nominal, ó sea su corriente de plena carga.

La potencia eléctrica (P.A.) del alternador será el producto de la tensión nominal (V.N.) por la corriente nominal (I.N.) expresado en voltamperes (V.A.) o en kilovoltamperes (KVA) o sea:

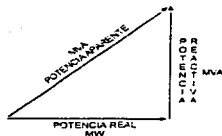
$$P_A = V_N \times I_N$$

Alternador monofásico

$$P_A = 1.732 V_N \times I_N$$

Alternador trifásico

$$\sqrt{3} = 1.732$$



La potencia real (P.R.), del alternador, que es la parte de la energía real efectivamente se aprovecha en los aparatos eléctricos (cargas), se expresa en watts (w), en kilowatts (KW) o en megawatts (MW), se emplea el wattmetro para medirla.

Los alternadores más grandes y modernos usados en la C.F.E., son de una potencia real de 300 MW, con una tensión nominal de 20,000 volts y una intensidad de corriente nominal del orden de 9,800 amperes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Para que un alternador pueda entregar mayor corriente, con su tensión nominal, y sin calentarse anormalmente, será necesario que las bobinas de su estator, sean construidas de conductores de cobre con calibre más grueso, puesto que los conductores de mayor calibre tienen mayor capacidad de conducción de la corriente.

El mismo efecto se tiene si se ponen más bobinas conectadas en paralelo, como se indica en la figura 5.18, para un alternador con rotor de 4 polos.

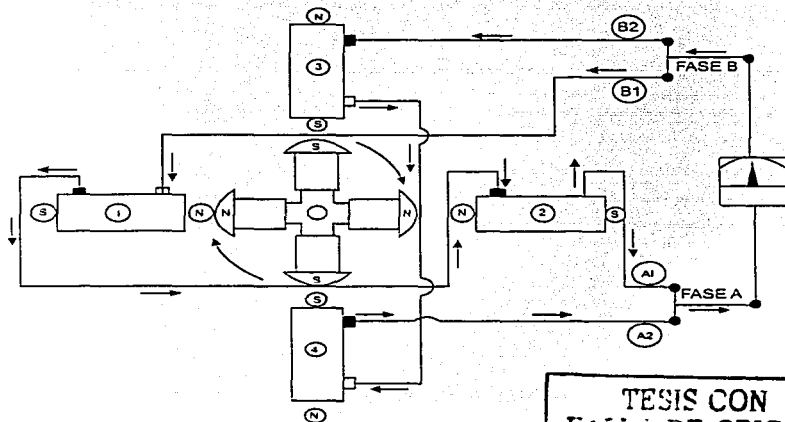


Fig. 5.18 Estator con cuatro bobinas, rotor con cuatro polos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- 1) Se nota en los extremos de las 4 bobinas del estator, los polos "norte y sur", que el rotor debe inducir en el estator.
- 2) Se conectan las bobinas (1) y (2), de manera que al circular la corriente en el estator, no neutralice los polos inducidos por el rotor señalado en el circuito de producción de salida (A1), y un regreso (B1), de la corriente alterna generada en el estator. Recuérdese que las bobinas (1) y (2) deben conectarse en serie entre sí.
- 3) Se conectan las bobinas (3) y (4) de manera similar a las (1) y (2), marcando una salida (A2) y un regreso (B2), de la corriente del estator.
- 4) Finalmente se conectan las dos salidas (A1) y (A2), para formar la fase.
(A) del generador, así como los regresos (B1) y (B2), para formar la fase.
(B) del mismo generador.

Con los dos grupos de bobinas así conectados (Fig. 5.18), se tienen dos circuitos independientes de la misma capacidad, que al conectarlos en paralelo, suministra el doble de corriente y por consecuencia se tendrá el doble de potencia.

Observaciones:

La potencia de un alternador será mayor, cuanto mayor calibre tenga el conductor usado en las bobinas de su estator.



El alternador monofásico tiene en su estator una bobina o varias en serie para elevar su tensión generada, o también varias bobinas en paralelo para aumentar su potencia.

5.2.3 El alternador trifásico.

5.2.3.1. *Desfasamiento de la intensidad de corriente.*

La diferencia entre un alternador trifásico y uno monofásico radica únicamente en su estator, ya que su rotor puede ser el mismo en ambos casos.

El estator del alternador monofásico tiene fundamentalmente una bobina bien distribuida para envolver al rotor y así aprovechar su campo magnético; en cambio el estator del alternador trifásico tiene tres bobinas igualmente distribuidas, para facilitar su comprensión se ubican en la figura 5.19. estas tres bobinas, concentradas en tres puntos.

El núcleo del estator, aprovecha mejor el campo magnético del estator.

Las bobinas (1), (2) y (3) del estator están colocadas a 120° una de otra, de tal manera que el polo norte del rotor pasa primero frente a la bobina (1), después tiene que girar 120° para llegar frente a la bobina (2) y finalmente debe girar otros 120° para llegar frente a la bobina (3).

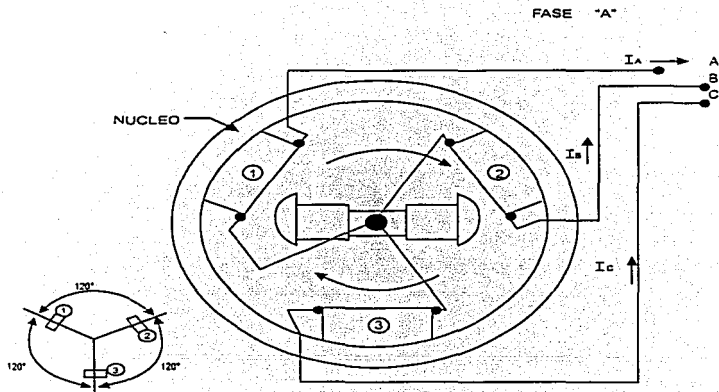


Fig. 5.19 El alternador trifásico.

Por otra parte se ve (Fig. 5.19) que de la bobina (1) sale la fase "A", de la bobina (2) sale la fase "B" y de la bobina (3) sale la fase "C", las 3 puntas restantes de las bobinas se interconectan para formar el neutro que no está conectado para simplificar.

Al cortar las líneas de la fuerza del campo magnético del polo norte del rotor a las espiras de la bobina (1), se induce tensión que impulsa a los electrones a moverse, formándose la intensidad de corriente (I_A) de la fase A.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Un instante después, el polo norte del rotor, llegará frente a la bobina (2) para dar la orden de salida a los electrones que forman la intensidad de la corriente (IB) de la fase "B", esta corriente ya sale con un atraso o desfase de 120° respecto a la corriente de la fase "A" (IA).

Otro instante más tarde, el mismo polo norte del rotor, llegará frente a la bobina (3) para dar la orden de "salida" a los electrones que forman la intensidad de la corriente (IC) de la fase "C", la corriente (IC) empezó a circular de un retraso de 120° respecto a la (IB) y con un desfase de 240° respecto a la (IA).

De la manera anterior, se generan a las corrientes trifásicas desfasadas 120° una de otra, debido a la imposibilidad de que los polos magnéticos inductores estén simultáneamente frente a cada una de las tres bobinas del estator.

Para identificar cuáles son las fases "A", "B" y "C", se utilizan dos lámparas y una bobina conectadas en estrella, como se ilustra en la figura 5.20. Al principio se conectarán indistintamente y se irán intercambiando hasta identificar las fases.

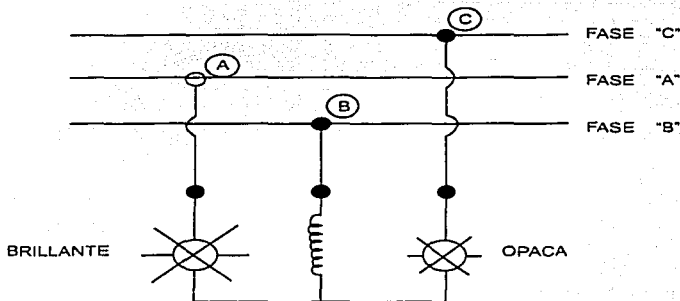


Fig. 5.20 Identificación de las fases.

