

2^o 8



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

**SIMULACION DINAMICA EN TIEMPO
REAL PARA UN EQUIPO GENERADOR
DE VAPOR**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N :
MARIO ALEJANDRO CHAVEZ RIVERA
MARTHA FLORES BECERRIL

DIRECTOR DE TESIS:
I. O. Eduardo Vázquez Zamora

México, D. F.

1993

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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 está 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.

INDICE

CAPITULO 1

1.	INTRODUCCION	1
1.1.	LA CALDERA	1
1.1.1.	COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR	3
1.1.2.	OPERACION DE LA CALDERA	5
1.1.3.	ACCESORIOS PARA CALDERAS	5

CAPITULO 2

2.	GENERALIDADES	6
2.1.	CLASIFICACION DE LAS CALDERAS	6
2.1.1.	USO	6
2.1.2.	PRESIONES	7
2.1.3.	MATERIALES	9
2.1.4.	TAMAÑO	9
2.1.5.	CONTENIDO DE LOS TUBOS	10
2.1.6.	FORMA Y POSICION DE LOS TUBOS O FLUXES	11
2.1.7.	COMBUSTION	11
2.1.8.	FUENTES DE CALOR	11
2.1.9.	COMBUSTIBLES	12
2.1.10.	FLUIDOS	12
2.1.11.	CIRCULACION	12
2.1.12.	POSICION DEL HOGAR	12
2.1.13.	TIPO DE HOGAR	13
2.1.14.	FORMA GENERAL	13
2.1.15.	MARCAS REGISTRADAS DE LOS FABRICANTES	14
2.1.16.	FORMAS Y CARACTERISTICAS ESPECIALES	14
2.2.	TIPOS DE CALDERAS	15

CAPITULO 3

3.	TERMODINAMICA DEL SISTEMA GENERADOR DE VAPOR	16
3.1.	CARACTERISTICAS DE LA FLAMA	16
3.2.	TRANSMISION DE CALOR	17
3.3.	COEFICIENTE TERMICO DE LAS PLANTAS DE FUERZA	20
3.3.1.	CICLO DE RANKINE	20

CAPITULO 4

4.	EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR	22
4.1.	NECESIDADES DEL SERVICIO	22
4.1.1.	CARACTERISTICAS DE LA CARGA	23
4.1.2.	CARACTERISTICAS DEL COMBUSTIBLE	23
4.1.3.	SISTEMA DE COMBUSTION	24
4.1.4.	FLUJO DE LOS GASES	24
4.1.5.	AGUA DE ALIMENTACION	26
4.1.6.	HOGAR	26
4.1.7.	FONDO DEL HOGAR	26

CAPITULO 5

5.	EQUIPO AUXILIAR EN LA GENERACION DE VAPOR	27
5.1.	SOBRECALENTADORES, RECALENTADORES	27
5.1.1.	SOBRECALENTAMIENTO	28
5.1.1.1.	SOBRECALENTADORES	28
5.1.2.	RECALENTAMIENTO	28
5.1.2.1.	RECALENTADORES	29
5.2.	ECONOMIZADORES Y CALENTADORES DE AIRE	30
5.2.1.	RECUPERACION DE CALOR	31
5.2.2.	APLICACION DEL EQUIPO DE RECUPERACION DE CALOR	31
5.2.2.1.	ECONOMIZADORES	32
5.2.2.2.	CALENTADORES DE AIRE	33

CAPITULO 6

6.	INSTRUMENTACION DE LAS PLANTAS	
	GENERADORAS DE VAPOR	38
6.1.	ARMADURAS PARA CALDERAS	39
6.1.1.	VALVULAS DE SEGURIDAD Y DE ALIVIO	39
6.1.2.	INTERRUPTORES DE BAJO NIVEL	40
6.1.3.	ALIMENTADORES DE AGUA	40
6.1.4.	INDICADORES DEL NIVEL DEL AGUA	40
6.1.5.	VALVULAS DE PRUEBA	41
6.2.	EQUIPO AUXILIAR	41
6.2.1.	PURGA	41
6.2.2.	INSTRUMENTOS	41
6.2.3.	SOPLADORES PARA HOLLIN	43
6.2.4.	TUBERIA PARA CALDERA	43
6.2.4.1.	VALVULAS	43
6.2.4.2.	SEPARADORES DEL VAPOR	44
6.2.4.3.	AMORTIGUADORES DE ESCAPE	44
6.2.5.	SILBATOS	44
6.2.6.	TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION	45
6.2.7.	INYECCION DEL AGUA DE ALIMENTACION	45

CAPITULO 7

7.	CONTROLES PARA LAS PLANTAS GENERADORAS DE VAPOR	46
7.1.	CONTROL DEL SOBRECALENTAMIENTO	48
7.1.1.	VARIANTES	49
7.1.1.1.	CARGA	49
7.1.1.2.	COMBUSTIBLE	49
7.1.1.3.	OPERACION DE LOS QUEMADORES	49
7.1.1.4.	EXCESO DE AIRE	49
7.1.1.5.	TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACION	50
7.1.1.6.	PURGA	50
7.1.1.7.	EXTRACCION DE VAPOR SATURADO	50

7.1.1.8.	LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE DE CALEFACCION	50
7.2.	AJUSTES	51
7.3.	CONTROL	51

CAPITULO 8

8.	DESCRIPCION DE LA PLANTA GENERADORA DE VAPOR A SIMULAR	53
8.1.	CONTROL DE LA COMBUSTION	53
8.1.1.	CONTROL DEL COMBUSTIBLE Y AIRE	54
8.2.	CALENTADORES A FUEGO	56
8.3.	SISTEMAS DE CONTROL DE LAS PLANTAS DE VAPOR	57
8.3.1.	CONTROL DEL NIVEL DEL DOMO	58
8.3.2.	CONTROL DE LA PRESION DEL DOMO	59
8.3.3.	CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR	61

CAPITULO 9

9.	SIMULACION DINAMICA EN TIEMPO REAL	62
9.1.	VENTAJAS DE LA SIMULACION	66
9.2.	EMPLEO DE COMPUTADORES DIGITALES	66
9.2.1.	VENTAJAS DE LOS LENGUAJES FORTRAN Y C	67
9.3.	TIEMPO REAL	67
9.4.	DESCRIPCION DEL TRABAJO	68

CONCLUSIONES	70
--------------	----

ANEXO A	DESARROLLO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACION EN TIEMPO REAL DE UN EQUIPO GENERADOR DE VAPOR
---------	---

ANEXO B	PANTALLAS DE LA SIMULACION
---------	----------------------------

BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el funcionamiento y uso de un equipo generador de vapor, así como sus diferentes tipos, componentes, materiales, presión y temperatura a la cual trabaja, capacidad de producción de vapor, instrumentación y clasificación: uso, presión, materiales de que están contruidos, tamaño, contenido de los tubos, forma y posición de los tubos, contenido de los tubos, sistema del hogar, fuente de calor, clase de combustible, fluido utilizado, sistema de circulación, posición del hogar, tipo de hogar.

Asimismo se describen los principales componentes del equipo generador de vapor y su aplicación entre los cuales se tienen los siguientes: sobrecalentador, recalentador, precalentador de aire y economizador.

Posteriormente se menciona la termodinámica de transferencia de calor que rige el funcionamiento de un equipo generador de vapor.

Finalmente se describe la estructura del programa elaborado, el cual calcula la eficiencia térmica y la eficiencia global de equipos generadores de vapor, así como los datos que se requieren para su manejo de la misma manera se explica el uso del paquete de tiempo real para este tipo de trabajos

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

El término caldera se aplica a un dispositivo para generar:

- 1) vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción; o
- 2) agua caliente para calefacción o para uso general.

Las calderas son diseñadas para transmitir el calor procedente de una fuente externa (generalmente combustión de alguna sustancia), a un fluido contenido dentro de la misma caldera. Si este fluido no es agua ni vapor (por ejemplo, aceite térmico o mercurio), a la unidad se le clasifica como vaporizador (generador de vapores) o como un calentador de líquidos térmicos.

De cualquier carácter que sea este líquido debe estar dentro del equipo con las debidas medidas de seguridad. El vapor, o agua caliente, deben ser alimentados en las condiciones deseadas, es decir, de acuerdo con la presión, temperatura y calidad, y en la cantidad que se requiera. Por razones de economía, el calor debe ser generado y suministrado con un mínimo de pérdidas.

1.1. LA CALDERA

La función principal de la caldera propiamente dicha, es proporcionar un medio por el cual el calor procedente de la combustión se transmita al agua o el vapor que debe ser calentado. El objetivo que persigue el diseñador es lograr la mejor disposición de la superficie de calefacción, de acuerdo con las limitaciones en cuanto al espacio disponible y los arreglos necesarios en el hogar y en los demás componentes. La superficie de calefacción requerida depende de su clase, si es primaria, secundaria, de sobrecalentamiento, recalentamiento, economizador o de calentador de aire.

El tipo de caldera así como la presión y la temperatura de trabajo, tienen gran influencia sobre el diseño. Una caldera de tubos de humo remachada, de baja presión, tiene muy poco de común con una planta para servicio termoelectrico de 351.5 Kg/cm^2 ($5\ 000 \text{ lb/plg}^2$) de presión.

Los requisitos de la calidad del vapor, afectan una parte del diseño de la caldera. Si se requiere una calidad de 99.5% (el vapor en estado de vaporización parcial, tiene cierta "calidad", que se calcula por la relación de peso de la parte vaporizada entre el peso total de la mezcla de vapor y agua), se necesita vapor seco y tiene que agregarse separadores de vapor. La necesidad de sobrecalentamiento o de recalentamiento, afecta igualmente el diseño. Si no existe objeción entre el vapor saturado ó humedo (como por ejemplo en una planta de calefacción), el diseñador omitirá el equipo de separación y sobrecalentamiento.

La circulación del vapor y del agua dentro de la caldera, es decisiva para la efectividad de la superficie transmisora de calor. Los precipitados o sedimentos tienen que depositarse en donde no afecten a la superficie principal de transmisión de calor y donde puedan ser evacuados por purga o por limpieza periódica. Deben tomarse previsiones para una purga continua. Algunas calderas necesitarán equiparse con circulación forzada.

La cantidad de agua contenida en la caldera determina la rapidez con la que puede calentarse para alcanzar las condiciones de evaporación (o producción de vapor). Algunos sistemas de calefacción requieren un volumen grande de almacenamiento, ya sea en la caldera misma, o en tanques de almacenamiento de agua de alimentación. En las unidades de gran capacidad, los diseñadores encuentran un incentivo para dar a las superficies de calefacción las proporciones debidas para el uso óptimo de los niveles de temperatura que pueden lograrse. En los tamaños pequeños, las consideraciones de caracter económico generalmente imponen la necesidad de buscar la sencillez de la construcción.

Los materiales y los métodos de construcción están controlados por los requisitos para el trabajo a presión y por el código ASME, Sec VIII para calderas y recipientes a presión.

1.1.1. COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

La unidad generadora se compone de un hogar (o cámara de fuego) en el que se quemará el combustible, así como de la caldera propiamente dicha. En las unidades de tipo paquete, tanto como en las grandes centrales de fuerza, están comprendidos también los quemadores de combustible, al igual que los controles y accesorios similares. En la definición técnica escueta, se comprende como caldera únicamente el cuerpo que forma el recipiente y las superficies de calefacción por convección. Con la aparición de las paredes enfriadas por agua para el hogar, sobrecalentadores, calentadores de aire y economizadores, se creó el término generador de vapor, para dar al equipo una denominación más apropiada. Cuando el hogar (o cámara de fuego) es autocontenido, la palabra caldera describe a la unidad generadora de vapor en su conjunto.

La capacidad de producción de calor (cantidad de vapor o agua caliente por hora), depende de los siguientes factores:

- 1) Grado de combustión de combustible en el hogar.
- 2) Extensión de la superficie de calefacción.
- 3) Proporción en la que se distribuye la superficie, en áreas de calefacción primarias (calor radiante) y secundarias (calefacción por convección).
- 4) La circulación del vapor o del agua y la de los gases de combustión.

Para mantener la combustión, es necesario suministrar cierta cantidad de aire y remover los productos resultantes de dicha combustión, mediante el tiro. Si la acción del tiro natural (efecto de la chimenea) es insuficiente, se utiliza un ventilador (para tiro forzado, tiro inducido o la combinación de ambos).

En las grandes unidades generadoras de vapor de las centrales termoelectricas, el aire para la combustión es precalentado (en un calentador de aire) y el agua de alimentación es igualmente calentada en un economizador.

por medio del calor residual de los gases de combustión. Si se desea sobrecalentar el vapor (que generalmente sólo se requiere para el impulso de turbinas), se agrega a la caldera un sobrecalentador.

La salida de la caldera puede estar dotada de tapones roscados, o bien de válvulas con bridas. Otros orificios se destinan a la colocación de instrumentos, conexiones de agua de alimentación, drenes, purgas, orificios de registro y para otros propósitos semejantes. Un montaje adecuado debe comprender una base, ménsulas de apoyo y tirantes colgantes o amarres.

El agua es alimentada a la caldera ya sea por gravedad en el retorno (en instalaciones pequeñas) o por una bomba de alimentación. En las calderas de vapor el agua absorbe calor hasta su punto de ebullición. Ya convertida el agua en vapor, se acumula en la parte más alta de la caldera, por la diferencia de densidad entre el vapor y el agua. En las calderas de agua caliente (calentadores), el agua se saca cuando ha alcanzado la temperatura deseada. La caldera se alimenta, ya sea en forma continua o intermitente, de tal manera que el nivel se conserve relativamente constante.

El agua se mueve dentro de la caldera estableciendo una circulación natural, elevándose en cuanto entra en contacto con la superficie interna caliente. Algunas calderas están dotadas de dispositivos de circulación forzada.

Si se agrega una cantidad regular de agua dura a un sistema de vapor, es por lo general necesario someter el agua de alimentación a un tratamiento químico, para eliminar las impurezas, que regularmente se componen de concentraciones de sales solubles. Estas impurezas son expulsadas a intervalos o de manera continua, por medio de los dispositivos de purga. Las instalaciones grandes requieren la instalación de desaeradores, para eliminar el oxígeno del agua de alimentación.

Las presiones de operación arriba de 225 Kg/cm² a (3206 lb/plg² a) están consideradas como presiones supercríticas; en estas temperaturas el vapor no

se puede separar del agua, porque ambos tienen la misma densidad.

Calderas convertibles son aquellas apropiadas para trabajar con quemadores automáticos de petróleo, gas o alimentador mecánico de otros combustibles y que fácilmente puede cambiar de una clase de combustible a la otra, ya sea empleando el quemador existente, o bien con otro quemador.

1.1.2. OPERACION DE LA CALDERA

La transmisión de calor no solamente tiene que ser económica, sino también libre de efectos. Cuando se opere a alta capacidad, los costos de mantenimiento y los períodos de paro, pueden ser excesivos y anular las ventajas obtenidas en la operación inicial. Los requisitos en la limpieza y del mantenimiento tienen que guardar un equilibrio razonable en relación con la más alta eficiencia de transmisión de calor. Como las decantaciones de hollín en estas calderas afectan seriamente la eficiencia de transmisión de calor, en el diseño se deben tomar provisiones contra la acumulación de cenizas, hollín y escorias en las superficies del lado del fuego, como también contra la acumulación de lodos, incrustaciones y sedimentos en las superficies bañadas por el agua.

Es necesario tomar providencias para:

- 1) La fácil limpieza de los tubos, química o mecánicamente.
- 2) El sopleteo del hollín.
- 3) El lavado de las superficies del economizador y del calentador de aire. El espaciado de los fluxes debe permitir su reposición individual en caso de fallas.

1.1.3. ACCESORIOS PARA CALDERAS

Los accesorios para las calderas son todos aquellos aparatos, instrumentos, conexiones y aditamentos íntimamente ligados con las mismas o necesarios para su operación, control o mantenimiento.

CAPITULO 2

GENERALIDADES

2. GENERALIDADES

2.1. CLASIFICACION DE LAS CALDERAS

Las calderas se clasifican basándose en algunas de las características siguientes:

- 1) Uso.
- 2) Presión.
- 3) Materiales de que están construidas.
- 4) Tamaño.
- 5) Contenido de los tubos.
- 6) Forma y posición de los tubos.
- 7) Sistema del hogar.
- 8) Fuente de calor.
- 9) Clase de combustible.
- 10) Fluido utilizado.
- 11) Sistema de circulación.
- 12) Posición del hogar.
- 13) Tipo del hogar.
- 14) Forma general.
- 15) Nombre registrado del fabricante.
- 16) Propiedades especiales.