La punta de la bobina siempre será la fase "B", la punta de la lámpara brillante será la fase "A" y la otra punta será la fase "C". De esta forma en el circuito (Fig. 5.20), la fase "C", resulta ser la superior, la fase "A" del centro y la fase "B" la de abajo.

5.2.3.2. La tensión de la línea y la tensión de fase.

Al generar el alternador su tensión nominal, se tendrán las tensiones eléctricas de línea (entre fases y neutros), como se aprecia en la figura 5.21.

**TFESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Ejemplo:

Para un caso específico las tensiones medidas son:

$$V_{AB}=220 \text{ volts.}$$

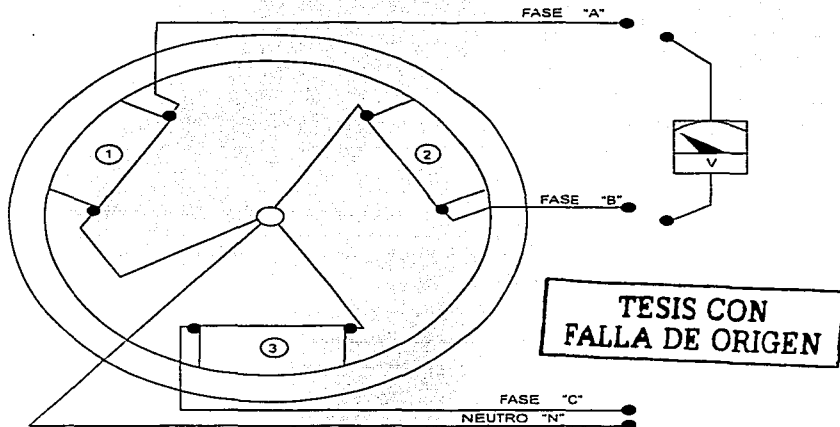
$$V_{BC}=220 \text{ volts.}$$

$$V_{CA}=220 \text{ volts.}$$

$$V_{AB}=127 \text{ volts.}$$

$$V_{BN}=127 \text{ volts.}$$

$$V_{CN}=127 \text{ volts.}$$



Se puede constatar que:

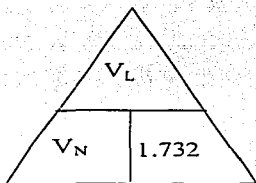
$$220 = 127 \times 1.732$$

Como 220 es la tensión de línea (V_L) y 127 es la tensión de fase (V_N) se tiene el triángulo siguiente:



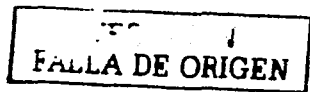
$$V_L = V_N \times 1.732$$

$$V_N = \frac{V_L}{1.732}$$



5.3. Principios de operación del alternador.

5.3.1. Generalidades.



Los fundamentos de operación de los alternadores son los mismos para un alternador trifásico como para un monofásico; por esta razón nos referimos exclusivamente al alternador trifásico ilustrado en la figura 5.22., donde se ha omitido el neutro del estator y las escobillas del rotor, para evitar complicaciones del dibujo.

El circuito de excitación es de 60 volts de corriente directa y 1 ampere de intensidad de corriente, cuenta con su interruptor de campo (41), que aparece



abierto; con su reóstato de campo (70), que aparece en su posición de máxima resistencia; y también con su amperímetro de corriente directa, para vigilar la intensidad de corriente de excitación.

El alternador trifásico (Fig.5.22), tiene una potencia de 1,000w (1 Kw), su corriente nominal es de 5 amperes, su tensión nominal es de 220 volts de corriente alterna, genera una frecuencia de 60 ciclos por segundo.

El circuito de producción que sale del alternador, cuenta con un voltímetro conectado en paralelo, para indicar la tensión generada entre fases (de línea), cuyo valor nominal es de 220 volts; cuenta con un frecuencímetro conectado en paralelo para medir la frecuencia generada en Hertz o sea ciclos por segundo, cuyo valor nominal es de 60 Hz; cuenta también con un amperímetro de corriente alterna en cada una de las tres fases para medir la intensidad de corriente (IA), (IB) e (IC) que el alternador entrega.

Nota. Los números 41, 52, 65, 70, 90, etc., corresponden a las normas ASA para relevadores, se omite el neutro del estator y las escobillas del rotor por facilidad de dibujo.

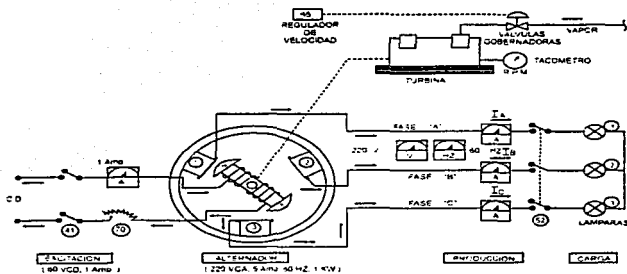


Fig. 5.22 Operación del alternador trifásico.

La carga está representada por las tres lámparas incandescentes (1), (2) y (3); además se dispone de un interruptor (52) trifásico para conectar, y desconectar, esa carga.

La turbina, acoplada al motor del alternador para impulsarlo recibe el vapor a través de las válvulas gobernadoras que controlan el paso del vapor de acuerdo con las órdenes que reciben del regulador de velocidad (65), para mantener la velocidad de 3,600 r.p.m. indicada en el tacómetro.



5.3.2. Puesta en servicio del alternador.

1. Asegure que el interruptor de campo (41) está abierto y que el reóstato (70) se encuentra en su posición de máxima resistencia.
2. Confirme que el interruptor (52) está abierto.
3. Alimente vapor a la turbina, siguiendo las instrucciones de rodado para el caso, para alcanzar 3,600 r.p.m. que indicará el tacómetro de la turbina.
4. Cierre el interruptor del campo (41).
5. Gire lentamente el reóstato (70) hacia la derecha, con lo cual la corriente de excitación aumenta y es indicada en el amperímetro.
6. Continúe incrementando la excitación hasta que se obtenga la tensión generada de 220 volts.
7. Ajuste la velocidad de rotación del rotor hasta que se obtenga 60 Hz. en el frecuencímetro.
8. Teniendo en el circuito de producción los 220 volts y 60 Hz., el alternador ha quedado listo para tomar carga, ya que ahora está trabajando en vacío y los amperímetros de las fases indican cero.

5.3.3. Efecto de la excitación.

Al aumentar la corriente de excitación al rotor, la intensidad del campo magnético también aumenta y con ello aumenta la tensión generada.



Al aumentar la intensidad del campo magnético en el rotor tiene mayor dificultad para girar, puesto que aumenta la fuerza de atracción con el fierro del núcleo laminado, que esta fijo; por ello tiende a frenar al rotor, cuya velocidad se reduce y en consecuencia la frecuencia disminuye.

Por lo anterior se observa que...

Al incrementar la excitación del rotor, la tensión generada aumenta y la frecuencia disminuye.

5.3.4. Efecto de la velocidad del rotor.

Al aumentar la velocidad del rotor, la cantidad de ciclos por segundo que generan los polos del rotor, aumenta y por ello se dice que la frecuencia aumenta.

También se incrementa la rapidez con la que corta el campo magnético a los conductores de las bobinas y por ello la tensión aumenta, por lo anterior...

Al incrementar la velocidad del rotor, la frecuencia y la tensión aumentan.



5.3.5. Efecto de la carga.

Al cerrar el interruptor (52) , de la figura 5.22, circulará la corriente desde las bobinas del estator a la carga; la corriente que circula por estas bobinas crean un campo magnético en el estator, que frena al campo magnético del rotor y al bajar la velocidad disminuye la frecuencia y también la tensión.