2.1.1. USO

Partiendo de la simple caldera de casco cilíndrico, se han desarrollado muchos y variados tipos de unidades generadoras de vapor. Algunos se han diseñado para proporcionar fuerza en general o calefacción, otros en cambio, se destinan para funciones más especializadas. Sus características varían de acuerdo con la naturaleza del servicio que prestan. Las calderas reciben básicamente las denominaciones de estacionarias (las instaladas en tierra) y móviles (para navíos y locomotoras).

Las calderas estacionarias se utilizan para calefacción de edificios,

para plantas de calefacción central de servicio público, como plantas de vapor para procesos industriales, plantas de vapor para centrales termoeléctricas locales, centrales de fuerza para servicio público (plantas termoeléctricas) o unidades generadoras para servicios especiales. Las calderas portátiles incluyen las de tipo locomóvil usadas en los campos petroleros y en los aserraderos, los generadores de vapor pequeños y los que se utilizan para malacates de vapor, tan familiarizados con las obras de construcción. La mayoría de las calderas con caja de fuego de acero, se clasifican entre las calderas portátiles.

Las calderas para servicios secundarios son invariablemente consideradas como auxiliares, tales como las que se usan a bordo de los barcos para cubrir sus necesidades durante la estancia en puerto. Una máquina de vapor complementaria, que por lo general se supone que va dotada de su propia caldera es una unidad pequeña, portátil, dedicada a trabajos auxiliares. Se le utiliza a bordo de los buques, en explotaciones madereras y en las obras de construcción.

Las calderas de calefacción se clasifican frecuentemente como residenciales o como comerciales. Se acostumbra también establecer una diferencia entre las instalaciones industriales y las plantas de fuerza termoeléctrica.

Las grandes unidades utilizadas primordialmente para la generación de energía eléctrica, son conocidas por el nombre genérico de centrales termoeléctricas.

2.1.2. PRESIONES

Calderas estacionarias. Para mantener un control de seguridad sobre las características de construcción de toda la caldera estacionaria susceptible de aseguramiento, dicha construcción debe someterse a las normas prescritas por el "Código de Calderas y Recipientes a Presión" de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, conocido como el Código de Calderas ASME, Sec. IV. Este

Código diferencia las calderas por las siguientes características:

- 1) Calderas de calefacción de baja presión, que comprenden todas las calderas de vapor que no exceden de 1.05 Kg/cm² (15 lb/plg²) y todas las calderas para agua caliente que operan a presiones que no exceden de 11.25 Kg/cm² (160 lb/plg²) y cuyas temperaturas no sobrepasan los 121 °C (250 °F). Referencias del Código de Calderas ASME, Sec. IV.
- 2) Calderas para generación de fuerza. Se consideran dentro de esta sección todas aquellas calderas cuyas condiciones de operación sobrepasan los límites señalados en el párrafo anterior.
- 3) Se consideran como calderas de miniatura, todos aquellos tanques de presión sometidos a fuego, que no exceden los límites siguientes:
 - a) diámetro interior del casco: 406 mm (16").
 - b) volumen máximo de 0.141 m³ (5 pie³), excluyendo la cubierta y el aislamiento.
 - c) superficie de calefacción de 1.86 m² (20 pie²).
 - d) 7 Kg/cm² (100 lb/plg²) de presión máxima de trabajo.Referencia del Código de Calderas ASME, Sec. V.

Calderas de locomotoras. Las calderas movibles para locomotoras de ferrocarril, se construyen también de acuerdo con el Código de Calderas ASME, Sección III.

Calderas marinas. Las calderas marinas se construyen de acuerdo con los reglamentos denominados "Reglamentación de Ingeniería Naval y Especificaciones de Materiales" (Marine Regulations and Material Specification), del servicio de Guardacostas de los Estados Unidos (U. S. Coast Guard's), o bien de acuerdo con los reglamentos denominados "Especificaciones Generales para Maquinaria", de la Marina de los Estados Unidos (General Specifications for Machinery, of the U. S. Navy).

2.1.3. MATERIALES

La selección de los materiales para la construcción de calderas, está controlada por los dispuesto en la Sección II del Código de Calderas ASME (Especificaciones de materiales). Las calderas para la generación de fuerza se construyen usualmente con aceros especiales. Las calderas de miniatura se pueden fabricar de otros metales, tales como cobre, acero inoxidable y similares. Las calderas de calefacción de presión baja, se fabrican, por lo general, de hierro colado o de acero, aunque algunas calderas para servicio doméstico, operadas por medio de gas se manufacturan de tubos de cobre.

Las calderas de hierro colado, producidas por las fundiciones de hierro gris, se componen de cierto número de secciones, interconectadas por niples de presión o individualmente por medio de cabezales exteriores.

Las calderas de acero son fabricadas con láminas de acero, procedentes de los trenes de laminación y con fluxes de acero. Las planchas de acero son unidas por medio de costuras de remaches o por costuras de soldadura (el remachado se ha sustituido generalmente por la soldadura). Los tubos se insertan dentro del tambor, en los cabezales o placas de soporte, siendo expandidos, rolados o soldados, para obtener una junta impermeable.

2.1.4. TAMAÑO

La industria calderera a reconocido las normas del Instituto de Calderas de Acero [Steel Boiler Institute (SBI)] y las del Instituto de Manufactureros de Calderas y Radiadores [Institute of Boiler and Radiator Manufacturers (IBR)].

Calderas de acero. El Instituto de Calderas de Acero (Steel Boiler Institute), en sus "Normas para Calderas de Acero", estandariza el tamaño y clasificación de las calderas de hogar de acero, calderas escocesas, quemadores para calderas y calderas de acero para calefacción (con excepción de las calderas verticales que operan a más de 1 Kg/cm^2), de la manera

siguiente:

- 1) La determinación de la capacidad de las calderas se basa únicamente en la superficie de calefacción. Las llamadas "tamaño veintidos" alcanzan superficies desde 12 hasta 332 m² (129 a 3571 pies²) de superficie de calefacción [con rendimientos máximos de 163 296 a 4 536 000 Kcal/h (648 a 18 000 MB/h)]. (MB/h significa 1 000 Btu/h).
- 2) Las capacidades de las calderas se basan en la superficie de calefacción, verificadas mediante pruebas de rendimiento. Quedan comprendidas en la llamada "categoría diecisiete", de 1.49 a 27.3 m² (16 a 294 pies²) de superficie de calefacción [con rendimiento nominal hasta de 453 600 Kcal/h (1 800 MB/h)].
- 3) Se trata de calderas para petróleo combustible y unidades formadas por caldera y quemador, cuya capacidad se basa únicamente en las pruebas de rendimiento. Están catalogadas en la llamada "categoría catorce", con un rendimiento nominal hasta de 453 600 Kcal/h (1 800 MB/h).

Calderas de hierro colado. El "Código de Pruebas y Estimaciones para Calderas de Calefacción de Baja Presión" del IBR establece las normas de las calderas de hierro colado para calefacción [hasta una presión de 1.05 Kg/cm² (15 lb/plg²)], catalogándolas en la llamada "categoría treinta y tres" (para un rendimiento hasta de 3 143 Kg de vapor por hora).

2.1.5. CONTENIDO DE LOS TUBOS

Aparte del tipo ordinario de caldera de cuerpo de acero, hay dos clases generalizadas de calderas de acero; la caldera de tubos de humo y la caldera de tubos de agua o acuotubular.

Calderas de tubo de humo o pirotubulares. Estas son calderas dotadas de tubos rectos, rodeados de agua y a través de cuyo interior pasan los gases de la combustión. Estos tubos se instalan normalmente en la parte inferior de un

tambor sencillo o de un casco, abajo del nivel del agua.

Calderas acuotubulares o de tubos de agua. En estas calderas los tubos contienen en su interior el vapor o el agua, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos. Los tubos generalmente unidos a uno o más domos, se disponen ya sea paralelos al eje de la caldera o en ángulo recto con respecto al mismo. Los domos van colocados horizontalmente por lo regular.

2.1.6. FORMA Y POSICION DE LOS TUBOS O FLUXES

La superficie de calefacción de los tubos o fluxes se puede clasificar:

1) Por la forma de los mismos

- rectos
- curvos
- sinuosos

2) Por su disposición

- horizontal
- inclinada
- vertical

2.1.7. COMBUSTION

La caldera puede ser un recipiente a presión operado por fuego o por otro sistema de suministro de calor. Las calderas operadas por fuego, reciben el calor aplicado de la combustión de algún producto combustible. Una caldera no operada mediante fuego, recibe el calor necesario de cualquier otra fuente que no sea la combustión.

2.1.8. FUENTES DE CALOR

El calor puede ser un derivado de:

1) La combustión de combustibles

- sólidos
- líquidos

- gaseosos

- 2) Los gases calientes de desperdicio de otras reacciones químicas.
- 3) La aplicación de energía eléctrica.
- 4) El empleo de energía nuclear.

2.1.9. COMBUSTIBLES

Frecuentemente se diseñan las calderas de acuerdo con el combustible a emplear, por ejemplo, carbón bituminoso, antracita, carbón pulverizado, gas, petróleo, leña y bagazos u otros productos de desperdicio.

2.1.10. FLUIDOS

La idea general de una caldera, se concibe como un recipiente a presión, dedicado a producir vapor de agua. Sin embargo, una gran mayoría de calderas residenciales y muchas de tipos más grandes, tienen como finalidad el calentamiento de agua. Algunas calderas para procesos industriales se destinan al calentamiento de productos químicos especiales, tales como aceites térmicos. En unas cuantas plantas de centrales termoeléctricas, se han instalado calderas a base de mercurio.

2.1.11. CIRCULACION

La mayoría de las calderas trabaja con circulación natural. En algunas se utiliza la circulación forzada (o circulación positiva), en cuyo sistema el fluido de operación es forzado totalmente a través de la caldera, o se aplica una recirculación parcial controlada.

2.1.12. POSICION DEL HOGAR

La caldera es un dispositivo de calefacción externa, en el que la combustión tiene lugar fuera de la región de la ebullición del agua. Todo el calor necesita ser transmitido por la superficie de calefacción para entrar en

contacto con el agua. La localización del hogar con relación a la caldera, se indica ya en la descripción del hogar, que puede ser interno o externo, según las consideraciones siguientes:

- 1) El hogar es interno si la cámara en la que se desarrolla la combustión está totalmente rodeada por superficies enfriadas por agua, tal como sucede en las calderas de tipo escocés o en las calderas portátiles con hogar en forma de caja.
- 2) El hogar es de combustión externa, si éste es auxiliar a la caldera o si está construido abajo de la misma.

La mayoría de las calderas que se manufacturan en la actualidad, son de hogar interno. Las calderas que se fabricaban antes de la Segunda Guerra Mundial, eran de hogar externo, con ciertas excepciones.

Las cimentaciones de la caldera incluyen los materiales refractarios, cámaras aisladas, muros de tabique y soportes.

Una ampliación del hogar, que se construye con el objeto de aumentar su volumen, recibe el nombre de horno holandés.

2.1.13. TIPO DE HOGAR

La caldera puede ser descrita según el tipo de hogar, por ejemplo, gemela, escocesa, de horno holandés, abierta, etc.

2.1.14. FORMA GENERAL

Durante la evolución de la caldera como un productor de calor, han aparecido muchas formas y diseños nuevos. Muchas de estas calderas se han popularizado y son ampliamente conocidas en el comercio, incluyendo las siguientes:

- 1) Calderas de tubos de humo, tubulares, horizontales de retorno de hogar de caja corta, compactas, de locomotora,

de tubos verticales del tipo portátil, del tipo escocés (calderas marinas o de tierra), así como unidades residenciales.

- 2) Calderas de tubo de agua (acuotubulares), en sus dos formas, es decir, de tubos rectos y de tubos curvos. La caldera horizontal de tubos rectos suele tener un cabezal de tipo de caja, hecho de placas de acero, o un cabezal en secciones, en el cual cada sección conecta los tubos de una hilera vertical sencilla. La caldera de tubos curvos va dotada de uno a cuatro domos. Si el domo se dispone paralelo a los tubos, la caldera es de domo longitudinal; si está dispuesto en forma transversal, la caldera es de domo transversal o cruzado. Si el hogar está encerrado entre superficies enfriadas por agua, se le llama hogar de paredes de agua (o enfriadas por agua).

2.1.15 MARCAS REGISTRADAS DE LOS FABRICANTES

Muchos fabricantes imprimen a cada tipo de caldera su propio nombre. En algunos casos estos nombres, aunque son de propiedad registrada, pasan al dominio general para indicar el tipo de alguna caldera. Ejemplos históricos incluyen los nombres de: "Wagon" y "Caravan" (a principios del siglo XVIII); "Cornish" y "Lancashire" (británicas); "Heine", "Elephant" (francesa). Con frecuencia el nombre del inventor o fabricante se convierte en el indicativo de cierto tipo de diseño de calderas, por ejemplo, Benson, Loeffler, LaMont, Sulzer, Velox (calderas de circulación forzada); Babcock, Galloway, Manning, Thornycraft, Wilcox y Yarrow (nombres históricos).

2.1.16. FORMAS Y CARACTERISTICAS ESPECIALES

La caldera de tubo antracítico (Anthratube boiler), es una unidad adaptada especialmente para quemar antracita. Calderas tubulares de cobre, con serpientes de tubos de cobre de forma sinuosa a manera de horquillas, se fabrican para quemar aceites combustibles o gas. Existen muchas otras

variedades, tales como las calderas de tubos concéntricos, calderas con quemadores en la tapa superior y otros similares. Una caldera instantánea tiene una capacidad de agua relativamente reducida y una dosificación de fuego alta.

Fuego diferencial y fuego tangencial, son términos descriptivos relacionados con la posición y operación de los quemadores. Fogones gemelos, derivación del gas (puente), atemperación y recirculación de gas, son términos relacionados con los métodos de construcción que permiten controlar la temperatura y la presión de la caldera, bajo diferentes condiciones de carga. La doble circulación se utiliza para evitar que el vapor de agua arrastre vapores silicosos. Las unidades a sobrepresión y supercargadas tienen una cámara de combustión que opera bajo una presión positiva.

2.2. TIPOS DE CALDERAS

Las calderas se clasifican, por lo general, de la manera siguiente:

- 1) Calderas de acero.
 - A) Calderas del tipo de tubos de humo.
 - B) Calderas del tipo acuotubular.
 - B.1) Calderas horizontales de tubos rectos
 - B.2) Calderas de tubos curvos.
 - a) De circulación natural.
 - b) De circulación forzada.
 - C) Calderas de cuerpo de acero.
- 2) Calderas de hierro colado.
- 3) Calderas de diseño especial.
- 4) Reactores de energía nuclear.

CAPITULO 3

TERMODINAMICA DEL SISTEMA GENERADOR DE VAPOR

3. TERMODINAMICA DEL SISTEMA GENERADOR DE VAPOR

Cada paso dado en el proceso de la generación de vapor, está asociado al fenómeno de transmisión de calor, cuyo punto culminante es el cambio de estado del agua, de líquido a gaseoso. Los elementos de la transmisión de calor son fundamentalmente simples en su concepción. Sin embargo, ya en su aplicación práctica, la transmisión de calor se vuelve muy complicada, debido a los continuos cambios en las condiciones de trabajo, irregularidades en la configuración de la superficie de calefacción y la aparición simultánea de otros factores de influencia.

3.1. CARACTERISTICAS DE LA FLAMA

La flama es un fenómeno de la reacción química de un gas que ha sido calentado hasta su punto de ignición en presencia de otro gas, usualmente el oxígeno de la atmósfera. El calor y la luz producida, son características de la reacción específica. La luminosidad de la flama es causada generalmente por la presencia de partículas sólidas y de cuerpos extraños (artificiales o naturales) en el gas en combustión, al ser calentado hasta la incandescencia. Las flamas que contienen partículas finas de carbón incandescente, u otro tipo de residuos de carbón, son las que forman el cuerpo opaco de efectividad radiante. El cuerpo opaco es una superficie ideal, que absorbe completamente toda la energía radiante de cualquier longitud de onda. Las flamas no luminosas, como las de la combustión del gas del combustible, obtienen su efectividad radiante del dióxido de carbono y del vapor de agua, que tienen un valor bajo de radiación, de aproximadamente el 10% de la que se obtiene del cuerpo opaco. Grandes cantidades de radiación se desarrollan en las frecuencias de la zona infrarroja (abajo del alcance visual). La flama no luminosa es mucho más caliente que la luminosa, porque transforma en calor una cantidad mayor de energía.

Hay una notoria diferencia entre las flamas de los diversos combustibles. La luminosidad de la flama del aceite combustible es alta, lo que da por resultado una transmisión alta de calor radiante de la llama al material refractario y a las paredes enfriadas por agua. En los combustibles

gaseosos, la mayor parte de la transmisión de calor es por convección, una vez que los gases abandonan el hogar propiamente dicho. Como aquí la radiación es mínima, no se requieren paredes enfriadas por agua en el hogar.

El carbón de antracita arde con una flama corta, casi transparente. El calor radiante proviene sólo del lecho incandescente del hogar. La antracita pulverizada arde con una llama un poco visible. A consecuencia de que la antracita no posee cualidades volátiles, es necesario limitar las superficies de enfriamiento al alcance de lo que pueda radiar el calor; porque de otra manera bajará la temperatura de ignición y entonces el carbón no arde.

El carbón semibituminoso, arde con una flama corta y clara. Los componentes volátiles se destilan en forma de gases permanentes que no se decantan para formar hollín. El carbono fijo residual es denso y arde lentamente sin flama visible. El carbón bituminoso arde con una flama larga y luminosa. El carbón subbituminoso y el lignito arden con una flama larga y amarilla, similar a la del carbón bituminoso. Semibituminoso, bituminoso, subbituminoso y carbones de lignito, todos ellos requieren un volumen grande de hogar para tener una combustión completa.

3.2. TRANSMISION DE CALOR

El flujo de calor de la caldera, que se origina al quemarse el combustible y que es conducido por los productos de la combustión hacia el agua o el vapor, se efectúa por tres vías:

- 1) la de radiación.
- 2) la de convección.
- 3) la de conducción.

Por uno u otro de estos mecanismos, o por la combinación de los tres, se desarrollan todas las fases de la transmisión del calor.

La radiación es la transferencia directa de calor en forma de energía radiante, procedente de la incandescencia del combustible o de las flamas luminosas y de los refractarios, a los tubos o al cuerpo de la caldera. La

absorción radiante en una caldera, es una función de la extensión de superficie que está expuesta al reflejo de los refractarios y a los efectos de las flamas. Es un proceso completamente independiente del espacio circundante.

La convección, es la transferencia de calor entre un fluido (gaseoso o líquido), causada por el movimiento o agitación, que forza a las partículas calientes a reemplazar continuamente a las enfriadas al contacto con la superficie absorbente de calor. La convección natural o libre, es causada solamente por la diferencias de densidad, que provienen del diferencial de temperatura. La convección forzada, es causada por medio de fuerza mecánica, aplicada para impartir movimiento al fluido.

La conducción, es la transferencia de calor de una parte a otra de un mismo cuerpo con el que está en contacto físico, pero sin un desplazamiento apreciable de las partículas dentro de dicho cuerpo.

La absorción de una gran cantidad de calor del hogar por radiación, es posible. En consecuencia, debe darse especial atención al diseño y colocación correctos de la superficie de absorción de calor radiante (superficie primaria). La superficie de calefacción sobre la que refleja el calor, es la llamada directa o radiante; la que solamente tiene contacto con los gases, es llamada superficie indirecta o de convección. El tamaño de la superficie de calefacción, su distribución y la temperatura en cada uno de sus lados, todo esto ejerce influencia sobre la capacidad de la caldera. La superficie de calefacción directa es más valiosa que la indirecta, ya que aquella es sometida a temperaturas más altas y también porque está en condiciones de recibir toda la energía radiante producida por el combustible y por su flama. En las llamas no luminosas, las superficies de calefacción directa pierden su valor.

La transferencia de calor es afectada en grado variable por los siguientes factores:

- 1) La temperatura de la flama o de los productos de la combustión.

- 2) Acumulaciones de escorias, cenizas volátiles u hollín en las superficies en contacto con el fuego.
- 3) Conductibilidad térmica.
- 4) Acumulación de incrustaciones o sedimentos en las superficies en contacto con el agua.
- 5) Turbulencia y movimiento del vapor y del agua, explicable por el coeficiente de evaporación superficial.

El contorno, diseño y localización de la superficie de calefacción, son todos factores importantes. Las superficies pueden ser ampliadas por medio de una pieza de fundición dotada de costillas, aletas o topes, fundidos en una sola pieza con la superficie, o montados en la sección de la superficie primaria. Este dispositivo aumenta apreciablemente la superficie, sin modificar las proporciones generales de la caldera.

La superficie de calefacción debe permanecer limpia. Si se ensucia fácilmente, o no se puede limpiar debidamente, no trabajará con efectividad. Las acumulaciones de escoria y hollín en el lado del fuego, o las de incrustaciones y sedimentos en el lado del agua, tienen el efecto de mayor importancia sobre la transmisión de calor de todos los factores indicados. En las zonas de convección, tales como los retornos de la caldera, es este el factor de control. En las áreas expuestas al calor radiante, desempeña un papel secundario con respecto a la efectividad de la flama.

La acumulación de materiales extraños, ya sea en el lado del agua o en la superficie del fuego, ocasiona pérdida de eficiencia. Los depósitos de lodos o las incrustaciones conducen al sobrecalentamiento y rupturas en los tubos. El hollín y otros cuerpos adheridos a la superficie del lado del fuego, no causan daños mayores, pero los ácidos que se forman por la reacción química entre la humedad y los productos sulfurosos, provoca la corrosión y la ruptura de los tubos. Las cenizas muy finas y otras partículas duras, causan la abrasión de las superficies del lado del fuego.

El acero y el hierro colado, no tienen diferencias de consideración en

su conductividad térmica ni en las características de transferencia de calor.

3.3. COEFICIENTE TERMICO DE LAS PLANTAS DE FUERZA

La planta industrial grande, o la central termoeléctrica, no se concretan a considerar únicamente la eficiencia de la caldera o de la combustión en la misma, sino que su interés se extiende al grado de la utilización total obtenible para la producción de energía eléctrica.

Por la definición de cálculo, un kilowatt-hora de fuerza eléctrica equivale a 3 412.66 Btu (859.99 Kcal) y un caballo de fuerza-hora equivale a 2 544.65 Btu (641.25 Kcal). Desgraciadamente el proceso de generación de fuerza eléctrica es relativamente ineficiente y el "Coeficiente de Recuperación Térmica de una planta" máximo obtenible, es aproximadamente 4 900 Btu por Kw/h (1 234.8 Kcal por Kw/h). Para obtener esta eficiencia teórica máxima, es necesario recuperar todo el calor que normalmente es arrojado al agua del condensador.

En la práctica, la central termoeléctrica común requiere más de 11 000 Btu (2 772 Kcal), para la producción de un Kw/h de fuerza eléctrica y solamente las centrales más grandes, que operan a presiones supercríticas, tienen un coeficiente de recuperación térmica que fluctúa entre el margen de 8 000 a 9 000 Btu (2 016 a 2 268 Kcal) por Kw/h.

3.3.1. CICLO DE RANKINE

La producción de fuerza por medio del vapor se basa en un ciclo puede ser ilustrado por:

- 1) Diagrama de temperatura-entropía.
- 2) Diagrama de Mollier de entropía-entalpía.
- 3) Diagrama de presión-volumen.
- 4) Diagrama de presión-entalpía.

En el proceso adiabático, el trabajo es desarrollado por la energía, al

abandonar esta el medio en donde desarrollaba el trabajo y viceversa. El trabajo es desarrollado durante la expansión, con una disminución constante de la presión procedente de la energía interna (suponiendo un mecanismo perfectamente aislado y enteramente libre de fricción), con la consiguiente reducción de la temperatura. En un proceso adiabático ideal (reversible), en donde no haya fricción ni pérdidas de ninguna clase, el desarrollo de trabajo es el máximo, siendo definido como proceso isoentrópico.

En el ciclo teórico de calor-fuerza, de Rankine, ocurre una transformación completa de la energía interna de unidad, de energía interna a trabajo mecánico en la flecha (o viceversa), en el curso de un proceso isoentrópico.

El ciclo reversible de Rankine, que es teórico, debe ser modificado en la práctica para la incorporación de las pérdidas en la maquinaria (por ejemplo, por la fricción), las sufridas en el recalentamiento.

CAPITULO 4

EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR

4. EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR

La operación de una unidad generadora de vapor, comprende:

- 1) La conversión del potencial energético del combustible en energía térmica.
- 2) La transmisión de esta energía a un medio (generalmente vapor de agua), que puede emplearse en un trabajo útil.

El problema básico del diseño de una caldera, consiste en disponer de la superficie total de absorción de calor de una manera tal, que extraiga el calor máximo obtenible del combustible y de los productos de la combustión. Para una economía máxima general, cada parte componente y cada proceso deben estar en correcta proporción en relación con los demás elementos y procesos, de manera que toda la unidad en conjunto represente un diseño equilibrado. Estos elementos y procesos incluyen lo siguiente:

- 1) Caldera.
- 2) Hogar.
- 3) Equipo para quemar el combustible.
- 4) Recolección y transporte de cenizas.
- 5) Separadores de vapor.
- 6) Agua de alimentación.
- 7) Sistema de purga.
- 8) Suministro
- 9) Remoción de los productos de la combustión.
- 10) Cimentaciones y soportes.
- 11) Refractarios y mamparas.
- 12) Precalentamiento de aire y del agua.
- 13) Accesorios de la caldera.

4.1. NECESIDADES DEL SERVICIO

Un generador de vapor para central termoeléctrica de servicio público, se diseña sobre la base del costo total de la producción de electricidad. Opera con coeficientes de evaporación estrictamente controlados y un ciclo

normal de carga que se rige por una norma establecida y generalmente previsible.

La caldera de una planta industrial, por otra parte, representa solamente una fase, si bien importante, en el proceso de fabricación del artículo terminado. Con frecuencia necesita desarrollar un trabajo más difícil, bajo condiciones desfavorables de demanda de vapor, agua suministrada y combustible utilizado, que la caldera de una central termoelectrica. La carga de vapor de una planta industrial, puede ser completamente imprevisible; aumentar repentinamente, bajar sin prevención alguna o fluctuar continuamente oscilando entre los extremos de carga máxima y mínima. El agua de alimentación y el combustible son frecuentemente de mala calidad.

4.1.1. CARACTERISTICAS DE LA CARGA

Para el diseño de una unidad generadora de vapor, es necesario determinar las siguientes características de la carga:

- 1) Carga mínima, normal y máxima.
- 2) Duración de cada una de esas fases de la carga.
- 3) Factor de la carga.
- 4) Naturaleza de la carga, constante o intermitente.

El diseño determinará la capacidad de la caldera para sostener una carga normal con una eficiencia alta, así como para responder a una demanda alta y los cambios bruscos de la carga. Determinará también las pérdidas por trabajo en vacío y la rapidez con la que la unidad puede calentarse hasta hacer vapor a su plena capacidad.

4.1.2. CARACTERISTICAS DEL COMBUSTIBLE

Las bases para el diseño de los mecanismos destinados a quemar son determinados por las cualidades del ó de los combustibles que han de emplearse. El diseñador tiene que considerar no solamente la clase de combustible que se puede obtener, sino también su poder calorífico y sus

propiedades. Debe también investigar las propiedades de las cenizas, incluyendo:

- 1) Punto de fusión de las cenizas.
- 2) Pérdidas por combustible no quemado (carbón en la ceniza suelta y en los desperdicios).
- 3) La presencia de azufre, vanadio y otros elementos extraños.

4.1.3 SISTEMA DE COMBUSTION

El tipo de equipo para quemar el combustible y el método de su aplicación, impone las condiciones para el diseño del hogar en mayor grado; y en proporción menor también para el diseño de la caldera. Los combustibles sólidos se queman en hogares mecánicos o en parrillas, en forma de polvo o triturados. Los quemadores de aceite combustible se obtienen en numerosos tipos que incluyen:

- 1) Vaporización.
- 2) Rotatorios.
- 3) De cañón.
- 4) Atomización por vapor o por aire.

La capacidad del equipo de combustión o el tamaño de la parrilla, determina la cantidad de combustible aplicable. Cada método de combustión tiene sus propias necesidades y peculiaridades de diseño. Los quemadores de aceite combustible, que son más pequeños, requieren una cámara de combustión. Algunos quemadores mecánicos de combustible sólido, precisan de un enfriador de escorias; otros necesitan medios auxiliares para prevenir la coquización del combustible y las dificultades provenientes de la conversión de cenizas en la escoria.

4.1.4 FLUJO DE LOS GASES

Para mantener la combustión es indispensable suministrar aire y desfogar los productos de la combustión. La corriente necesaria de los gases es

originada por la diferencia de presiones entre el hogar y el punto de escape de los gases de la caldera, o sea el tiro; éste se puede conseguir por medios naturales (efecto de chimenea) o por medios mecánicos (ventiladores). El tiro por elementos mecánicos puede ser originado por ventiladores de tiro forzado, de tiro inducido, o de ambas a la vez.

En adición a las necesidades teóricas, es indispensable suministrar exceso de aire, para asegurar una cantidad suficiente de oxígeno para la combustión. Este excedente puede variar, de un porcentaje abajo del 10% para quemar carbón pulverizado, hasta 50% para alimentador de carbón o 100% para alimentación manual de combustible. El porcentaje del exceso de aire tiene influencia sobre la capacidad de la caldera, la temperatura del hogar y la eficiencia total de la unidad.

Los dispositivos del tiro comprenden el aire primario, el aire secundario, así como los aditamentos para su correcta regulación y proporciones. La mezcla íntima del combustible con el aire, es auxiliada en algunos casos utilizando aire adicional por encima del fuego, cuando se opera con inyectores de aire o de vapor.

Unidades de alta eficiencia requieren el precalentamiento del aire de la combustión, quedando la temperatura limitada únicamente por la capacidad del equipo de combustión.

La resistencia por fricción crea una caída de presión a través de la unidad, que determina la magnitud del tiro. Con regímenes de combustión altos, las necesidades de tiro aumentan, requiriéndose motores más grandes para los ventiladores o chimeneas de mayor altura. Si la proporción de combustión es extrema, una cantidad de combustible es arrastrada a través de los pasos de la caldera y descargada por la chimenea. Si el humo, cenizas u hollín constituyen una molestia, será necesario instalar colectores de cenizas o modificar el método de combustión.

4.1.5. AGUA DE ALIMENTACION

El agua que se introduce a la caldera para ser convertida en vapor, recibe el nombre de agua de alimentación. Si se trata de condensado que es recirculado, habrá pocos problemas. Pero si es agua cruda, probablemente habrá necesidad de liberarla de oxígeno, precipitados, sólidos en suspensión, sustancias incrustantes y otros elementos contaminantes. La presencia de ingredientes que provocan la formación de incrustaciones, espumas o arrastre de agua con el vapor, afectarán desfavorablemente, en todos los casos, el funcionamiento de la caldera. Para obtener eficiencias altas, el agua de alimentación es calentada, generalmente, por medio de economizadores.

4.1.6 HOGAR

La proporción de calor liberado y la temperatura sostenida del hogar, afectarán a los materiales de las paredes del mismo y con tal motivo rigen su construcción. Si la temperatura o la erosión provocan una destrucción prematura de las paredes refractarias, lo indicado será colocar paredes enfriadas por agua. La cámara de combustión debe tener el espacio suficiente para contener la flama. La forma del hogar se guía por el tipo de combustible a emplear y por el método seguido para quemarlo. Es necesario tomar las debidas providencias para mantener la ignición y la combustión de los gases volátiles.

4.1.7. FONDO DEL HOGAR

La recolección y el retiro de las cenizas de una unidad alimentada con carbón mineral, es una operación laboriosa. Los desechos pueden ser removidos a mano en las calderas pequeñas o recolectados en tolvas en las grandes. En algunas calderas de gran tamaño, es desfogada la escoria fundida por sangrías. Para el manejo de las cenizas se usan botes, carretillas de mano, camiones, góndolas de ferrocarril ó transportadores neumáticos. La ceniza que se retira puede ser seca o apagada (mojada).

CAPITULO 5

EQUIPO AUXILIAR EN LA GENERACION DE VAPOR

5. EQUIPO AUXILIAR EN LA GENERACION DE VAPOR

El calor, aplicado al agua contenida en un depósito cerrado, la transforma en vapor. En tanto permanezca cierta cantidad de líquido en el recipiente, la temperatura del agua y la del vapor permanecerán iguales y sustancialmente constantes, manteniéndose el vapor en estado húmedo, o sea, en estado de saturación. La temperatura del vapor será determinada por su presión, ya que para cada presión de vapor saturado hay una temperatura correspondiente. La cantidad de calor agregada a determinada unidad de peso de agua, es también constante para una presión dada de vapor saturado. Una vez que toda el agua se ha evaporado, o cuando el vapor se retira del contacto con el líquido, el suministro adicional de calor aumentará su temperatura de acuerdo con las leyes que rigen para los gases.

La producción de vapor a temperaturas mayores que la de saturación, recibe el nombre de sobrecalentamiento. La temperatura agregada se llama el grado de sobrecalentamiento.