Por lo anterior, ante un aumento de carga, se tiene lo siguiente (según el ejemplo anterior):

- a) Una disminución de la tensión generada, que se compensa aumentando la corriente de excitación, con el reóstato (70).
- b) Una disminución de la frecuencia, que se compensa aumentando la velocidad a su valor normal, admitiendo más vapor a la turbina mediante mayor apertura de las válvulas gobernadoras.

En la práctica, debido a que las condiciones de carga cambian a cada instante, la tensión y la frecuencia, se regulan automáticamente.

La tensión se controla mediante el regulador automático de voltaje (90).

La frecuencia se controla mediante el regulador de velocidad (65).



Estos controles automáticos, junto con las buenas condiciones de operación del equipo de las centrales eléctricas, hacen posible un buen servicio, que consiste en:

- > Buena tensión.
- > Buena frecuencia.
- > Continuidad de servicio.
- > Costo razonable.

5.3.6. Sincronización.

La sincronización es la conexión de un generador a un sistema eléctrico, al cual ya están conectados otros generadores y los usuarios de la energía eléctrica, como se ilustra en la figura 5.23.

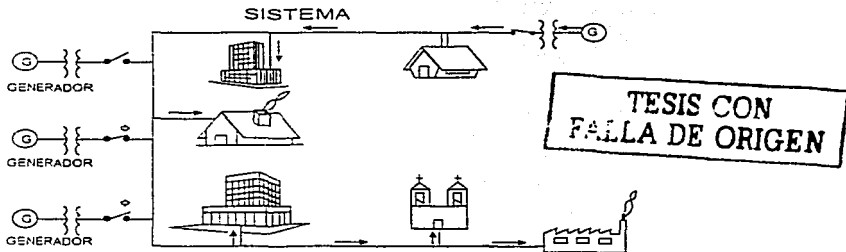


Fig. 5.23 El sistema eléctrico.



Para sincronizar un generador al sistema es necesario que se satisfagan las condiciones siguientes:

- a) Que la tensión del generador, sea igual a la tensión del sistema.
- b) Que la frecuencia del generador, sea igual a la frecuencia del sistema.
- c) Que el ángulo de la fase del generador, sea igual al ángulo de la fase del sistema.

5.3.6.1. Las tensiones deben ser iguales.

La primera condición para efectuar la sincronización, es tener la tensión del generador igual a la tensión del sistema.

Para conseguir que el generador iguale a la tensión del sistema se deberá actuar sobre la excitación del generador; para saber cuando se ha cumplido esta condición, es necesario usar un voltímetro para medir la tensión del generador y otro voltímetro para medir la tensión del sistema, conectados como se ve en las figuras 5.24, 5.25 y 5.34.

Los voltímetros son conectados a través de un transformador de potencial (T.P.) que reduce la tensión de 230 KV ó 400 KV a un valor de 120 V; pero esos 120V son proporcionales a la tensión real de la línea; por ello aunque los



voltímetros son alimentados con 120 volts su escala se gradúa directamente para indicar 230 KV ó 400 KV.

Los transformadores principales de este ejemplo, elevan la tensión desde 30 KV hasta 230 KV ó 400 KV:

Nota: Por simplicidad en los transformadores, no se presenta la conexión en primario (20 KV) y secundario (230 KV ó 400 KV).

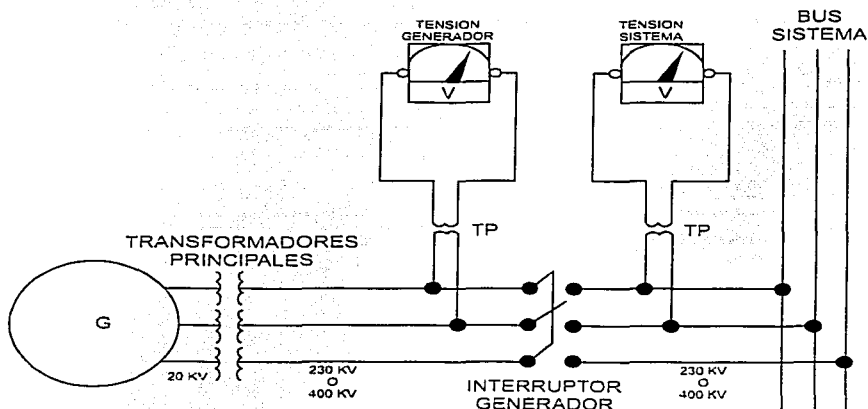


Fig. 5.24. Conexión de voltímetros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



5.3.6.2. Las frecuencias deben ser iguales.

La segunda condición para sincronizares hacer que la frecuencia del generador sea igual a la frecuencia del sistema.

Para conseguir lo anterior, se deberá actuar sobre la velocidad del generador para saber cuando se cumple esta condición, es necesario usar un frecuencimetro para medir la frecuencia del generador y otro para medir la frecuencia del sistema, conectados como lo ilustra la figura 5.25.

Nota: por simplicidad en los transformadores no presenta la conexión en primario (20 KV) y secundario (230 KV ó 400 KV).

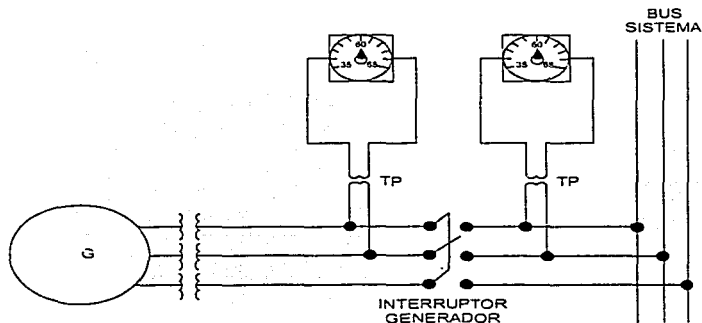


Fig. 5.25 Conexión del frecuencimetro.



Cuando se cumpla esta condición, será debido a que el generador estará produciendo 60 ciclos cada segundo (60Hz), igual que el sistema.

Para comprender mejor esta condición, podemos imaginar al sistema representado por un engrane y al generador representado también por un engrane; para que los dos engranes puedan acoplarse (sincronizarse), es necesario que ambos giren a la misma velocidad.

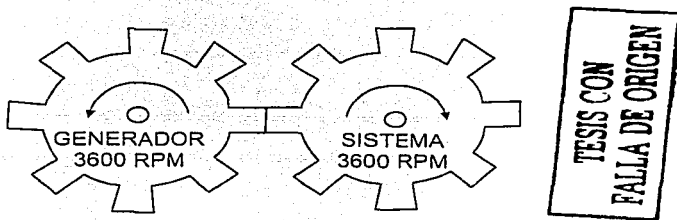


Fig. 5.26 Engranes con igual velocidad.

Se observa que a pesar de que los dos engranes giran a la velocidad de 3,600 r.p.m., no se pueden acoplar, debido a que los dientes topan entre sí. De manera idéntica, es posible que el generador no pudiese sincronizarse, a pesar de generar 60 Hz igual que el sistema. Para ello se debe satisfacer la tercera condición de sincronización.

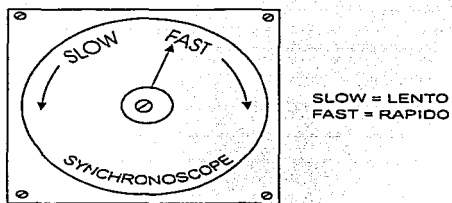


5.3.6.3. Los ángulos de fase, deben ser iguales.

La tercera y última condición para sincronizar, es lograr que el ángulo de las fases del generador, sea igual al ángulo de fase del sistema.

Para lograr lo anterior, es necesario efectuar sobre la velocidad del generador, a fin de hacer un ajuste fino.

El aparato que nos indica cuando se cumple esta tercera condición, es el sincronoscopio (Fig. 5.27).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 5.27 El sincronoscopio.