El trabajo teórico obtenible del vapor, utilizado como elemento motriz primario en una turbina, equivale a la diferencia de su contenido total de calor (entalpía), partiendo del momento de su entrada hasta el instante de su salida por el escape. El calor realmente obtenible, se rige por la eficiencia del medio mecánico utilizado para convertir la energía calorífica en movimiento mecánico.

5.1. SOBRECALENTADORES, RECALENTADORES

El sobrecalentador y el recalentador tienen una función semejante, ya que sirven para elevar la temperatura del vapor. En el sobrecalentador, el vapor llega directamente de la superficie principal de calefacción de la caldera; en el recalentamiento el vapor que llega, proviene del retorno (salida) de la turbina. Como el recalentador es propiamente una forma de sobrecalentador, se le considerará como tal. Las dos clases generales de sobrecalentadores, son:

- 1) Aquellos que forman parte integral con las unidades

generadoras de vapor.

2) Aquellos que tienen un hogar especial.

5.1.1. SOBRECALENTAMIENTO

El vapor sobrecalentado no tiene arrastres de humedad; en consecuencia, es menos abrasivo y corrosivo que el vapor saturado húmedo, que contiene gotitas y neblinas de agua. Para el impulso de una turbina, la condición de sequedad es imperativa; para máquinas de vapor de émbolo, es deseable. Los constructores de turbina prefieren mantener el vapor húmedo del escape con un contenido de humedad de menos del 15% (calidad del vapor del 85%). En cuanto aumenta la humedad, baja la eficiencia de la turbina y la abrasión de las paletas aumenta.

Además, el uso de vapor sobrecalentado en turbinas primarias, permite el desarrollo del trabajo dentro de la gama del sobrecalentamiento, antes de que se inicie la condensación. De esta manera se aumenta la eficiencia de la utilización del vapor. Con el uso del vapor sobrecalentado, se mejorará la relación de calor de una planta en más o menos 1% por cada 100°F (56°C) de sobrecalentamiento.

5.1.1.1. SOBRECALENTADORES

Formado por un sistema de tubos que se interponen al paso de los gases, el sobrecalentador es el elemento importante de la unidad generadora al que se le inyecta vapor saturado de la caldera misma, de modo que el vapor recibe una cantidad adicional de calor, que procede de los gases de combustión. Esta transferencia de calor eleva la temperatura del vapor y aumenta su volumen.

5.1.2. RECALENTAMIENTO

El vapor, al trabajar en una máquina o en una turbina, se expande, baja de presión y pierde calor. A consecuencia de esta pérdida de temperatura, el vapor descenderá pronto hasta el punto de saturación, si el sobrecalentamiento

fue insuficiente. Para evitar esta posibilidad, las turbinas se diseñan actualmente de tal manera, que el vapor es regresado para su recalentamiento antes de pasar a las etapas finales de la turbina. La tendencia de la construcción actual, es intercalar un ciclo de recalentamiento para cada instalación, excepto en las de presiones supercríticas, en las que se trabaja con dos ciclos de recalentamiento.

Es preferible recalentar y no tratar de elevar demasiado la temperatura inicial.

Arriba de 399°C (750°F), el calor recuperado por el recalentamiento es de $4\frac{1}{2}$ a 5%. Hay una pérdida de compensación de cerca de 1% por cada 10% de caída de presión a través del sistema de recalentamiento.

5.1.2.1. RECALENTADORES

El recalentamiento se logra por medio de dispositivos llamados recalentadores, (especie de sobrecalentadores). Los sistemas de recalentamiento generalmente regresan el vapor aproximadamente a la misma temperatura a la que lo suministra el sobrecalentador; sin embargo, la presión del vapor regresado es mucho más baja.

El ciclo de recalentamiento es favorable en la operación de las centrales de fuerza, por las siguientes razones:

- 1) Elevación de la eficiencia térmica.
- 2) Ahorro en la fuerza de bombeo de agua de alimentación, de 15 a 18%.
- 3) El tamaño del condensador se reduce entre 7 y 8%.
- 4) Se reduce el tamaño del generador de vapor principal, en vista de que el flujo de vapor disminuye entre el 15 y el 18%.
- 5) El tamaño del equipo de combustión se reduce en 5% aproximadamente.
- 6) La humedad en el escape de la turbina se reduce hasta en

un 50%.

- 7) El equipo para calentamiento del agua de alimentación se reduce en tamaño.
- 8) Se pueden hacer modificaciones deseables a la turbina.
- 9) Diseño sencillo y fácil operación.
- 10) La seguridad del servicio del equipo no se reduce.
- 11) Se requiere menos trabajo de mantenimiento para el equipo de recalentamiento, que para cualquier otro equipo de la caldera.

Las desventajas del sistema de recalentamiento, son las siguientes:

- 1) Aumento en la inversión inicial.
- 2) Mayor costo de la turbina de vapor.
- 3) El control y la operación ligeramente más complicados.
- 4) Se requiere mayor superficie de piso para la instalación de la turbina.
- 5) Sistemas complicados de válvulas y tubería (incluyendo las previsiones tomadas para la flexibilidad).
- 6) Se requiere un alto aprovechamiento de la unidad, si es que ha de alcanzar los ahorros relacionados con el ciclo de recalentamiento.

5.2. ECONOMIZADORES Y CALENTADORES DE AIRE

Para aprovechar la mayor cantidad posible de calor de los gases de combustión, se acostumbra instalar equipo de recuperación. En este equipo, que forma parte del total del sistema completo de una unidad generadora de vapor, se utilizan los gases de la combustión, y funciona:

- 1) Como un economizador, cuando se calienta el agua de alimentación.
- 2) Como un calentador de aire, cuando calienta el aire para la combustión.

5.2.1. RECUPERACION DE CALOR

Se obtiene una economía de 1% por cada 15.6°C (28°F) de reducción en la temperatura (basado en carbón con un valor calorífico de 7210 Kcal/kg -13000 Btu/lb- y 13% de CO₂). Si se aprovecha una gran parte del calor contenido en los gases, una vez que éstos han abandonado las zonas de combustión de la caldera, la eficiencia general aumenta de 3 a 5%. Además, si se varía convenientemente la proporción de la combustión, se obtendrá una mayor eficiencia y el correspondiente aumento de la capacidad, con un mínimo gasto adicional de combustible. La recuperación del calor, a pesar de ser de menor importancia, es un factor importante dentro del cuadro general de la planta generadora de vapor.

La reducción de la temperatura de los gases hasta 149°C (300°F) o menos, solamente resulta práctica mediante el empleo de economizadores y calentadores de aire, con lo cual se llega a obtener eficiencias de 88 y 90%.

5.2.2. APLICACION DEL EQUIPO DE RECUPERACION DE CALOR

Usualmente se coloca el calentador de aire después del economizador. Ocasionalmente se llega a montar el calentador de aire entre dos secciones del economizador, pero nunca se le coloca antes de éste. La instalación incluye un colector de polvo (cenizas volátiles) que se sitúa:

- 1) Antes del economizador.
- 2) Entre el economizador y el precalentador de aire o
- 3) Después del precalentador de aire.

Se utiliza un ventilador de tiro inducido junto con el economizador y el precalentador de aire. Para este último se requiere también un ventilador de tiro forzado. En los equipos de menor tamaño se agrega una derivación alrededor del equipo de recuperación de calor y del ventilador de tiro inducido, para que sirva como puente, con el objeto de trabajar con tiro natural de chimenea en caso de emergencia.

Los ventiladores de tiro forzado e inducido se colocan a la altura del piso o en la parte superior de la caldera. Los elementos de soporte de estos últimos, independientes de los de la caldera, pueden sujetarse ya sea en el techo o en el piso.

5.2.2.1. ECONOMIZADORES

En una unidad generadora de vapor, el economizador representa una sección independiente de superficie de intercambio de calor, destinada a recuperar calor de desperdicio de los gases de escape, para retornarlo, en forma de calor útil, al agua de alimentación, antes de que ésta se mezcle con el agua que circula en la caldera. Este calor recuperado que se agrega al del sistema, mejora la economía de la unidad y de este hecho se deriva su denominación de economizador. El economizador puede definirse como un aditamento de recuperación de calor, diseñado para transmitir calor de los productos de combustión a un fluido, generalmente agua. Su empleo se justifica únicamente cuando tiene la aptitud de absorber calor con mayor economía que otros de superficie de calefacción. Usualmente no se produce vapor en el economizador.

El economizador está formado por una sección de tubos, a través de los cuales pasa el agua de alimentación justamente antes de inyectarla a la caldera. Los gases de combustión, al abandonar las superficies de convección de la caldera, pasan por los tubos del economizador y de esta manera calientan el agua de alimentación.

Como el agua de alimentación tiene al entrar al economizador una temperatura más baja que la del vapor que se encuentra en la caldera, la transmisión de calor en esta sección es más efectiva que en las superficies de convección de la caldera. Este hecho ha dado motivo a la tendencia actual en el diseño de calderas, de aumentar la superficie del economizador, con la correspondiente reducción de la superficie del generador de vapor.

Comparado con el precalentador de aire, el economizador tiene las siguientes ventajas:

- 1) Su costo inicial es más favorable en las instalaciones pequeñas, así como en las unidades que operan a presiones de vapor bajas.
- 2) Se requiere menos fuerza auxiliar.
- 3) Su acción acumulante de calor facilita una evaporación más rápida cuando se trabaja en ciclos alternados de arranque y paro.
- 4) Su espacio requerido es menor para una capacidad determinada.
- 5) La carga sobre el hogar y el equipo de combustión que se deriva de su operación es reducida.

Los economizadores son de:

- 1) Tipo integral.
- 2) Tipo adyacente.

5.2.2.2. CALENTADORES DE AIRE

El calentador de aire es un aparato de intercambio de calor, a través del cual se pasa el aire que es calentado por medios cuya temperatura es mayor, tales como los productos que proceden de la combustión, o por medio de vapor. Se le utiliza para la recuperación de calor de los gases de escape en una unidad generadora de vapor; ocasionalmente se le utiliza para extraer calor de alguna otra fuente. Este calor recuperado:

- 1) Se agrega al aire requerido para la combustión, o
- 2) Se usa para secado u otros procesos.

Las unidades empleadas para calentar el aire de la combustión en las plantas generadoras de vapor, se designan con el nombre alternativo de precalentadores de aire. El precalentador de aire se compone, en lo esencial, de una superficie de intercambio de calor instalada en el curso de la corriente de los gases de escape de combustión procedentes de la caldera, entre ésta y la chimenea, o entre el economizador (si lo hay) y la chimenea. El aire para la combustión es calentado por los gases de escape, al ser

empujado a través del calentador por medio de un ventilador de tiro forzado.

El precalentador de aire no es un aditamento absolutamente necesario para la operación de una planta generadora de vapor.

Las principales consideraciones técnicas para su instalación comprenden:

- 1) El espacio disponible.
- 2) Características del combustible.
- 3) La temperatura a la que se desea precalentar el aire y la temperatura final de los gases de escape.

La eficiencia alta y las características óptimas de operación en las grandes plantas generadoras de vapor, se obtienen únicamente por medio del calentador de aire. Aunque el calentador de aire no es una cosa esencial para las calderas chicas con alimentador mecánico de carbón, las unidades más grandes con alimentador para quemar carbón bituminoso (que por lo general no trabajan con economizadores), pueden justificar el uso de aire precalentado para la combustión sobre la base de una operación más eficiente. El alimentador mecánico de carbón y la parrilla del hogar, tienen que diseñarse, sin embargo, para trabajar a altas temperaturas para el caso. En el proceso de molienda para carbón pulverizado, se requiere el aire caliente para el secado y para transporte del combustible. El desarrollo de las paredes de hogar con enfriamiento de agua, precisa forzosamente de altas temperaturas de precalentamiento de aire.

Una reducción de la temperatura de los gases de escape en 56°C (100°F), elevará la eficiencia general de la planta en un 2.3 a 2.6%. Un precalentamiento de 56°C (100°F) del aire de la combustión, da por resultado un aumento del 2% de la eficiencia. Los ahorros totales de combustible, atribuibles al precalentamiento de aire, fluctúan entre el 5 y el 10%. El aumento de la eficiencia no procede únicamente del calor que se recupera de los gases de escape, sino también de las condiciones de combustión, que son mejoradas.

Los precalentadores intermedios (colocados entre las secciones del economizador), proporcionan aire primario de 371°C (700°F) para ser utilizado con carbón pulverizado de alto contenido de humedad (que con frecuencia excede del 20%).

El aire absorbe el calor con más lentitud que el agua y en consecuencia, el calentador de aire requiere mayor superficie de calefacción, por cuyo motivo ocupa un espacio más grande que el economizador. A pesar de todo, es de diseño más simple y su peso es menor que el del economizador, por dos razones:

- 1) La temperatura de entrada del aire es menor que la del agua que entra al economizador.
- 2) El economizador trabaja con agua a presiones altas, mientras que el diferencial de presión del precalentador de aire es a lo más de 0.53 kg/cm²g (3/4 lb/plg²g). Aún cuando su superficie de calefacción es mayor, la construcción es de costo relativamente bajo.

Además de las ventajas generales obtenidas con el empleo del equipo de recuperación de calor, los precalentadores de aire ofrecen las siguientes características, altamente deseables:

- 1) La eficiencia de la combustión mejora, porque ésta es casi completa con menor cantidad de aire de exceso.
- 2) La ayuda a la estabilización de la ignición con cargas bajas.
- 3) La aceleración de la ignición, que permite mayor flexibilidad en la carga.
- 4) La aceleración de la combustión, que permite la reducción del tamaño del hogar, o en su defecto una mayor liberación de calor para un volumen determinado.
- 5) Temperaturas más elevada en el hogar, lo que permite un coeficiente más elevado de absorción de calor, con el consiguiente aumento en la producción de vapor.
- 6) Un aumento de la eficiencia general de la caldera, a consecuencia del mejoramiento de la combustión y

temperatura de los gases de escape, que permite la reducción de la superficie de calefacción de la caldera.

- 7) Si el total del calor recuperable es mayor que el que se puede aprovechar para el calentamiento del agua de alimentación, el calor remanente se puede emplear para calentar el aire necesario para la combustión.
- 8) El carbón puede ser secado durante la pulverización, permitiendo su fácil transporte, alimentación y combustión.
- 9) Entre mayor sea el precalentamiento, menor será el contenido de SO_3 en los gases de escape, lográndose menor temperatura en la chimenea y un aprovechamiento mayor del calor.
- 10) La combustión más completa del combustible reduce los períodos de paro de la caldera para su limpieza, dando por resultado que la producción de escorias sea menor y que los gases que llegan a los colectores de cenizas volátiles vayan más limpios.
- 11) El aire caliente ayuda al secado y apoya la ignición de los desperdicios húmedos tales como los combustibles de bajo grado, como son los desechos de los aserraderos y fábricas de papel, madera, lignitos, turba, bagazo, y productos similares.
- 12) El aire caliente puede utilizarse para calefacción de locales, secado de productos y otras aplicaciones similares.

Las desventajas de los precalentadores de aire, incluyen lo siguiente:

- 1) El precalentamiento del aire aumenta los costos de mantenimiento de la chimenea y de los materiales refractarios del hogar.
- 2) Los depósitos de combustible que se forman, pueden incendiarse, causando daños considerables.
- 3) Las oclusiones pueden afectar seriamente la operación de

la unidad generadora de vapor.

- 4) Las necesidades del espacio requerido y del peso para el precalentador, para el ventilador de tiro forzado, así como los ductos requeridos, imponen problemas de diseño que requieren un estudio cuidadoso.
- 5) Las fugas de aire pueden descompensar la capacidad de calefacción, necesitándose una compensación mediante el aumento de fuerza para el ventilador.
- 6) Las fugas no se perciben usualmente, sino cuando la corrosión está muy avanzada, requiriéndose una reparación considerable o la total reposición.

Clasificaciones. Los calentadores de aire se pueden clasificar de acuerdo con su principio de operación, de la manera siguiente:

- 1) Calentadores recuperativos.
 - a) Precalentadores a base de los gases de escape
 - Precalentador de aire del tipo tubular
 - Calentador de aire por celdas
 - b) Calentador de serpentín de cobre
 - c) Calentador de hogar individual (con calefacción por separado)
- 2) Calentadores regenerativos.
 - a) Precalentador de aire del tipo rotatorio, regenerativo
 - b) Calentador a base de guijarros
 - c) Calentador de tiro a base de material refractario
 - d) Precalentador de aire a base de líquido térmico

Para la recuperación de calor de los gases de escape en los generadores de vapor, los precalentadores de aire más popularizados (indicados en el orden de importancia en uso), son los siguientes:

- 1) Precalentadores de aire del tipo rotatorio regenerativo.
- 2) Precalentadores tubulares.
- 3) Precalentadores de aire por celdas.
- 4) Precalentadores de aire de serpentín de vapor.