El sincronoscopio consta de dos bobinas, una se conecta al generador y otra al sistema, pero ambas a través de un transformador de potencial: de esta manera su aguja gira a una velocidad igual a la diferencia de frecuencia del sistema y el generador.



Este aparato hace girar su aguja hacia la derecha (\curvearrowright), o sea en el sentido de FAST (rápido), cuando el generador tiene una frecuencia mayor que la del sistema. Hace girar su aguja hacia la izquierda (\curvearrowleft), o sea en sentido SLOW (lento), cuando el generador produce una frecuencia menor que el sistema.

Cuando la aguja se detiene, significa que las frecuencias del generador y del sistema son exactamente iguales.

Cuando la aguja del sincronoscopio se detiene en "las 6" de un reloj imaginario, significa que las ondas de tensión eléctrica están desfasadas 180° , lo cual sería idéntico a tener los dientes de engranes a tope.

En este caso (Fig. 5.27) a pesar de tenerse tensiones iguales, frecuencias iguales, no se puede sincronizar el generador, en virtud de estar desfasado 180° , con ello sus tensiones están en posición, de manera semejante a los engranes que tienen dientes a tope y no se pueden acoplar.

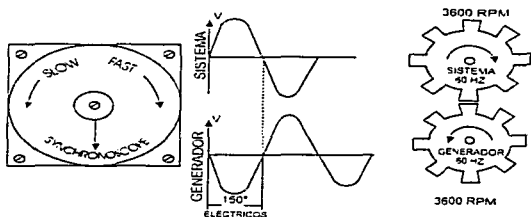


Fig. 5.27 Generador eléctrico desfasado 180° con el sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Cuando la aguja del sincronoscopio se detiene en "las 9" o en "las 3", significa que las ondas de tensión eléctrica, están defasadas 90° o 270° .

Nuevamente, las tensiones y las frecuencias son iguales, pero el generador esta desfasado 90° y por ello no se puede sincronizar todavía, de manera semejante a los engranes que tienen sus dientes parcialmente a tope y en consecuencia no se puede acoplar.

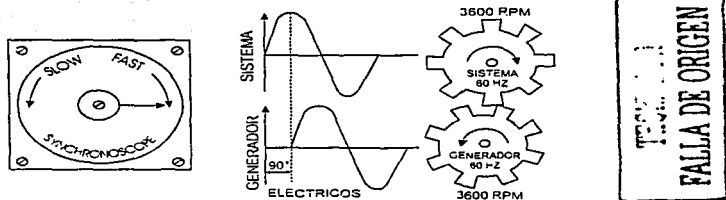


Fig. 5.28 Generador desfasado 90° con el sistema.

Cuando la aguja del sincronoscopio esta en "las 12", significa que las ondas de tensión, están en fase.

En este caso (Fig. 5.29), se cumplen las tres condiciones para la sincronización del generador con el sistema:



1. Igualdad de tensiones entre el generador y sistema.
2. Igualdad de frecuencias entre el generador y sistema.
3. Generador en fase con el sistema.

Por lo anterior, el generador podrá sincronizarse con el sistema, de igual manera como los dos engranes podrán acoplarse perfectamente. Es recomendable sincronizar a una frecuencia de 60.1 Hz. (1/10 arriba de la frecuencia del sistema) para evitar que se motorice el generador.

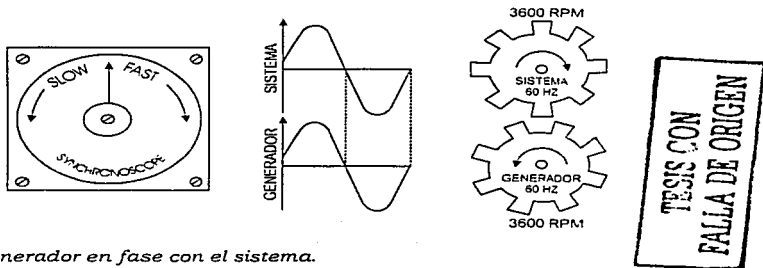


Fig. 5.29 Generador en fase con el sistema.

5.3.6.4. Sincronoscopio en lugar de lámparas.

Antiguamente se usaron lámparas incandescentes (focos), en lugar del sincronoscopio, que es más sensible y preciso que las lámparas. También se usa una combinación de sincronoscopio y lámparas, con las que se tiene una indicación de respaldo.



Esas lámparas se conectaban en serie, como lo ilustra la figura 5.30, en cuyo caso el momento de sincronización es indicado cuando las lámparas se apagan.

En la ilustración se considera al generador de 220 volts, 60 Hz. y al sistema con iguales características, por ello los transformadores de sistema de potencial, no son necesarios para conectar estos instrumentos, ni tampoco para las lámparas de sincronización que son 220 volts.

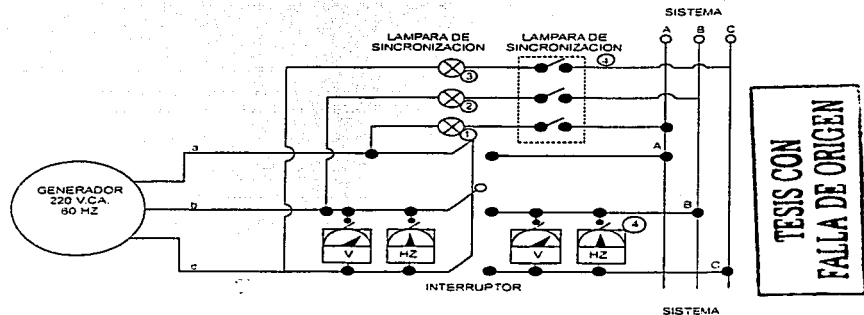


Fig. 5.30 Lámparas de sincronización.

La lámpara (1) es conectada entre la fase "a" del generador y la fase "A" del sistema; las lámparas (2) y (3) están conectadas de manera similar a las fases "B" y "C".



Las lámparas así conectadas, se apagarán y encenderán simultáneamente las tres, haciéndolo cada vez más lento, cuando más se acerca la frecuencia del sistema; cuando ya se tienen las tres condiciones de sincronización cumplidas, entonces las tres lámparas se apagan, este será el momento preciso de sincronizar, cerrando el interruptor del generador.

Considerando que las tensiones y frecuencias son iguales, las lámparas encenderán y apagarán juntas, por no estar en fase el generador con el sistema. La lámpara uno, se podrá imaginar conectada como en las figuras 5.31.

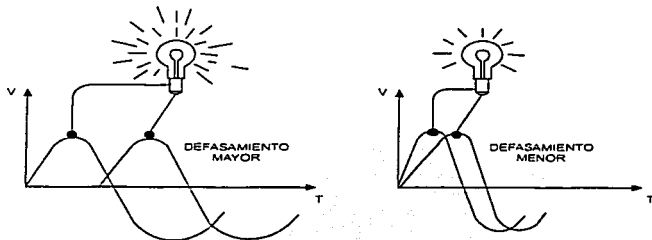


Fig. 5.31 Del desfase encienden las lámparas.

Se observa que con desfase mayor, la tensión que recibe la lámpara, es mayor e ilumina más; cuando el desfase es menor la iluminación, es

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



menor cuando el desfaseamiento sea nulo la tensión sea nula y la lámpara se apaga, es el momento de sincronizar.

Cuando las tres lámparas no se conectan fase "a" con fase "A", fase "b" con fase "B" fase "c" en con fase "C", se dice que no están faseadas; en este caso las tres lámparas encenderán y apagarán una después que otra, pero no simultáneamente, indicando la conexión errónea.

5.3.6.5 Tablero de sincronización.

En las centrales eléctricas es muy práctico tener los instrumentos antes mencionados en un tablero perfectamente visible para el operador, con objeto de facilitar la sincronización. Hay gran variedad de disposiciones de esos instrumentos; en la figura 5.32 se muestra una de ellas.

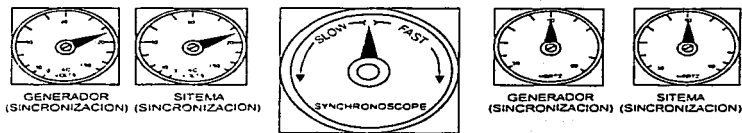


Fig. 5.32 Tablero de sincronización.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Las leyendas que aparecen en el pie de cada aparato, también son muy variadas, a continuaciones anotan algunos términos usados.

GENERADOR

Entrante
Entrada
Máquina
Unidad

SISTEMA

Circulante
Operación
Bus
Base

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Independientemente de la disposición de los instrumentos y leyendas usadas, se emplea una llave de sincronización, que tiene las funciones siguientes:

- a) Conectar los instrumentos de medición de la tensión, de la frecuencia y del ángulo de fase.
- b) Dar el permiso para cerrar el interruptor que sincronice el generador.

5.3.6.6. Maniobra de sincronización.

Ya teniendo la turbina girando a la velocidad normal, ejemplo; 3,600 r.p.m., se procederá de la manera siguiente:

- a) Cierre el interruptor de campo(41).
- b) Excite el generador, accionando el reóstato de campo (70), hasta alcanzar la tensión nominal del generador.
- c) Posicione el switch de control del AVR en el modo de "prueba".



- d) Ajuste el balance excitatriz mediante el 90R.
- e) Estando en cero el balance excitatriz posicione el switch de control de AVR en el modo "automático".
- f) Cierre la "llave de sincronización", la cual pone en servicio los instrumentos del tablero de sincronización.
- g) Ajuste la tensión del generador mediante el switch de control (90R), hasta que se iguale a la tensión del sistema.
- h) Corrija la velocidad de la turbina, hasta que la frecuencia del generador iguale la frecuencia del sistema.
- i) Ajuste la velocidad de la turbina, elevándola para hacer que la aguja del sincronoscopio gire hasta " FAST " (rápido), con lo cual la frecuencia del generador es ligeramente mayor que la del sistema.
- j) Afirme disminuyendo muy lentamente la velocidad de la turbina, haciendo que la aguja del sincronoscopio gire cada vez más lento y al pasar demasiado lento por la marca de "las 12", es el momento preciso de sincronizar, cerrando el interruptor del generador.
- k) Para tomar carga, aumente el flujo de vapor a la turbina, y el generador aumenta la corriente de excitación, debiéndose observar la intensidad de corriente que va entregando y también la potencia real en MW, que el generador va entregando.
- l) Demasiada corriente de excitación, calienta anormalmente al rotor, el límite son 90°C.



m) Demasiada corriente de carga, calienta anormalmente el estator, el límite máximo permitido son 85°C.

Nota: La temperatura tanto del rotor como del estator también depende de la carga reactiva que tenga el generador, por lo que existe una curva de capacidad, que según la carga que se tenga y la presión de H₂, se podrá tener una carga reactiva máxima tanto inductiva como capacitiva, (vea la figura 5.33).

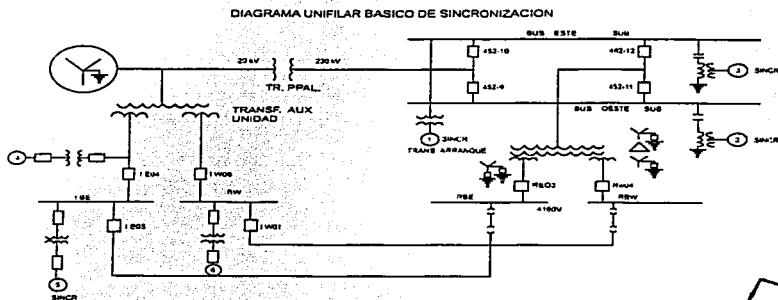


Fig. 5.34 Diagrama unifilar básico de sincronización.

Notas:

- Para cerrar interruptor 452-9 se compararán señales 1 y 2.
- Para cerrar interruptor 452-10 se compararán señales 1 y 3.
- Para cerrar Interruptor IEO4 se compararán señales 4 y 5.
- Para cerrar interruptor IW06 se compararán señales 4 y 6.

Las señales 1 y 4 son de máquina, las señales 2 y 3 son de sistema y las señales 5 y 6 antes de cambio de auxiliares también son del sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Capítulo 6

Control automático del generador de vapor



6.1. Descripción.

No es difícil evaluar la gran importancia que los sistemas de control automático tienen en los procesos industriales modernos. Diremos solamente que a través de ellos se logra el funcionamiento óptimo de sus sistemas, se mejora la cantidad de los productos, abaratando el costo de producción, y en general se libera al operador de infinidad de tareas repetitivas.

En términos generales diremos que un controlador automático es un instrumento que mide el valor de una condición variable de un proceso y que opera para corregir o limitar la desviación del valor medido con respecto a un valor prefijado (set-point). Tendremos por lo tanto que el control automático es la operación de llevar una o más variables a su punto óptimo de trabajo y mantiene todo el proceso ajustado a los valores prefijados cualquiera que sean los cambios que en este se produzcan.

6.2. Control automático de combustión.

La función del sistema de control de combustión es controlar la relación aire combustible de entrada (régimen térmico) al hogar, en la respuesta a un índice de carga que representa una demanda para un nivel de entrada de combustible. La



demanda para un régimen térmico es por lo tanto, una demanda de energía de entrada al sistema para igualar la energía retirada en algún punto en el incremento de flujo de vapor lo que incrementará la potencia eléctrica generada en una central de generación.

Para el sistema de control y operación de la caldera, las variaciones en la presión de salida son comúnmente usadas como índice de desbalance entre la entrada de energía (combustible) y la energía entregada (pérdida) por el vapor de salida.

Una gran variedad de sistemas de control de combustión han sido desarrollados a fin de cubrir las necesidades para aplicaciones en particular. Las demandas de carga, filosofía de operación, distribución de planta y tipos de encendido deben considerarse antes de que la última selección del sistema sea hecha.

En cualquier diseño es de suma importancia notar el funcionamiento del control de combustión a manera de poder interpretar como se ha de comportar en los cambios de carga del generador de vapor.

Un aumento en la carga origina que la presión baje, aumentará el flujo de agua de alimentación causará una caída en la temperatura del vapor y como resultado una caída de presión.



En la mayoría de las calderas se tiene que, un índice base para determinar las desviaciones entre el calor que entra y el que sale, lo constituye la presión, sin embargo algunas veces las calderas deberán responder a variaciones de carga muy rápidas o habrá transitorios que podrán desequilibrar las condiciones en estado establecido al tipo de demanda de vapor, deberán aumentarse o disminuirse sus relaciones de combustión muy continua y rápidamente. En estos casos el sistema deberá contar dentro de su lazo de control un sistema de base de dos o tres elementos para determinar las variaciones del balance de calor. El flujo de vapor es comúnmente usado para incorporar un sistema de dos elementos.

Un sistema más completo es cuando se implementa la demanda eléctrica del generador, el flujo y la presión de vapor para formar un sistema de control de 3 elementos.

El aspecto más importante o requisito de un control de combustión es proporcionar económicamente la relación de aire combustible para una eficiencia de combustión óptima. Una insuficiencia de suministro de aire dará resultado que el combustible suministrado no se queme completamente; un exceso de aire por lo contrario, aumentará las pérdidas a través de la chimenea innecesariamente, ocasionando una eficiencia total menor de la de diseño. Un exceso de aire requiere también mayor consumo de potencia para el ventilador, aumentando con esto la porción de energía de salida requerida para operar los auxiliares.



Lo critico de trabajar con un exceso de aire mayor al preestablecido originará la posibilidad de causar factores de mayor corrosión en los dos precalentadores de aire o en la chimenea.

Finalmente haremos notar que el propósito primordial del control de combustión es mantener constantemente la presión del vapor respondiendo en forma precisa a las variaciones de carga (demanda) del generador de vapor.