CAPITULO 6

INSTRUMENTACION DE LAS PLANTAS GENERADORAS DE VAPOR

6. INSTRUMENTACION DE LAS PLANTAS GENERADORAS DE VAPOR

El equipo auxiliar de las calderas son aparatos o dispositivos, accesorios o armaduras que están íntimamente ligados, ya sea con la caldera misma, o con su operación o mantenimiento. Son indispensables para la seguridad, para la economía y para la comodidad. El término equipo auxiliar incluye el conjunto en general a diferencia de las llamadas armaduras (o conexiones), que comprenden aquellas partes directamente conectadas a la caldera o dentro de la misma.

Las armaduras externas incluyen los indicadores de nivel y válvulas de prueba, drenes y válvulas de purga (de la superficie y del fondo), válvulas de seguridad o de alivio, válvulas de ventilación (purga de aire) y trampas de vapor, conexiones para muestras de agua, válvulas de retención (protección contra retroceso), tapones fusibles, silbatos, sopladores de hollín e inyectores de aire por encima del fuego.

Entre los accesorios de medición para el control de las condiciones de operación de la caldera, están incluidos los manómetros, indicadores del nivel del agua, termómetros, medidores de flujo para vapor y aparatos de alarma. También está comprendido el equipo de control para la combustión y dispositivos de medición correspondientes. Los aparatos de seguridad protegen la caldera contra bajo nivel de agua, altas temperaturas y alta presión (válvulas de seguridad para el vapor; para el agua, válvulas de alivio).

En el equipo de las calderas dispuestas para quemar aceite combustible o gas, están incluidos:

- 1) Para vapor, un manómetro y válvulas, una columna de agua con sus conexiones, o un indicador de nivel por separado, con sus válvulas, válvulas de prueba y una válvula de seguridad.
- 2) Para agua caliente, un manómetro, un indicador de nivel y un termómetro. La válvula de alivio no está incluida en

los calentadores de agua, salvo que se especifique en la orden. Las calderas para agua caliente alimentadas por combustibles sólidos, se suministran con un regulador de tiro.

6.1. ARMADURAS PARA CALDERAS

6.1.1. VALVULAS DE SEGURIDAD Y DE ALIVIO

Es absolutamente necesario dotar a la caldera de un dispositivo de protección que prevenga el aumento de presión más allá de la presión de diseño. Entre los dispositivos propios de las calderas automáticas, quedan comprendidos los siguientes:

- 1) Válvulas de seguridad (para calderas de vapor). Cuando la presión alcanza un punto predeterminado, la válvula queda completamente abierta y permanece así hasta que baja nuevamente la presión.
- 2) Válvulas de alivio, de seguridad (para calderas de agua caliente). Una vez que la presión llega a un punto predeterminado, la válvula se abre ligeramente, dejando pasar cierta cantidad de líquido; si la presión continúa aumentando, la válvula se dispara quedando completamente abierta.
- 3) Válvulas de alivio para presión y temperatura (para calentadores de agua). Al llegar la presión al punto predeterminado, la válvula se abre ligeramente, dejando pasar líquido; o si la temperatura alcanza el punto de ebullición, se abre la válvula o bien se funde un elemento fusible.

Las válvulas de seguridad de tamaños mayores se colocan a la intemperie, uniéndolas por tubería a la caldera. Todas las válvulas de alivio se instalan en un lugar en donde no lleguen a quemar al personal de servicio.

Solamente pueden emplearse válvulas de seguridad aprobadas por el National Board. Para obtener la aprobación correspondiente, tiene que ser aprobado el aparato por el National Board; o si se trata de válvulas de alivio para presión y temperatura, la prueba es hecha en los laboratorios de AGA.

6.1.2. INTERRUPTORES DE BAJO NIVEL

Todas las calderas de operación automática tienen que estar equipadas con un interruptor de bajo nivel de agua, el cual impide el funcionamiento del quemador, mientras no haya suficiente agua en la caldera. Muchas calderas para agua caliente son equipadas también con interruptores de bajo nivel. Un modelo tipo de este dispositivo consiste en un flotador que actúa sobre un interruptor eléctrico. El interruptor puede ser instalado dentro de la columna de agua o dentro de la caldera misma. Puede incluirse igualmente un interruptor de alarma. Todas las unidades están provistas de una válvula de purga para lavar los sedimentos recolectados.

6.1.3. ALIMENTADORES DE AGUA

La alimentación automática del agua a la caldera, siempre que el nivel desciende hasta una altura determinada, entra en acción. Con presiones de menos de $17.6 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ ($250 \text{ lb/plg}^2\text{g}$) se emplea frecuentemente una válvula de flotador, que usualmente opera con el interruptor de bajo nivel. Para las presiones más altas, se hizo necesario recurrir a la expansión de un tubo (al entrar en contacto con el vapor) para el accionamiento del aparato. En algunas unidades se combinan el interruptor de bajo nivel y la bomba del agua de alimentación y son del tipo de electrodos, que se hacen pasar corriente eléctrica a través del agua de la caldera.

6.1.4. INDICADORES DEL NIVEL DEL AGUA

Todas las calderas de vapor están equipadas con un indicador de nivel del agua que permite la observación visual de la cantidad de agua que contiene la caldera. El diseño de estos indicadores depende de la presión a la que se

les somete. Están dotados de válvulas de oclusión (algunos tipos trabajan automáticamente, cerrándose en caso de la ruptura del vidrio) y válvulas de drenado.

6.1.5. VALVULAS DE PRUEBA

Se colocan válvulas de prueba a tres niveles diferentes del indicador de nivel, lo que permite al operador cerciorarse de que el nivel del agua en la caldera coincide con la indicación del tubo de vidrio.

6.2. EQUIPO AUXILIAR

6.2.1. PURGA

En las calderas en las que se requieren cantidades apreciables de agua de repuesto, se producirá un aumento gradual de las sedimentaciones de sales solubles en el agua de la caldera, salvo que el agua de alimentación sea sometida a un tratamiento previo, para remover todas las impurezas que la hacen dura. Estos sedimentos son eliminados por medio de la purga que tiene que efectuarse periódica o continuamente. El agua caliente se convertirá en vapor tan pronto como se le libere de la presión. Se acostumbra condensar este vapor y enfriar el agua antes de descargarla en el drenaje. Si se trata de purga proporcionar cierto precalentamiento al agua de alimentación.

En las calderas pequeñas únicamente se conecta una válvula para la conexión de manguera, para su drenado periódico, pero las calderas grande están equipadas con válvulas de purga cuidadosamente calculadas. Las calderas para generación de fuerza están dotadas de válvulas dobles, una de acción rápida para lograr la purga completa y una válvula de cierre positivo.

6.2.2. INSTRUMENTOS

Las calderas de vapor deben tener forzosamente un manómetro para la medición de la presión; las calderas para agua caliente necesitan manómetro y

termómetro. Otros accesorios complementarios pueden incluir un medidor de gasto para el agua de alimentación, medidor de flujo del vapor, termómetro para los gases de escape y otros instrumentos de control y medición. En las instalaciones grandes se cuenta con controles automáticos para el economizador, para el tratamiento del agua de alimentación, para el calentador del agua de alimentación, y para el calentador de aire, así como los controles de presión y temperatura del vapor.

Para la obtención de las más altas eficiencias, es preciso llevar un control absoluto sobre el proceso de la combustión. Este control está basado en las proporciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, o de oxígeno que hay en los gases de escape. La cantidad necesaria de aire para la combustión es ajustada para que el suministro de aire de exceso sea el mínimo necesario de acuerdo con el combustible, con los métodos de combustión y con el diseño de la caldera.

El Código ASME de Calderas recomienda, como mínimo, los siguientes instrumentos:

- 1) Medidor de presión de vapor.
- 2) Medidor de presión del agua de alimentación.
- 3) Medidor de tiro del horno.
- 4) Un medidor de presión a la salida del ventilador de tiro forzado y un medidor de presión a la salida del ventilador de tiro inducido.
- 5) Registrador de flujo del vapor para verificar la salida de la caldera.
- 6) Registrador de temperatura a la salida y entrada del sobrecalentador.
- 8) Registrador de temperatura a la salida y entrada de los calentadores de aire.
- 9) Termómetros indicando las temperaturas de vapor a la entrada y salida de los recalentadores de la caldera.
- 10) Registradores de temperatura del agua de alimentación para verificar el grado de desaeración y operación

del economizador.

- 11) Medidor de presión en los pulverizadores para verificar la presión diferencial de las mezclas combustible-aire de los quemadores.
- 12) Medidores de presión, para calderas que queman aceite, en las líneas de aceite a los quemadores y medidores de temperatura antes y después de cualquier precalentador de aceite.
- 13) Medidor de presión, para calderas que queman gas, en la línea principal de gas a los quemadores y en los quemadores individuales.

6.2.3. SOPLADORES PARA HOLLIN

Los ductos de paso, en el lado del fuego, tienen la tendencia a la acumulación de hollín y ceniza volátil. Para disgregar estos materiales producidos por la combustión, se emplean boquillas para lanzar chorros de aire o vapor, permanentemente instaladas.

6.2.4. TUBERIA PARA LA CALDERA

Es preciso, naturalmente, extraer el vapor o el agua caliente de la caldera. La tubería de conexión entre la caldera, el sobrecalentador y el economizador, deben tener la posibilidad de expandirse, sin someter a los componentes de la caldera a esfuerzos o deformaciones.

6.2.4.1. VALVULAS

Cada una de las conexiones de salida de vapor (o tomas de vapor) de una caldera debe equiparse con una válvula de oclusión, localizada en un lugar accesible de la línea de suministro de vapor y tan cerca de la tobera de la caldera como sea conveniente y practicable. Las únicas excepciones son:

- 1) La conexión de la válvula de escape.
- 2) La entrada y la salida del recalentador.

- 3) La entrada del sobrecalentador.
- 4) La entrada y la salida de los sobrecalentadores de fuego individual.
- 5) Instalación de caldera de calefacción sencilla.
- 6) Sistemas unitarios (caldera sencilla para cada turbina) en los que la válvula de estrangulamiento de la máquina primaria es adecuada.

Cuando se conectan varias calderas grandes, del tamaño suficiente para tener un registro de hombre, a una línea general común de vapor, tienen que ser equipadas con dos válvulas de oclusión, una de las cuales puede ser, de preferencia, del tipo automático de retención (no retroceso). Además de las válvulas de oclusión de la línea general de vapor, en las instalaciones grandes se colocan válvulas adicionales en las líneas de alimentación de maquinaria auxiliar y para el control del flujo de vapor al sobrecalentador.

6.2.4.2. TRAMPAS DE VAPOR

Algunas calderas tienen la tendencia a producir vapor húmedo. Si esto es inconveniente, se instala una trampa de vapor en la línea de alimentación del mismo, ya sea junto a la caldera o en el extremo final de la línea general.

6.2.4.3. AMORTIGUADORES DE ESCAPE

Las industrias de proceso que utilizan grandes cantidades de vapor, pero a cargas variables, se ven obligadas a dejar escapar el vapor a la atmósfera durante los cambios bruscos de la carga de la caldera. Para amortiguar el ruido producido por estas descargas se emplean los amortiguadores de escape.

6.2.5. SILBATOS

En las fábricas pueden instalarse silbatos operados por vapor. Estos silbatos se usan para dar señales de entrada y salida del trabajo o como sistema de alarma en caso de incendio, nivel bajo y otras situaciones de

emergencia. En los barcos se emplean para dar señales de navegación, que no solamente se perciben por audición, sino que son visibles, ya que la salida del vapor puede ser vista.

6.2.6. TRATAMIENTO DEL AGUA DE ALIMENTACION

La precipitación de sales sobre las superficies sujetas a calefacción del lado en contacto con el agua, ocasiona averías en la caldera; las turbinas de alta presión quedan expuestas a las consecuencias del arrastre de sílice por el vapor. Para contrarrestar lo anterior, especialmente en aquellas plantas que tienen un alto consumo de agua de alimentación, se acostumbra instalar equipos de tratamiento de agua, para desmineralizarla y desoxidarla antes de su inyección a la caldera.

6.2.7. INYECCION DEL AGUA DE ALIMENTACION

Todas las calderas necesitan el suministro de agua. Las calderas de calefacción pueden depender de la circulación por gravedad; sin embargo, hay la tendencia hacia la condensación o el empleo de bombas de vacío en los retornos de vapor y la instalación de circuladores en las calderas de agua caliente. Las calderas para generación de fuerza que trabajan a presiones hasta de 21 kg/cm²g (300 lb/plg²g), reciben la alimentación de agua por medio de bombas o inyectores. En las calderas grandes se emplean bombas de impulsores múltiples.

Es importante que durante una falla de la corriente eléctrica no se corte la alimentación del agua de la caldera, teniéndola que dejar fuera de servicio, con el consiguiente enfriamiento de la misma.

CAPITULO 7

CONTROLES PARA LAS PLANTAS GENERADORAS DE VAPOR

7. CONTROLES PARA LAS PLANTAS GENERADORAS DE VAPOR

Los controles en las calderas son extensamente usados para regular la presión del vapor y carga con el 1 o 2% de los puntos del diseño; niveles de agua en la cámara de vapor con 1 plg. del punto de ajuste, relación combustible-aire con el 5% de requisito de exceso de aire, y mucho más variables que pueden afectar la operación de una caldera o su seguridad. Una variedad de nuevos sensores se han desarrollado, tales como analizadores de oxígeno, y completos equipos de análisis del gas de chimenea para asistir al operador o asistencia a la operación de una caldera eficiente y segura.

Los sensores son mecanismos que tienen la capacidad inherente para monitorear cambios en el medio que está siendo medido, tales como temperatura, presión, flujo, nivel, tiro, porcentaje de CO_2 , y cantidades similares. Los transductores se usan para convertir los cambios registrados por un sensor a una señal eléctrica a neumática. Estas señales son enviadas a los controles, que son colocados para regular una cantidad con el punto de ajuste. Las señales se comparan a estos puntos de ajuste, y si es necesario, una señal se releva a un actuador para que el control del medio se mantenga con los establecidos puntos de ajuste. Algunos controles incorporan al sensor, transductor, y actuador en un mismo recipiente de mecanismo de control. Las calderas de paquete del tipo de tubos de humo generalmente provee una completa operación automática debido al uso de controles. El paquete estándar incluye un compacto gabinete de control conteniendo arracadores de motor, relevadores, interruptores, fusibles, transformadores de control, y controles de la flama. Los tableros luminosos indican la secuencia de operación y puede enlazarse con una estación remota o simplemente a un sistema de vigilancia. Las calderas de tubos de agua de paquete se diseñan para quemar gas o aceite y son instrumentadas para una operación automática básica a través de la tecnología de control. Sin embargo, la completa confianza en los controles automáticos sin pruebas periódicas y mantenimiento es peligroso. Los tubos en la caldera de tubos de agua se funden al sobrecalentamiento resultado de una combinación de sedimentos en los tubos y falla del corte de baja de agua para detener la entrada del combustible como el nivel de agua.

Los controles de seguridad generalmente son estas que limitan la entrada de energía y así parar al equipo cuando se desarrollan condiciones inseguras, son:

- 1) Interruptores de límite de presión o límite de temperatura.
- 2) Cortes de combustible de baja de agua.
- 3) Sistema de salvaguarda de falla de flama.
- 4) Controles de ignición automática.
- 5) Controles de válvula de corte de combustible gaseoso y aceite.
- 6) Controles de entrelazados de presión de combustible y aire.
- 7) Controles reguladores del agua de alimentación.

Los controles de seguridad protegen contra los siguientes riesgos:

- 1) Sobrepresión, principalmente explosiones del lado del agua o lado del vapor.
- 2) Sobrecalentamiento de las partes metálicas, también principalmente explosión en una caldera incendiada (principalmente debido a baja de agua o circulación pobre).
- 3) Explosiones del lado del fuego (explosiones del horno) debido a mezclas de combustible incontroladas en el lado del instrumentación de grandes calderas de paquete se incluyen un aparato Orsat para obtención de análisis del gas de salida y determinación de la eficiencia de combustión.

Aunque los fabricantes difieren en el enfoque, los siguientes factores pueden considerarse en cualquier control usado en una caldera:

- 1) Flujo y presión del vapor.
- 2) Tiro y presión del horno.
- 3) Flujo y presión del aire.
- 4) Flujo y presión del agua de alimentación (incluida la

baja de agua).

5) Composición y flujo del gas de salida.

6) Adecuada ignición y control de la flama del quemador.

7.1. CONTROL DEL SOBRECALENTAMIENTO

El funcionamiento de la turbina de vapor, de la máquina primaria o el equipo de proceso, es un factor relacionado directamente con el rendimiento del sobrecalentamiento. La turbina de vapor trabaja a su eficiencia máxima a una temperatura determinada constante. Igualmente, algunos procesos químicos requieren un control absoluto de la temperatura, dentro de límites muy estrechos; y por tal motivo, el control de la temperatura es un punto de mucha importancia en el diseño.

En una caldera equipada con un sobrecalentador integral, la dosificación de combustible se regula de manera que la presión del vapor se mantenga constante a la salida del sobrecalentador, independientemente de la carga. El diseñador debe tomar las providencias necesarias para que la temperatura permanezca también constante, a pesar de los cambios que se puedan registrar en el hogar y de las limitaciones derivadas de la relación entre el sobrecalentamiento por radiación y el originado por convección, detalles que deben quedar comprendidos dentro de las consideraciones del diseño.

En la práctica es difícil controlar el grado de sobrecalentamiento con la precisión que es de desearse. El logro de la temperatura plena del vapor con cargas parciales, origina complicaciones en el diseño. La formación de escorias en las superficies de la caldera ocasiona cambios de 11 a 17°C por cada 56°C (20 a 30°F por cada 100°F) de aumento en la temperatura de los gases de la chimenea. Las especificaciones de las normas para calderas de la ABMA, establecen una variación de 5.5°C (10°F) de la temperatura nominal del vapor. Con algunos sistemas de control, es posible mantener los cambios de temperatura dentro de un rango de $\pm 1.7^\circ\text{C}$ ($\pm 3^\circ\text{F}$).

Cuando la caldera está dotada de sobrecalentadores de vapor y

sobrecalentadores para el vapor de recalentamiento, los medios utilizados para los ajustes del control, deben cubrir las necesidades de ambos. Ningún hogar sencillo puede tener las características de temperatura requeridas para satisfacer las necesidades simultáneamente, de un sobrecalentador y un recalentador.

7.1.1. VARIANTES

Las fluctuaciones en la temperatura del sobrecalentador son causadas por diferentes variantes de la operación de la caldera:

7.1.1.1. CARGA

Una carga uniforme y continua se encuentra muy rara vez, excepto en unidades de gran capacidad y alta eficiencia, que tienen asignada una carga principal, mientras que las variaciones son absorbidas por otras unidades.

7.1.1.2. COMBUSTIBLE

La temperatura del vapor es afectada por cambios en el tipo de combustible, por las características de un combustible determinado, o bien por el método de combustión empleado.

7.1.1.3. OPERACION DE LOS QUEMADORES

El encendido y el apagado de los quemadores, el cambio de su ajuste o su inclinación, afectará usualmente la temperatura del vapor.

7.1.1.4. EXCESO DE AIRE

Los cambios de la cantidad de aire de exceso, afectarán la temperatura del vapor.

7.1.1.5. TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACION

El sobrecalentamiento aumenta si desciende la temperatura del agua de alimentación. Para determinado grado de combustión, la disminución de la temperatura del agua de alimentación reducirá la cantidad de vapor producida. El aumento de la cantidad de calor absorbida por unidad de vapor tendrá como resultado la elevación de la temperatura del sobrecalentador.

7.1.1.6. PURGA

La eliminación de calor por medio del purgado, aumenta la proporción de calor por unidad de vapor y el flujo de gas, con el consiguiente aumento de la temperatura del vapor.

7.1.1.7. EXTRACCION DE VAPOR SATURADO

El uso de vapor saturado para servicios auxiliares, aumenta la proporción de fuego por unidad de vapor y el flujo de la masa de gases, lo que eleva la temperatura del vapor.

7.1.1.8. LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE DE CALEFACCION

La limpieza de las superficies de la caldera antes del sobrecalentador, reducirá la temperatura de los gases, aumentando la producción de vapor. Esto reducirá el grado de sobrecalentamiento. La limpieza de las superficies del sobrecalentador, aumentará la absorción de calor, elevando la temperatura del vapor.

Todas estas fluctuaciones pueden ser compensadas por medio de ajustes o controles.

7.2. AJUSTES

Se da el nombre de ajuste a un cambio físico permanente ejecutado en el equipo. Los ajustes están destinados a compensar anticipadamente cualquier cambio de combustible u otro factor que difiera de las condiciones normales de operación; y comprenden lo siguiente:

- 1) Reducción de la superficie de convección en el frente del sobrecalentador, para elevar la temperatura del vapor (agregar superficie de convección es muy difícil y generalmente muy costoso y poco práctico).
- 2) Variando la efectividad de la superficie de absorción de calor, agregando o quitando material refractario de la superficie recubierta.
- 3) Mejorando el equipo de sopleteado de hollín y escorias, o variando el programa de trabajo.
- 4) Efectuando cambios en las mamparas, para variar el flujo de gas.

7.4. CONTROL

Para regular la temperatura del vapor, es necesario ejercer influencia sobre los cambios de carga y sobre las variantes de la operación. Si esto se hace sin modificar el equipo instalado, se le llama control. Aparte de las correcciones necesarias para la compensación de las variantes enumeradas arriba, es necesario también:

- 1) Calentar lentamente la turbina de vapor.
- 2) Compensar rápidamente la caída de temperatura del calentador del agua de alimentación.

Los cambios de carga se controlan variando el número de calderas que operan sobre la línea de alimentación, el número de quemadores en operación, o la cantidad de combustible que se alimenta para mantener la combustión.

Para mantener la temperatura deseada del vapor, se controlan las variantes de operación por medio de los métodos siguientes:

- Control del exceso de aire.
- Control por derivación en puente de los gases.
- Control mediante quemadores graduables.
- Control de sobrecalentadores combinados.
- Control de hogares gemelos, de combustión alternada (o diferencial).
- Sopleteadores para hollín, para control del sobrecalentamiento.
- Control de sobrecalentadores con fuego individual.

Otros medios que suelen usarse ocasionalmente para el control del sobrecalentador, comprenden los siguientes:

- 1) Recirculación de una parte del vapor sobrecalentado, regresándolo a los domos de vapor y de agua (en las calderas de circulación forzada, sistema Loeffler).
- 2) Aumento de la velocidad del vapor a través del sobrecalentador, mediante una bomba de recirculación.
- 3) Recalentamiento por medio de la mezcla de vapor sobrecalentado con el vapor procedente del retorno.

CAPITULO 8

DESCRIPCION DE LA PLANTA

GENERADORA DE VAPOR

A SIMULAR

8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA GENERADORA DE VAPOR A SIMILAR

8.1. CONTROL DE LA COMBUSTIÓN

Cuando un combustible se quema, los productos de la combustión, pueden presentarse junto con cualquiera de los otros gases, los cuales suben a la temperatura de flama determinada por el contenido de energía del combustible. Donde el calor de combustión está dado en Btu/lb o Btu/pie³, la cantidad real de combustible involucrado no afecta su temperatura de flama. Para estimar la temperatura de flama, se puede usar el calor sensible de cualquiera de los productos de la combustión o el combustible y el aire. La velocidad de calor generado por la combustión de un cierto flujo másico de combustible W_F , cuyo calor de combustión es H_C , es

$$Q = W_F H_C \quad (\text{Ecuación 8.1})$$

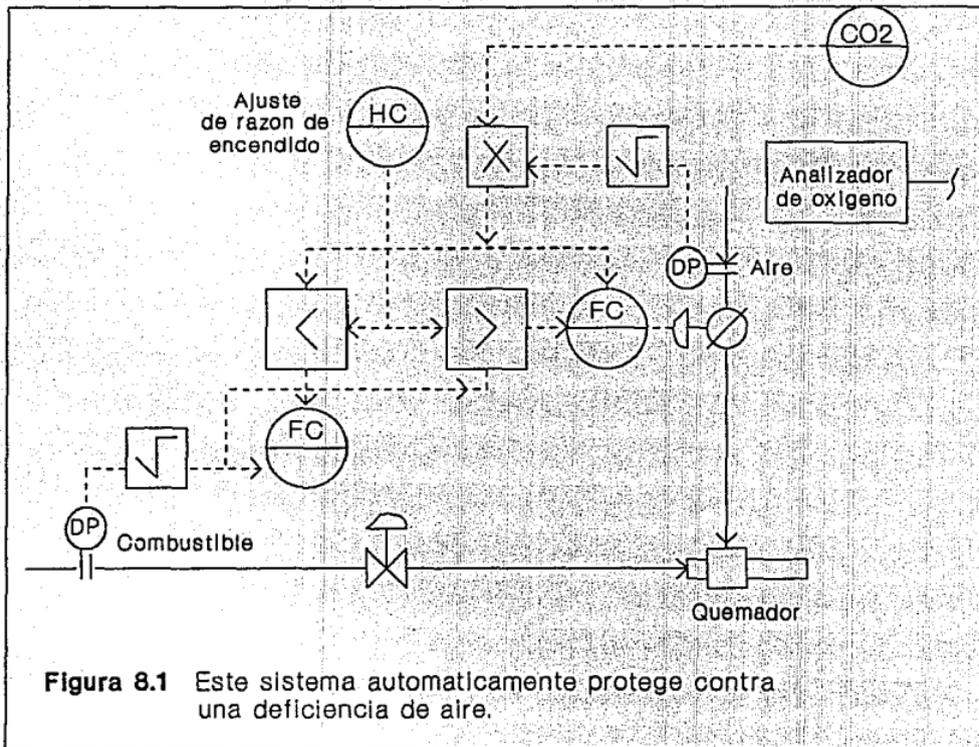
Este flujo de calor puede igualarse al que se necesita para elevar los flujos de combustible y aire W_A a la temperatura de flama T :

$$Q = W_F C_F (T - T_F) + W_A C_A (T - T_A) \quad (\text{Ecuación 8.2})$$

Los términos C_F , T_F , C_A y T_A representan el calor específico promedio y la temperatura de entrada del combustible y aire, respectivamente.

Para asegurar la combustión completa, puede seleccionarse una relación específica de aire-combustible K_A , basada en los constituyentes químicos del combustible. La sustitución de K_A por W_A/W_F permite la solución de las ecuaciones 8.1 y 8.2 para la temperatura de flama:

$$T = \frac{H_C + C_F T_F + K_A C_A T_A}{C_F + K_A C_A} \quad (\text{Ecuación 8.3})$$



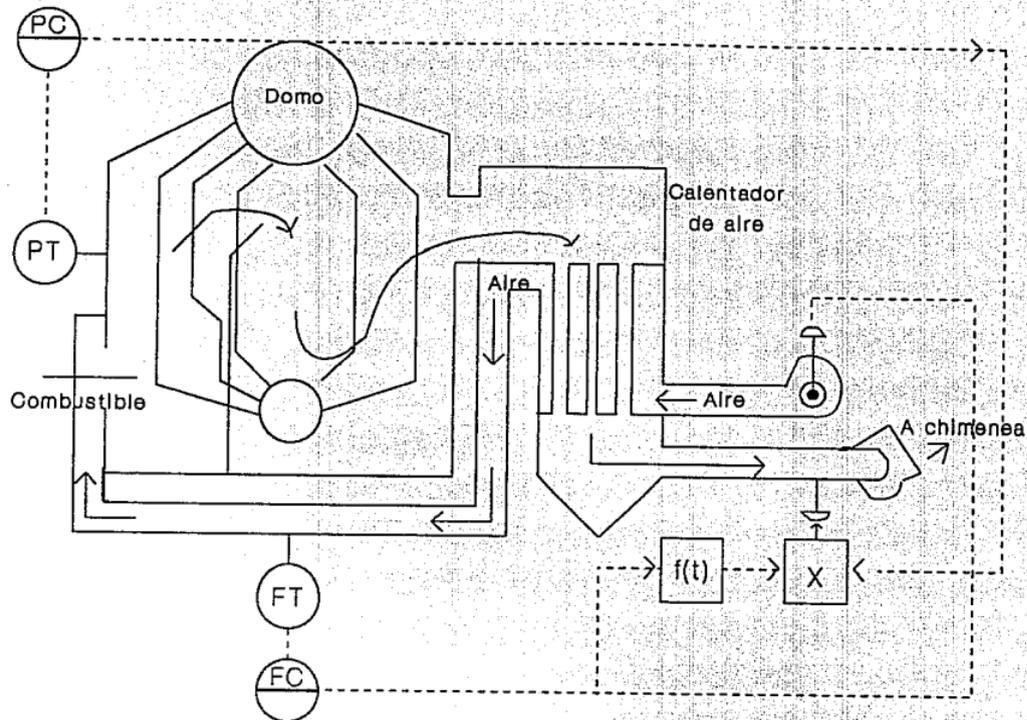


Figura 8.2 El controlador del flujo de aire manipula a ambos registros, para que la presión del horno no se sobreponga cuando se cambia el flujo de aire.

La ecuación puede ser usada para condiciones donde no se tenga un exceso de combustible. Porque el combustible es más caro que el aire, y debido a que la combustión incompleta puede producir hollín y monóxido de carbono, los hornos son invariablemente operados con exceso de aire. Pero aparentemente se alcanza la máxima temperatura de flama sólo aumentando el flujo de aire. La ecuación 8.3 también da una indicación del efecto que tiene la temperatura del aire en la flama. El nitrógeno, por supuesto, no participa en la combustión y actúa como un diluyente, reduciendo la temperatura de flama. Si se usa oxígeno en lugar de aire, se puede reducir cinco veces K_A , produciendo un efecto considerable en la temperatura de flama.

La temperatura de flama estimada con la ecuación 8.3 es mayor a la que realmente se mide, porque algo de la energía contenida en los productos de combustión se ioniza parcialmente. Esta ionización se incrementa con la temperatura, pero la energía se recupera cuando los iones se enfrían lo suficiente para regresar a su condición inicial (moléculas).

8.1.1. CONTROL DEL COMBUSTIBLE Y AIRE.

Puesto que la temperatura de flama disminuye con un exceso o una deficiencia de aire, no es una variable adecuada de control. La eficiencia de combustión más usada universalmente es una medición del contenido de oxígeno en los productos de la combustión. La cantidad de exceso de aire requerido para asegurar la combustión completa depende de la naturaleza del combustible. El gas natural, por ejemplo, puede quemarse eficientemente con el 5% de exceso de aire (0.9% de exceso de oxígeno), mientras que el aceite requiere 6% de exceso de aire (1.1% de exceso de oxígeno) y el carbón, 10% de exceso de aire (1.9% de exceso de oxígeno). La razón de las diferencias es el estado relativo del combustible.

Debido a que la cantidad de calor transferido por radiación varía con respecto a la temperatura de flama absoluta, la mayor eficiencia del horno siempre se realiza con la máxima temperatura de flama, pero también es importante la distribución del calor, ya que al incrementar la cantidad de

exceso de aire se reduce tanto la temperatura de flama, como la velocidad de transferencia de calor en los alrededores del quemador. Donde el flujo neto de potencia térmica no tiene cambio, pero la adicional velocidad de transferencia fuera del quemador se incrementa.

La seguridad marca ciertas precauciones de operación para los controles de combustible-aire. Una deficiencia de aire provoca que el combustible se acumule en el horno, que arriba de la ignición, puede explotar. Por lo tanto se debe asegurar que el flujo de combustible nunca exceda al permitido por las condiciones del flujo de aire dadas. Tanto el combustible como el flujo de aire pueden colocarse desde un control maestro de flujo, pero es necesaria la selección automática para alcanzar este aspecto de la seguridad. En la Fig. 8.1 se muestra un sistema para el control de combustible y aire.

Se observa que la relación de aire-combustible se ajusta por medio de la manipulación del aire con el analizador de oxígeno. Normalmente se puede elegir el punto de ajuste, acorde al sistema de selección que opere, los puntos de ajuste de ambos controladores pueden tener los mismos valores. Si hay pérdida de flujo de aire, su medición preferentemente se selecciona al menor punto de ajuste del flujo de combustible. Si el flujo de combustible es mayor que el de referencia, el flujo de aire aumenta automáticamente. El horno está protegido no solamente de falla del controlador sino también de retrasos en la respuesta del punto de ajuste de cualquier ciclo.

Los analizadores de monóxido de carbono están disponibles para monitoreo del gas combustible, su costo es considerablemente mayor y menos confiables que los analizadores de oxígeno, frecuentemente no usan ciclos de control cerrados pero pueden, junto con el análisis de oxígeno, indicar el aire que se infiltra corriente abajo de la zona de combustión, o que algunos quemadores operan con mezclas más ricas que otros.

Es común la interacción entre el flujo de aire y la presión del horno (tiro), especialmente donde se usan ambos ventiladores de tiro forzado y tiro inducido, como en la Fig. 8.2. Esta interacción, se resuelve mejor a través de

termóstato, donde el controlador de flujo registra a ambos. El controlador de presión ajusta el escape del tiro hasta igualar la presión con el punto de ajuste, balanceando la unidad. Los cambios subsecuentes en el flujo de aire pueden tener un pequeño efecto en la presión.