A continuación veremos mediante unos sistemas como se va complementando un sistema de control de combustión hasta llegar a los sistemas actuales que gobiernan esta parte del proceso en un generador de vapor.

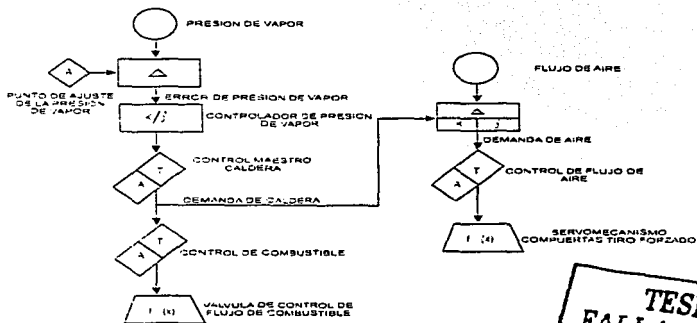


Fig. 6.1. Control de presión de vapor de un solo elemento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



En este caso el control operará posicionando tanto la apertura de la válvula de control de combustible así como la posición de las compuertas del ventilador del tiro forzado. Esta acción como consecuencia de un cambio en la presión de vapor el cual origina que se genere una señal de error al existir un cambio en la demanda. El control maestro recibe la señal procesada por el controlador de presión para incrementar o disminuir simultáneamente tanto la cantidad de aire como el combustible con el fin de satisfacer los requerimientos de la demanda; mientras exista error de presión el controlador de presión continuará integrando el aire y combustible hasta que la presión regrese a su punto de ajuste (set point).

El inconveniente en este caso sería que al existir cambios de carga rápidos el sistema no responde con la misma rapidez.

En la figura 6.2 aparece un esquema de lo que sería un sistema mejorado al control primario mostrado en la figura 6.1.

Aquí se elimina el inconveniente de una respuesta rápida a cambios rápidos en la demanda ya que se incluye otro elemento (flujo de vapor) el cual se dará cuenta cuando el sistema baja o sube la carga. Recordemos que el flujo de vapor es la carga del sistema.

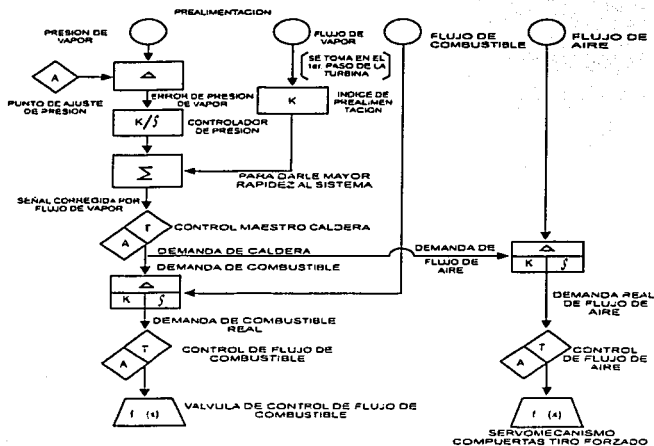


Tenemos como punto de partida condiciones estables en el sistema y supongamos que la carga sube. Al ocurrir esto el transmisor de flujo de vapor ve un incremento de este y aumenta su señal de salida.

Esta señal entrará al control modificando los respectivos aumentos en el aire combustible. Nótese que se está considerando una variación rápida en la demanda, en la cual la fase anticipativa es la que entra en funciones.

Como se mencionó anteriormente. El controlador de presión no ve inmediatamente este cambio sino hasta que la presión cambia respecto al punto de ajuste. Al abrir la válvula de combustible la presión que sufre un decremento en las proximidades posteriores a la variación en la demanda tiende a estabilizarse como respuesta a un mayor flujo de combustible.

Consideremos que la relación aire combustible tiende a mantenerse casi constante salvo por efecto de los transitorios generados por el cambio de carga; esto hace notar la presión primordial del control maestro como repartidor de señales de relación tanto como para el aire como para el combustible.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 6.2 Control de presión de vapor con tres elementos

6.3. Control automático de flujo de agua de alimentación.

El propósito del control de flujo de agua de alimentación a la caldera es regular la cantidad de agua al domo con el fin de mantener su nivel dentro de los límites deseados. El sistema de control variará con el tipo y capacidad de la caldera así como de las características de la carga.



En las calderas de capacidades grandes(más de 75,000 lb/ hora de flujo de vapor y más de 600 lb/pulg² de presión) ya sea que usen control neumático o electrónico incluyen varios grados de acción de control de uno, dos o tres elementos.

Sistema de control de agua de alimentación de un elemento.

En el control de agua de alimentación con un elemento como lo muestra la figura 6.3., el nivel del domo se mantendrá al nivel deseado cuando la señal del transmisor de nivel se iguale con su punto de ajuste.

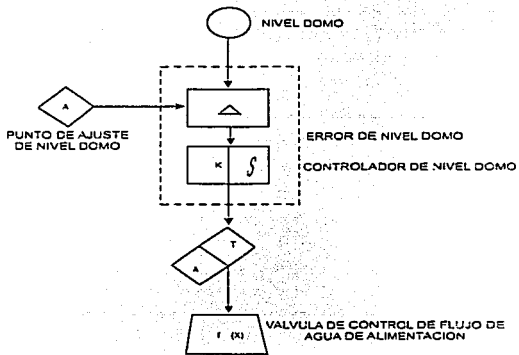


Fig. 6.3 Control de agua de alimentación de un elemento.



Si existe una señal de error de nivel domo, o sea, que el nivel en el domo no es igual que el punto de ajuste. El controlador aplica una acción proporcional más integral que este error para cambiar la posición de la válvula de control de flujo de agua de alimentación.

Este tipo de control opera eficientemente en procesos que tienen cambios pequeños en la carga, presión de vapor o presión de agua de alimentación. Sin embargo dado que las señales de control satisfacen únicamente los requerimientos del nivel del domo, efectos excesivos tanto de expansión como de contracción volumétrica, resultarán afectando al nivel del domo así como retardos considerables para el punto de su ajuste como consecuencia de cambios de carga.

Control de flujo de agua de alimentación de dos elementos.

El sistema de control de dos elementos, figura 6.4, comprende un lazo de control de adelanto (anticipativo) usando para ello la medición de flujo de vapor para controlar la entrada de agua de alimentación con medición de nivel asegurando un nivel de domo correcto.

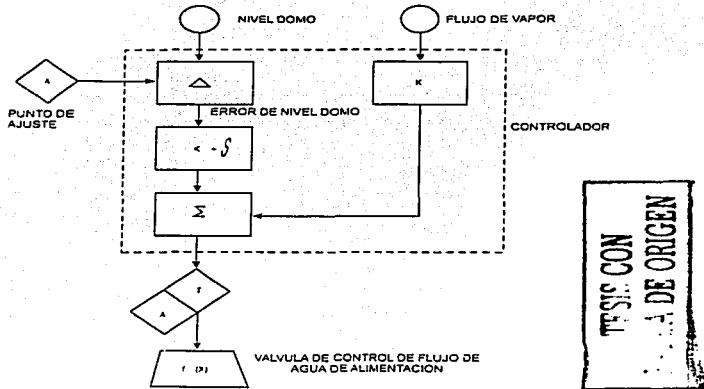


Fig. 6.4 Control de agua de alimentación de dos elementos.

El elemento de control de nivel del domo aplica una acción proporcional a la diferencia entre la señal del nivel y su punto de ajuste. La suma de la señal de error de nivel del domo y la señal de flujo de vapor determina la posición de la válvula de control de flujo de agua de alimentación. Así, la medición de flujo de vapor se mantiene.