8.2. CALENTADORES A FUEGO

Los calentadores a fuego directo por la combustión de gas o aceite son comunes en las refinerías, particularmente donde se necesitan altas temperaturas. El problema de control es el manipuleo a velocidad del combustible para alcanzar la temperatura deseada de salida del fluido calentado. El aire entra hacia el quemador en proporción al combustible; por lo tanto, es inherente la regulación de su flujo.

Por causa de las grandes dimensiones de tubo encerrados en un calentador, el tiempo muerto puede ser del orden de minutos, variando con el flujo. Donde se enfrentan los repentinos cambios de carga, y es necesario el control cerrado de la temperatura de salida, en donde se manipula el flujo de combustible. Aunque la pérdida de calor fuera del recipiente puede ser significativa, varía directamente con la carga y puede fácilmente ubicarse por la acción del controlador de retroalimentación de la temperatura.

Otra alternativa sería la medición de la temperatura del gas de salida en la zona de convección, además de la sección radiante del calentador, la cual puede usarse como una variable de control secundaria, es sensible a las variaciones en la carga de calor y la respuesta mucho más rápida a la velocidad de arranque que la temperatura de salida del producto. El control en cascada de la temperatura del producto a la zona de convección o la temperatura de chimenea es más común que el control de retroalimentación de los calentadores a fuego directo.

En la mayoría de las refinerías, la composición del gas de salida varía debido a que contiene componentes como hidrógeno e hidrocarburos ligeros recuperados desde diversas operaciones, mezclados con gas natural. Son comunes

los disturbios a la transferencia de calor y la composición del gas de salida causada por estas variaciones.

8.3. SISTEMAS DE CONTROL DE LAS PLANTAS DE VAPOR

Para aplicar satisfactoriamente los controles a la generación de vapor, es esencial un completo conocimiento de sus propiedades termodinámicas. El punto más importante a considerar es que el vapor se valora por su contenido de trabajo, que es la capacidad para accionar turbinas, bombas de calor, movimiento de fluidos, etc. La presión se controla aplicando calor a las superficies de transferencia de calor de los evaporadores. El sobrecalentamiento se adiciona aplicando más calor al vapor después de que es removido del equilibrio con el agua en ebullición.

En el caso del vapor saturado, la presión y temperatura son dependientes de manera que cualquiera de los dos es capaz de indicar la densidad. Sin embargo, la presión es una función de la densidad:

$$W = k (h p)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 8.5})$$

donde

W = flujo másico

k = factor de escalamiento del orificio

h = presión diferencial a través del medidor de flujo

p = presión estática

La densidad del vapor sobrecalentado varía inversamente con la temperatura y directamente con la presión, haciendo más complicado y menos preciso el cálculo del flujo másico. Pero si se usa un medidor de flujo de vapor para indicar la entrega real de potencia térmica, aparece un fenómeno interesante: la temperatura causa que la entalpía del vapor sobrecalentado varíe de una manera que no afecta a la densidad. Así la potencia térmica Q sólo varía con la presión diferencial y la presión estática:

$$Q = W H = k H_0 (h p)^{1/2}$$

(Ecuación 8.6)

Los coeficientes H y H_0 representan la entalpía del vapor a las condiciones de flujo y calibración, respectivamente.

8.3.1. CONTROL DEL NIVEL DEL DOMO

En el domo de una caldera, el agua circula a alta velocidad ascendiendo a través de los tubos del horno, en los que parcialmente se vaporiza. Una vez en el domo, el líquido se libera del vapor y retorna relativamente frío al fondo del horno para iniciar otro paso ascendente. El aspecto característico de los domos de las calderas es la dificultad de controlar el nivel del líquido en el domo.

La carga al domo, del agua de alimentación a una temperatura por debajo a la del agua en ebullición provoca una condensación interna. Un repentino incremento en el flujo puede momentáneamente reducir la relación de ebullición. El líquido en el domo es soportado elevando la corriente de burbujas desde los tubos evaporadores. Cuando estas burbujas colapsan como resultado de una reducción en la velocidad de ebullición, cae el nivel del líquido en el domo. En consecuencia, un incremento en el flujo de alimentación en realidad puede causar que caiga momentáneamente el nivel del líquido.

Si la caldera opera bajo variación de la presión del vapor, la calibración del transmisor del nivel de líquido varía con la densidad del vapor. Pero también la presión tiene un efecto transiente. Un incremento de carga provoca que caiga la presión del domo y algo del agua en los tubos pasa a vapor por lo que temporalmente se incrementan los flujos del líquido y vapor hacia el domo. Este efecto se llama elevación porque causa un aumento transiente en el nivel del domo, aún cuando el flujo de vapor retirado momentáneamente puede exceder al flujo del agua de alimentación. De lo contrario, en un incremento de presión, el nivel del líquido tiende a disminuir. Estos efectos son más prominentes en las calderas a baja presión debido a la mayor diferencia entre las densidades del líquido y el vapor.

Generalmente se aplica la post-alimentación al control de nivel en el domo de la caldera. Por causa de la baja constante de tiempo del domo, el control de nivel es sensitivo a los rápidos cambios de carga. Además, del desfavorable comportamiento dinámico previene el uso de una estrecha banda proporcional debido a que esto causaría variaciones inaceptables en el flujo del agua de alimentación. El sistema de post-alimentación manipula al flujo del agua de alimentación para igualarlo al flujo de vapor retirado, donde esto representa la carga en el nivel del domo. El sistema se muestra en la Fig. 8.3.

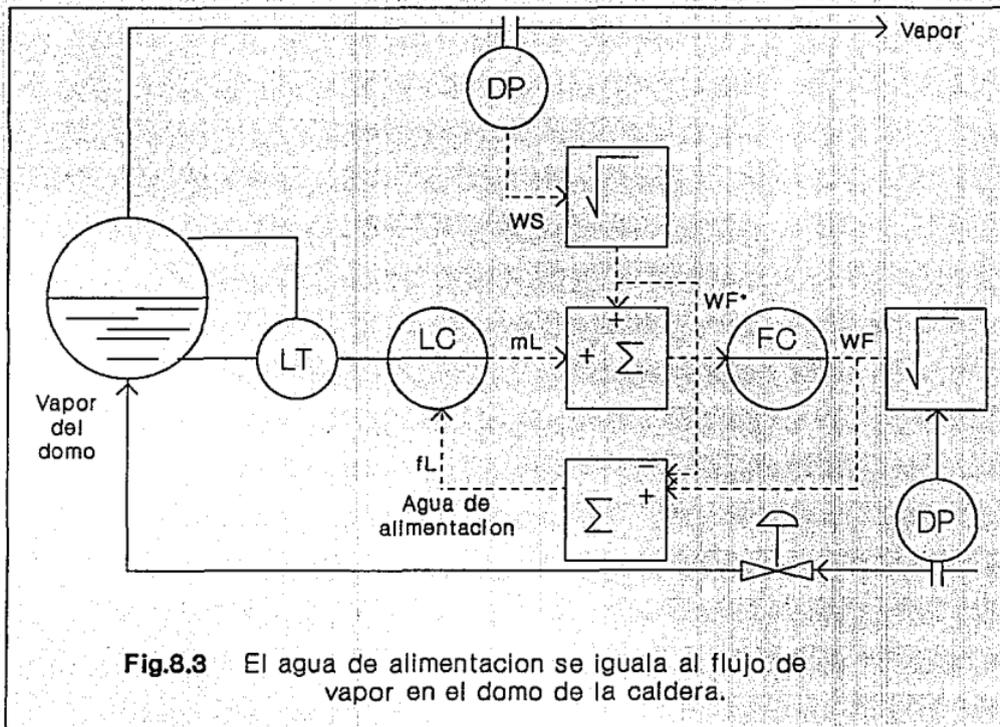
Este sistema de post-alimentación tiene dos ventajas:

- 1) El flujo del agua de alimentación no tiene cambios adicionales o más rápidos que el flujo de vapor.
- 2) El control del nivel de líquido no depende de estrechos puntos del controlador de post-alimentación.

Este sistema de post-alimentación, se basa en el balance de masa, por lo cuál es importante la manipulación del flujo del agua de alimentación. En general, la salida de un sistema de post-alimentación es el punto de ajuste para un ciclo de flujo en cascada y no va directamente a la válvula.

8.3.2. CONTROL DE LA PRESION DEL DOMO

La presión en una caldera saturada o una sobrecalentada es una medida de la cantidad de energía almacenada en ella. El flujo de vapor de la planta usualmente es la demandada por el usuario. La presión puede mantenerse, únicamente si el flujo de energía hacia la caldera es igual al flujo retirado. Donde el sistema de control del nivel del domo admite el agua de alimentación a una velocidad igual al flujo de vapor, el sistema de control de la presión del domo permite manipular la entrada de la potencia térmica. Para lograr el control de alto rendimiento, se debe usar un ciclo de post-alimentación para poner a la velocidad de arranque proporcional al flujo de vapor.



El flujo de vapor es una medida de la potencia térmica y es afectada por la velocidad de arranque. Si sólo se usa para poner la velocidad de arranque, se forma un ciclo de retroalimentación positiva. Es necesaria la señal de demanda de flujo de vapor, tal como la posición de la válvula del usuario. En realidad tal señal se puede generar apropiadamente combinando el flujo de vapor y la presión.

Considerando la demanda del usuario representada por una válvula sencilla cuya potencia térmica Q varía con la abertura a y la presión p :

$$Q = a p \quad (\text{Ecuación 8.7})$$

Entonces a es la demanda para la potencia térmica a presión constante. Cuando la Ec. 8.6 para el rotámetro del vapor se combina con la Ec. 8.7, se puede obtener la solución para la demanda de potencia:

$$a = k H_0 (h/p)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 8.8})$$

Un sistema de post-alimentación usando la Ec. 8.8 como índice de carga se muestra en la Fig. 8.4.

Al incrementarse la demanda del vapor, sube la señal de flujo y cae la presión, causando un cambio en el índice de retroalimentación para incrementar el arranque. Cuando la presión regresa a su punto de ajuste, el flujo de vapor del estado estable permanece como el índice de retroalimentación. Sin embargo se debe suministrar un sobreamortiguamiento adyacente, (cambio en la alimentación de combustible), el flujo de vapor y presión se mueven en la misma dirección, dejando sin cambios al índice de retroalimentación. Este tipo de sobreamortiguamiento se puede contrarrestar por la retroalimentación del controlador del flujo de combustible o el controlador de presión del vapor. Este problema es común donde se queman combustibles sólidos, por causa de la dificultad en la medición de su flujo y por variaciones en su contenido de la mezcla.

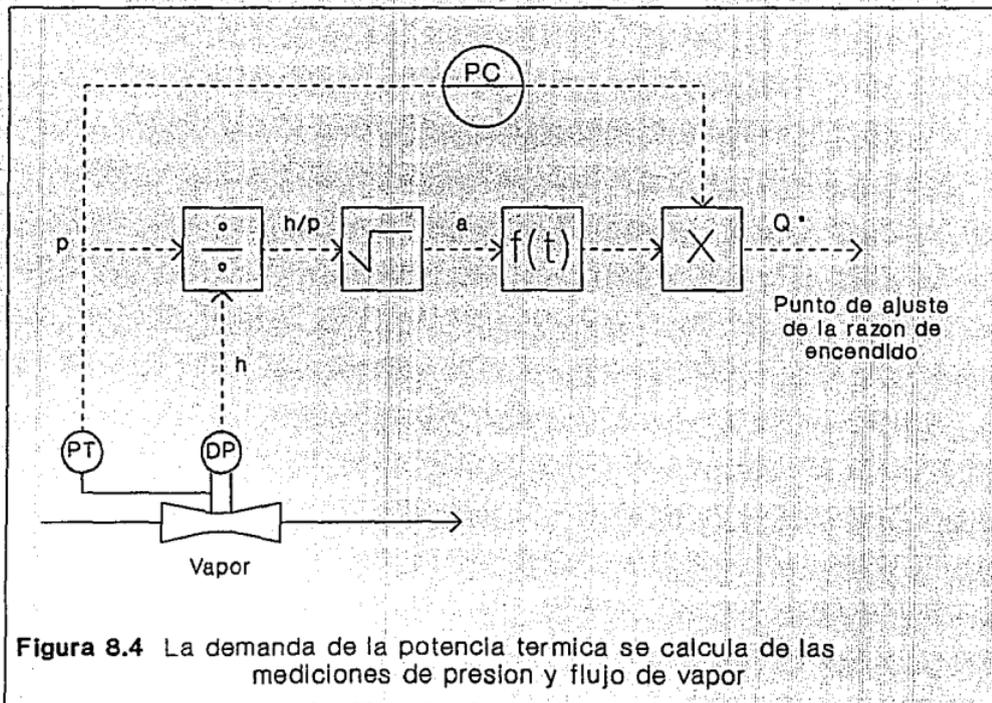


Figura 8.4 La demanda de la potencia termica se calcula de las mediciones de presion y flujo de vapor

8.3.3. CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL VAPOR

La temperatura del vapor sobrecalentado se controla variando la intensidad del calor directo hacia los sobrecalentadores opuestos a los tubos evaporadores. Esto se puede completar por la inclinación de los quemadores o por la recirculación del gas de chimenea. El control de ajuste frecuentemente se aplica atemperando el vapor sobrecalentado con el agua de alimentación. Esta práctica resulta en un menor trabajo, sin embargo, en esta la superficie de transferencia de calor de los evaporadores se recircula por el agua atemperada, de tal modo que las temperaturas internas suben más de lo necesario.

CAPITULO 9

SIMULACION DINAMICA EN TIEMPO REAL

9. SIMULACION DINAMICA EN TIEMPO REAL

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y conducir experimentos con este modelo, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias (con límites impuestos por un criterio) para la operación del sistema. De esta manera se puede entender que el proceso de simulación incluye la construcción y el uso analítico del modelo para estudiar un problema. Se entiende por modelo de un sistema real una representación de un grupo de objetos o ideas que de alguna forma u otra es la entidad por sí misma, y el término "real" se usa en el sentido de "en existencia o capaz de comprobar su existencia". Cada modelo o representación de una cosa es una forma de simulación.

El modelado de la simulación es por lo tanto, una metodología experimental y aplicada que busca:

- 1) Describir el comportamiento de los sistemas.
- 2) Construir teorías o hipótesis para describir el comportamiento observado.
- 3) Usar estas teorías para predecir el comportamiento futuro, esto es, los efectos que serían producidos por cambios en el sistema o en su método de operación.

Cuando se dispone de un modelo para un componente o sistema, puede utilizarse un computador para investigar el comportamiento del sistema. Un modelo de sistema para computador, en una forma matemática adecuada para demostrar el funcionamiento del sistema, puede utilizarse para investigar diversos diseños de un sistema planeado sin construirlo realmente. Una simulación de computador emplea un modelo y las condiciones reales del sistema que se modela, así como instrucciones reales de entrada a las cuales estará sujeto el sistema.

Existen ciertas características de los procesos industriales que las diferencian de otros tipos de industrias, debido esencialmente a que hay una compleja estructura de muchas etapas, cada una de las cuales consta a su vez

de numerosos subcomponentes. Las ecuaciones que describen las relaciones entre las variables importantes oscilan desde unas muy sencillas hasta otras muy complicadas. Teniendo en cuenta que interviene un elevado flujo de materiales con un valor económico relativamente alto, se comprende que pequeñas modificaciones en las características de diseño y operación pueden tener una importante repercusión económica. Finalmente, las características de los subcomponentes del proceso todavía no son, en general, lo suficientemente conocidas como para permitir al ingeniero basarse exclusivamente en la teoría para proceder al diseño y control.

En última instancia, los ingenieros de las industrias de proceso se ocupan en dos principales tipos de trabajo: la operación de plantas ya existentes y el diseño de plantas nuevas o modificadas. Por lo que se refiere a la operación de instalaciones, tanto el control como la optimización constituyen las dos funciones más importantes de los ingenieros. Para que el ingeniero pueda desarrollar con eficacia su trabajo en estos campos debe estar en condiciones de poder realizar un análisis sofisticado del proceso en sí. Será preciso programar los sistemas de cálculo de forma que se puedan combinar las relaciones que describen las partes individuales de la instalación; habrá que evaluar los parámetros básicos de estas relaciones, y por último, será preciso dar un contenido más cuantitativo a los aspectos cualitativos de los criterios de que se dispone. Por éstas y muchas otras razones relacionadas, el control y optimización tienen su fundamento en el análisis de procesos.