El flujo de agua de alimentación es proporcional al flujo de vapor, la medición de nivel del domo corrige cualquier desbalance entre la entrada de agua contra vapor de salida causado por la desviación entre la relación posición válvula/flujo de agua, y proporciona los ajustes transitorios necesarios a fin de competir con las características de expansión y contracción volumétrica en el

*Control de agua de alimentación de tres elementos.*

El sistema de control de tres elementos es un lazo de control en cascada de prealimentación (control de cascada anticipativo) el cual contiene la entrada de flujo de agua de alimentación igual a la demanda.

La medición de nivel de domo mantiene el nivel a pesar de fallas (falseo) posibles en los medidores de flujo, purgas u otras causas.

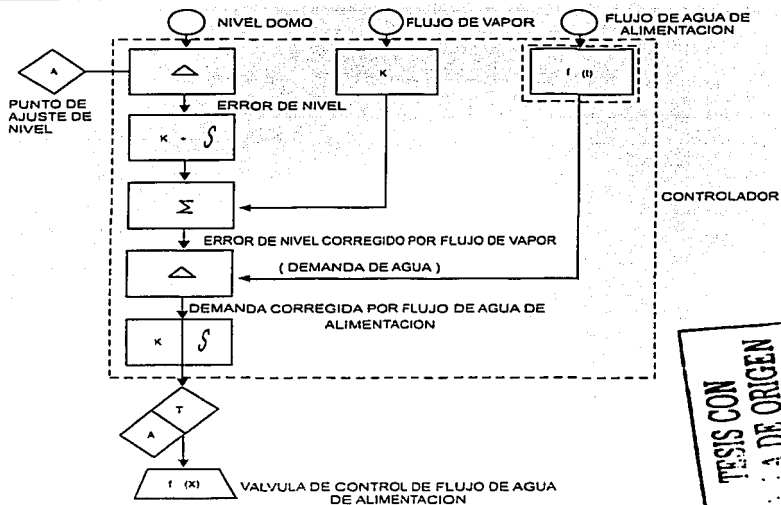
El elemento de nivel del domo del controlador aplica acción proporcional al error entre la señal de nivel del domo y su punto de ajuste. La suma de la señal del error del nivel del domo y la señal de flujo de vapor es la señal de demanda de agua de alimentación. Esta es la salida del sumador. La señal de demanda de agua de alimentación y la diferencia es la salida combinada del controlador. La acción proporcional más integral es incorporada con el objeto de obtener una señal de corrección de agua de alimentación para regular la posición de la válvula de control de agua de alimentación y el control de velocidad de la bomba de agua de alimentación.

En algunos casos la presión del primer paso de la turbina puede ser usado para sustituir la variable de flujo de vapor.



El sistema de control de tres elementos puede ser ajustado para restaurar a un nivel del domo predeterminado en todas las cargas: calderas con variaciones de cargas severas, el sistema puede ser ajustado para permitir que el nivel varíe de acuerdo a las variaciones de carga y compense el efecto de expansión y contracción volumétrica del nivel de agua.

El sistema de control de tres elementos mostrado en su caso puede ser precalibrado de tal forma que unos pequeños ajustes son necesarios para acoplarlo a los requerimientos individuales de cada caldera. Las características de control podrán ser fácilmente cambiadas y directamente ajustadas.



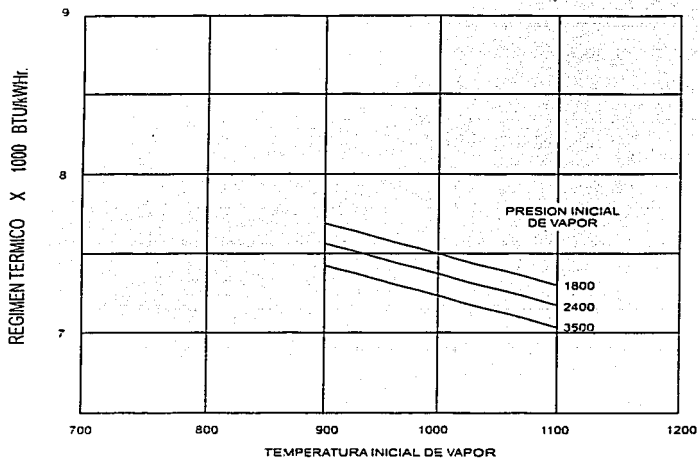
TESIS CON
A DE ORIGEN

6.4. Sistema de control automático de temperatura de vapor.

El objetivo de este sistema será mantener la temperatura del vapor a la salida de la caldera. Los logros alcanzados en el mejoramiento del régimen térmico en las calderas modernas resultan en gran parte en la alta eficiencia del ciclo con



altas temperaturas de vapor, la importancia de la regulación en las temperaturas de vapor dentro de los límites estrechos se hace notar en la figura 6.6.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fig. 6.6 Efectos de cambios de presión y temperatura de vapor en funcionamiento ideal del ciclo Rankine con una etapa de recalentado.

Esta figura nos muestra que un cambio de 35°F a 40°F le corresponde a un cambio de aproximadamente 1% en el régimen térmico a presiones de 1,800 a 3,500 lb/pulg².

Otra importante razón para regular la presión y la temperatura del vapor es



la de prevenir fallas por altas temperaturas del vapor sobrecalentado y recalentado a la turbina para prevenir la expansión térmica excesiva en partes de esta última y para evitar la erosión de mezclas excesivas en las últimas etapas de la turbina.

Las variaciones en el control de temperatura debido a operaciones dudosas, tales como la acumulación de escoria o cenizas es importante, por lo que las temperaturas de vapor recalentado y sobrecalentado en la generación de vapor son principalmente afectadas por las variaciones en el vapor de salida.

En calderas con domo, el vapor de salida y su presión son mantenidos constantemente por el régimen térmico mientras que las temperaturas de vapor recalentado y sobrecalentado dependen de diseños básicos y otras variables importantes de operación, tales como la relación de convección a la superficie de absorción de calor radiado, exceso de aire, temperatura de agua de alimentación, cambios de combustible que afectan las características de la combustión así como depósitos de cenizas en la superficies de calentamiento.

Efecto de las variaciones de operación.

Muchas son las variables de operación que afectan las temperaturas de vapor en el domo, para mantener constante la temperatura de vapor se deberá disponer de los medios para compensar el efecto de tales variables. Las más importantes son:



Carga.

Cuando la carga se incrementa, la cantidad y la temperatura de los gases se incrementa; en sobrecalentadores tipo convectivo, la temperatura de vapor se incrementa con la carga, la pendiente de la curva llega a ser menor como sea la localización del sobrecalentador cercano al hogar.

En el sobrecalentador tipo radiante la temperatura del vapor disminuye cuando la carga aumenta. Algunas veces un sobrecalentador de convección y uno radiante de proporciones correctas son instalados en el generador de vapor para mantener sustancialmente la temperatura del vapor constante sobre un considerable rango de carga, figura 6.7.

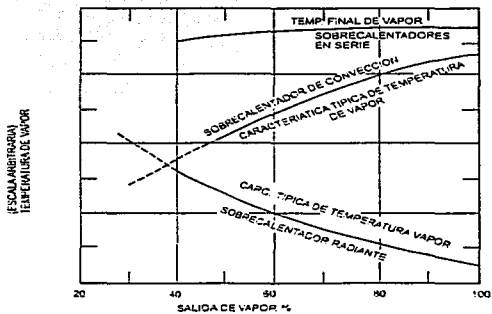


Fig. 6.7 Características de sobrecalentadores tipo radiante y de convección.

*Exceso de aire.*

Para un cambio en la cantidad de exceso de aire entrando a los quemadores existe un cambio correspondiente en la cantidad de gases que fluyen sobre el calentador de convección y por lo tanto un incremento en el aire tiende a elevar la temperatura de vapor.

Temperatura de agua de alimentación.

Incrementando la temperatura de agua de alimentación causará una reducción de trabajo del sobrecalentador, puesto que para un flujo de un calentador dado, cantidad de combustible será necesario y menos gas pasará por el sobrecalentador.

Superficies de calentamiento limpias.

Las adherencias de escorias y cenizas en la superficies de calefacción reducen la transferencia de calor y por lo tanto las temperaturas de vapor son afectadas. La remoción de estos depósitos de la superficie del sobrecalentador incrementará la absorción de calor e incrementará la temperatura de vapor.



Uso de vapor saturado.

Si el vapor saturado de la caldera es usado para sopladores de hollín o auxiliares, tales como bombas y ventiladores, un incremento en el régimen térmico es requerido para mantener constante la salida de vapor principal y esto eleva la temperatura del vapor.

Purga.

El efecto de la purga es similar al uso de vapor saturado pero en menor grado, por la baja entalpía del agua comparada con el vapor.

Operación de quemadores.

La distribución del calor de entrada entre los quemadores a diferentes posiciones o en un cambio en el ajuste de un quemador usualmente tiene un efecto en la temperatura de vapor por los cambios de la relación y absorción de calor en el hogar.

Combustible.

Las variaciones en las temperaturas de vapor pueden ser el resultado del cambio del tipo de combustible quemado o de cambios continuos en las características



para un combustible dado.

A continuación veremos dos controles de temperatura típicos en algunas calderas de circulación natural.

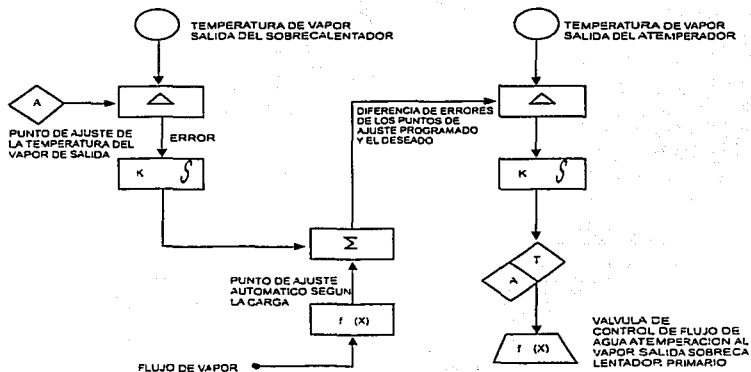


Fig. 6.8 Control de temperatura de vapor, sobrecalentado con tres elementos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

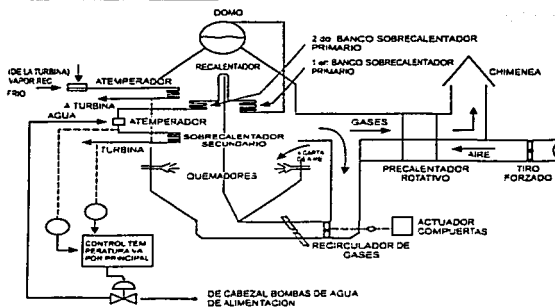


Fig. 6.9 Funcionamiento.

Funcionamiento.

El primer controlador que encuentra la diferencia de (error) de la temperatura de vapor principal y el punto de ajuste de la misma aplica acción proporcional e integral a esta señal. El sumador que precede es con el objeto de generar un punto de ajuste automático según sea la carga como se muestra en la figura 6.10.

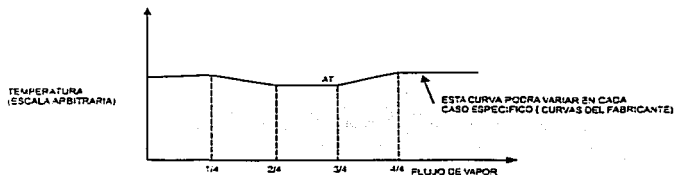


Fig. 6.10.



Este set point automático que es lazo de control en cascada de este sistema se compara con la temperatura de vapor después del atemperador.

La segunda señal de error generada por estos dos últimos elementos entra al controlador (segundo) donde se vuelve a incorporar nuevamente la acción proporcional más integral con el fin de generar una señal de corrección la cual ha de posicionar la válvula de control de flujo de agua de atemperación.

Control de temperatura de vapor recalentado.

En los generadores de vapor actuales cuya eficiencia es muy alta, cuentan con un banco de recalentado con el fin de hacer el ciclo de vapor más eficiente. Esto trae como consecuencia un sistema de control de temperatura con el fin de mantener constante este conforme a los cambios de carga.

Generalmente este banco es de tipo convectivo por lo que su control radica principalmente a base de circulación de gases y en algunos casos en agua de atemperación.

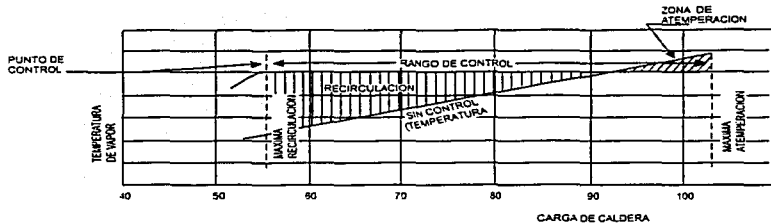


Fig. 6.11 Control de temperatura con recirculación y atemperación.

Control de temperatura típico para vapor recalentado.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En este sistema vemos que el control opera manipulando tanto el agua de atemperación como el recirculador de gases.

La señal de temperatura enviada a cada lazo es procesada mediante el controlador el cual les aplica en cada caso acción proporcional e integral a fin de posicionar tanto la válvula de control como el mecanismo que acciona las compuertas de recirculador de gases.



Conclusiones

La presente tesis ha tenido como fin principal el presentar al lector, los conceptos generales que intervienen en el proceso de generación de energía termoelectrica, apoyándose en la experiencia laboral que se ha tenido con el trabajo diario en este tipo de centrales.

La temática contenida aquí ha sido seleccionada tomando en cuenta exclusivamente los sistemas y equipos de control que intervienen directamente en el proceso, como los son: el generador de vapor, los diferentes sistemas de flujo, las turbinas, el generador de corriente alterna, y el control automático básico del generador de vapor, debido a que son la parte fundamental para la correcta operación de la planta, ya que están involucrados para mantener las variables controladas dentro de los límites preestablecidos por una estrategia de control. Pero desde un punto de vista práctico. Nos enfrentamos a problemas de disturbios frecuentes de diferente naturaleza, desde aquellos en los cuales los transitorios son breves y no afectan significativamente el sistema de generación hasta aquellos en los cuales se pueden disparar algunos equipos y debemos estar preparados para realizar las acciones correctivas necesarias para garantizar su continuidad en el servicio.



Por tal motivo este trabajo servirá de mucha ayuda para todos aquellos que estén involucrados en el campo de la transformación de energía ya que aborda los conceptos fundamentales de una manera muy accesible para su fácil comprensión, además cuenta con todas las herramientas necesarias para poder hacer frente a los problemas más comunes que se presenten en los sistemas de generación.

Esperando que esta tesis resulte de gran utilidad para todos aquellos estudiantes de la carrera de ingeniería en sus diferentes disciplinas.



Bibliografía.

- [1] Antonio Creus Solé (1997)
"Instrumentación Industrial"
6ª Edición, Marcombo
- [2] Virgil Moring Faires (1983)
"Termodinámica"
Hispano-Americana, S.A. de C.V.
- [3] Thaler y Wilcox (1984)
"Máquinas Eléctricas"
Limusa
- [4] Severns (1994)
"La Producción de Energía Mediante el Vapor de Agua, el Aire y los Gases"
Reverté, S.A.
- [5] Claudio Mataix (1988)
"Turbomáquinas Térmicas"
2ª Edición Dossat, S.A.
- [6] Central Escuela Celaya (1998)
"Manuales de Instrumentación y Control"
C.F.E.
- [7] Katsuhiko Ogata (1998)
"Ingeniería de Control Moderna"
3ª Edición, Prentice Hall
- [8] Benjamin C. Kuo (1997)
"Sistemas Automáticos de Control"
8ª Edición Prentice Hall
- [9] Sociedad de Instrumentistas de América (1992)
"Normas I.S.A."