El segundo tipo de trabajo de los ingenieros, que es el diseño, resulta en cierto modo más difícil. Por supuesto que los datos de la planta real no son conocidos de antemano, y por esta razón, el ingeniero tiene que utilizar una parte importante de su criterio intuitivo. Por otra parte, cuando se modifican plantas existentes o se diseñan plantas similares a otras ya construidas, el ingeniero puede disponer de una importante experiencia.

De lo expuesto hasta aquí se llega a la conclusión de que la construcción de modelos matemáticos teóricos o semiteóricos constituye frecuentemente una necesidad preliminar.

Tanto el diseño como la operación se puede facilitar mediante la simulación del proceso o de sus partes. En primer lugar, es muy difícil que la dirección de la empresa permita a los ingenieros introducir arbitrariamente cambios en una instalación que opera satisfactoriamente por el simple hecho de ver qué es lo que ocurre. Además, los modelos matemáticos de los procesos se pueden manipular mucho más fácilmente que las plantas reales. Por ejemplo se puede simular la operación fuera de las condiciones o intervalos normales y también se puede hacer "explotar" la planta con el fin de encontrar las condiciones de operación prohibidas.

Por lo tanto, el analista debe considerar el uso de la simulación cuando existen una o más de las siguientes condiciones:

- 1) No existe una formulación matemática completa del problema o métodos analíticos de solución del modelo matemático todavía sin desarrollar.
- 2) Están disponibles los métodos analíticos, pero los procedimientos matemáticos son tan complejos y arduos que la simulación debe proveer un método más simple de solución.
- 3) Existen soluciones analíticas y son posibles pero están más allá de la habilidad matemática del personal. El costo del diseño, prueba y ejecución de una simulación debe evaluarse contra el costo de la ayuda exterior que se obtenga.
- 4) Es deseable observar una historia simulada del proceso sobre un período de tiempo además de estimar ciertos parámetros.
- 5) La simulación puede ser la única posibilidad debido a la dificultad en conducir experimentos y observar fenómenos en su ambiente real.
- 6) El tiempo de comprensión que se pueda requerir para sistemas o procesos con largo tiempo de estructuración.

La simulación proporciona un completo control sobre el tiempo, donde un fenómeno puede acelerarse o retardarse como se requiera.

Suponiendo que una simulación se use para investigar las propiedades de un sistema real, pueden distinguirse las siguientes etapas:

- 1) Definición del sistema. Determinar las fronteras, restricciones y mediciones usadas en la definición del sistema a estudiar.
- 2) Formulación del modelo. Reducción y abstracción del sistema real a un diagrama de flujo lógico.
- 3) Preparación de datos. Identificación de los datos necesarios para el modelo, y su reducción a una forma apropiada.
- 4) Translación del modelo. Descripción del modelo en un lenguaje aceptable a la computadora a usar.
- 5) Validación. Incrementar a un nivel aceptable la confianza que cause una inferencia desde el modelo al sistema real.
- 6) Estrategia de planeación. Diseño de un experimento que produzca la información deseada.
- 7) Tácticas de planeación. Determinación de cómo se ejecuta cada prueba especificada en el diseño experimental.
- 8) Experimentación. Ejecución de la simulación para generar los datos deseados y mejorar el análisis de sensibilidad.
- 9) Interpretación. Inferir desde los datos generados por la simulación.
- 10) Implementación. Colocar el modelo y/o los resultados para usarlos.
- 11) Documentación. Registrar las actividades y resultados del proyecto tanto como la documentación del modelo y su uso.

9.1. VENTAJAS DE LA SIMULACION

Desde un punto de vista más general, el análisis y simulación de procesos presenta las ventajas que se señalan a continuación.

- 1) El funcionamiento del sistema puede observarse bajo todas condiciones concebibles.
- 2) Los resultados del funcionamiento del sistema en el campo pueden extrapolarse con un modelo de simulación para fines de predicción.
- 3) Pueden examinarse las decisiones concernientes a sistemas futuros, actualmente en una etapa conceptual.
- 4) Pueden efectuarse pruebas de sistemas bajo examen en periodos mucho más reducidos.
- 5) Los resultados de la simulación pueden observarse a un costo más bajo que el de la aproximación real.
- 6) Puede efectuarse el estudio de situaciones hipotéticas aún cuando dichas situaciones no sean posibles en la vida real y en el tiempo presente.
- 7) El modelado y simulación por computadora es frecuentemente la única técnica factible o segura para analizar y evaluar un sistema.

9.2. EMPLEO DE COMPUTADORAS DIGITALES

La computadora digital, dada la facilidad con que efectúa las operaciones algebraicas, es el mejor instrumento en las industrias de proceso para:

- 1) Los diseños en estado estacionario de los equipos de proceso, en especial para los que normalmente se requieren procedimientos de tanteo.
- 2) La optimización del funcionamiento de la planta y de la distribución de flujo para asegurar un rendimiento máximo en el esquema de ventas. A través de la investigación de las operaciones, estos estudios pueden hacerse para el

complejo de la planta global y aún para compañías completas.

- 3) La simulación de sistemas demasiado grandes o complejos para los computadores analógicos disponibles.
- 4) El análisis estadístico de los datos de operación de la planta para determinar las respuestas de control de la planta y ayudar en los estudios de optimización.

9.2.1. VENTAJAS DE LOS LENGUAJES FORTRAN Y C

Lenguaje Fortran. Este lenguaje es excelente, rápido y preciso en los cálculos complicados. Se han establecido estándares mínimos y versiones extendidas; existe una variación menor entre sus dialectos. Es relativamente poderoso en las operaciones de entrada-salida.

Lenguaje C. C tiene gran poder debido a la cuidadosa inclusión de las estructuras correctas de control y los tipos de datos, permitiendo que su empleo sea significativo y casi ilimitado. Las gráficas forman parte integrada del lenguaje.

9.3. TIEMPO REAL

El tiempo real es un paquete realizado en Microsoft C el cual consta de una colección de gráficas, métodos numéricos, control de procesos y más funciones que puede incorporarse en la aplicación de programas ejecutables por medio de interfaces.

La parte gráfica de este paquete es orientado a aplicaciones en tiempo real involucrando gráficas de barras, pantallas y medidores.

El programador tiene la capacidad para definir una ventana de cualquier tamaño y posición en cualquier lugar en la pantalla.

Entre las Gráficas en Tiempo Real podemos mencionar las siguientes:

- Gráficas con barras horizontales y verticales
- Medidores de arco
- Relojes
- Anunciadores
- Textos

Estas fueron creadas obteniéndose las siguientes ventajas en su uso:

- Rapidez
- Reproducibilidad

Estas rutinas son fáciles de usar ya que usualmente solo llaman a una función y esta es suficiente para probar y crear una ventana de tiempo real. Las rutinas son flexibles porque se define la posición y tamaño de cada ventana, las cuales se pueden desplegar tanto en texto como en gráfica. Cualquiera de las subsecuentes llamadas para algunas de las funciones gráficas y se ajusta automáticamente a las coordenadas de la ventana.

Cada uno de los desplegados pueden ser usados para mostrar datos de trabajos reales en formatos de tiempo real. Muchos de los desplegados también muestran información de baja y alta alarma, punto de ajuste y otra información asociada con un canal en las ventanas de tiempo real, diferentes ventanas pueden ser mezcladas en la misma pantalla.

9.4. DESCRIPCION DEL TRABAJO

En el presente trabajo se realizó un programa en lenguaje Fortran el cual analiza el comportamiento de una caldera a partir de datos reales y con ayuda de las funciones del paquete de Tiempo Real anteriormente mencionados, se pudo obtener la simulación de la caldera mencionada a partir de la realización de una interfase entre el Lenguaje Fortran y el Lenguaje C.

Gracias a esto se puede visualizar en pantalla como se comporta el funcionamiento de la caldera en un tiempo real y cuales son las alteraciones

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

que esta presenta si las condiciones de operación en el proceso fueran cambiadas, de la misma forma se pueden obtener las mejores condiciones y eficiencia de la misma a base de pruebas.

Este método nos ayuda a predecir cuál sera el comportamiento de un equipo real ya que se muestra por medio de gráficas, medidores, alarmas y relojes, cuales son las variaciones que se deben realizar en un proceso planteado para obtener la mayor eficiencia.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Al término del presente trabajo se obtuvieron una serie de reglas para un generador de vapor las cuales se citan a continuación:

Una mano de obra apropiada y construcción sencilla, utilizando materiales que la experiencia ha señalado como los mejores, con lo que se evitan reparaciones prematuras.

Un colector de lodos, para recibir todas las impurezas que deposita el agua, colocado en tal forma, que pueda ser removido fuera de la acción del fuego.

Una capacidad de agua y de vapor suficientes, para prevenir las fluctuaciones de la presión del vapor y del nivel del agua.

Una superficie para el desprendimiento del vapor del agua lo suficientemente amplia, para prevenir la formación de espuma.

Una constante y total circulación del agua dentro de la caldera, para mantener la temperatura uniforme en todas sus partes.

El espacio del agua debe dividirse en secciones que se tendrán que disponer en tal forma que si alguna de ellas llega a fallar, no pueda ocurrir una explosión general, sino que los efectos destructivos queden confinados al escape del contenido de la caldera. Conductos amplios y libres de obstáculos entre las diferentes secciones, para que la línea de agua y la presión sean idénticas dentro del conjunto total.

Una resistencia extremadamente alta, que esté por encima de cualquier deformación justificada; y una construcción tal de la caldera, que quede exenta de las deformaciones ocasionadas por expansión desigual y, hasta donde sea posible, evitar uniones en las partes expuestas a la acción directa del fuego.

Una cámara de combustión construida de tal manera, que la combustión de los gases, que se inicia en el hogar quede terminada antes de que dichos gases escapen por la chimenea, es decir, que la combustión termine, virtualmente dentro del hogar.

Que las superficies de calefacción se aproximen lo más posible a formar un ángulo recto en relación con la dirección de las corrientes de los gases calientes, de manera que sean cortadas dichas corrientes, para extraer el contenido completo de calor de los gases.

Todas las partes deben ser fácilmente accesibles para fines de limpieza y reparaciones. Esta es una condición de la máxima importancia, porque se relaciona tanto con la seguridad, como con la economía.

Debe estar proporcionada con el trabajo a desarrollar y adecuada para trabajar a su capacidad máxima de régimen con la más alta economía.

Debe estar equipada con los aparatos de medición y válvulas de seguridad más modernos.

Por otra parte podemos decir que la simulación de procesos presenta:

Experimentación económica. Es posible estudiar procesos existentes de una forma más rápida, económica y completa que en la planta real. La simulación puede aumentar o reducir el tiempo real; de esta forma se puede observar más fácilmente la operación del sistema.

Extrapolación. Con un modelo matemático adecuado se pueden ensayar intervalos extremos de las condiciones de operación, que pueden ser impracticables o imposibles de realizar en una planta real. También es posible establecer características de funcionamiento.

Estudio de conmutabilidad y evaluación de otros planes de actuación. Se pueden introducir nuevos factores o elementos de un sistema y suprimir otros antiguos al examinar el sistema con el fin de ver si estas modificaciones son compatibles. La simulación permite comparar distintos diseños y procesos que todavía no están en operación y ensayar hipótesis sobre sistemas o procesos antes de llevarlos a la práctica.

Repetición de experimentos. La simulación permite estudiar el efecto de la modificación de las variables y parámetros con resultados reproducibles. En el modelo matemático se puede introducir o retirar a voluntad un error, lo cual no es posible en la planta real.

Ensayo de sensibilidad. Se puede ensayar la sensibilidad de los parámetros básicos del sistema; por ejemplo, un incremento de un 10 por ciento en la velocidad de alimentación podrá tener, según los casos, un efecto mínimo o un efecto muy importante sobre el funcionamiento de la instalación.

Una ventaja adicional de la simulación es su poderosa aplicación educativa y de entrenamiento. El desarrollo y uso de un modelo de simulación permite al experimentador ver y practicar con el sistema. Así, de esta manera recibe un completo entendimiento del problema, ayudando al proceso de innovación.

Finalmente se puede decir que el uso de la simulación con ayuda del tiempo real es de gran utilidad para visualizar procesos reales que se llevan a cabo actualmente, ya que de esta forma se pueden plantear variaciones en las condiciones de proceso y se puede observar cual será el comportamiento del mismo, produciendo esto una gran ayuda para personas que desempeñan trabajos en industrias u otras empresas, ya que de esta manera se puede llegar a obtener las mejores condiciones y una mayor eficiencia en la operación de la misma.

ANEXO A

**DESARROLLO DEL PROGRAMA
COMPUTACIONAL PARA LA
SIMULACION EN TIEMPO REAL
DE UN EQUIPO
GENERADOR DE VAPOR**

ANEXO A

DESARROLLO DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA LA SIMULACION EN TIEMPO REAL DE UN EQUIPO GENERADOR DE VAPOR

En el presente anexo se describe la estructura del programa el cual calcula la eficiencia térmica y la eficiencia global de calderas de vapor, así como los datos que se requieren para su manejo los cuales son los siguientes:

A.1. DATOS PARA LA EVALUACION DEL GENERADOR DE VAPOR.

1.- Datos del arreglo del Generador de vapor.

Este arreglo se puede seleccionar de acuerdo a las necesidades del usuario, contando con los siguientes equipos:

Sobrecalentador primario, Sobrecalentador secundario, Cavidad, Tubos escudo, Banco generador de vapor, Economizador y Precalentador de aire.

La Cámara de combustión se excluye de la selección porque es esencial en el generador de vapor.

2.- Datos para realizar los cálculos de combustión.

- Tipo de combustible: líquido o gaseoso.

- Temperatura del aire.

- Exceso de aire.

- Humedad relativa.

- Temperatura del combustible.

- Poder calorífico alto.

- Poder calorífico bajo.

Combustible líquido:

- Relación carbono-hidrógeno.

- Contenido de azufre en el combustible.

- Contenido de agua en el combustible.

- Contenido de cenizas en el combustible.

- Capacidad calorífica promedio del combustible.

Combustible gaseoso:

- Composición del metano, etano, propano, butano, 1-butano, pentano, 1-pentano, hexano, 1-hexano, heptano, 1-heptano, octano, 1-octano, nonano, 1-nonano, decano, 1-decano, etileno, propileno, butadieno, pentadieno, penteno, hexeno, hepteno, octeno, noneno, deceno, hidrógeno, ácido sulfhídrico, nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, exceso de azufre, exceso de carbón.

3.- Datos para realizar los cálculos preliminares.

- Gasto de vapor generado.
- Gasto de agua de purga.
- Presión atmosférica.
- Temperatura del agua de atemperación.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Temperatura y presión del vapor saturado.
- Temperatura y presión del vapor sobrecalentado.
- Pérdidas de calor por radiación al exterior.
- Temperatura estimada de salida de los gases después del precalentador de aire.

4.- Datos para evaluar el hogar.

- Área y volumen arriba del centro de líneas de quemadores.
- Área y volumen arriba de los tubos escudo.
- Área arriba del centro de líneas de quemadores más área del paso abierto y su factor de emisividad.
- Área arriba del paso abierto más área de tubos escudo y su factor de emisividad.
- Área de paso libre de gases entre el centro de líneas de quemadores y los tubos escudo.

5.- Datos para evaluar los equipos.

a) Datos para evaluar al sobrecalentador.

- Tipo de sobrecalentador (primario o secundario).
- Flujo de gases respecto a la corriente de proceso (flujo a contracorriente o paralelo).
- Flujo de gases respecto al banco de tubos (flujo cruzado o longitudinal).
- Arreglo de tubos (arreglo cuadrado o triangular).
- Temperatura de entrada del fluido.
- Temperatura a la salida del sobrecalentador.
- Longitud, ancho y profundidad promedio de los tubos en el sobrecalentador.
- Diámetro exterior de los tubos.
- Pinch longitudinal y pinch transversal.
- Longitud y ancho del compartimiento.
- Longitud del área de paso de gases.
- Factor de profundidad.
- Factor de emisividad de gases.

b) Datos para evaluar las cavidades.

- Longitud, ancho y profundidad del compartimiento.
- Factor de arreglo.

c) Datos para evaluar los tubos escudo.

- Flujo de gases respecto a la corriente de proceso (flujo a contracorriente o paralelo).
- Flujo de gases respecto al banco de tubos (flujo cruzado o longitudinal).
- Arreglo de tubos (arreglo cuadrado o triangular).
- Temperatura de entrada del agua.
- Longitud, ancho y profundidad de los tubos escudo.
- Diámetro exterior de los tubos.
- Pinch longitudinal y transversal.
- Longitud y ancho del compartimiento.
- Longitud del área del paso de gases.
- Factor de profundidad y de emisividad de gases.

d) Datos para evaluar el banco generador.

- Número de zonas.
- Temperatura de entrada y de salida del agua.
- Flujo de gases respecto a la corriente de proceso (flujo a contracorriente o paralelo).
- Flujo de gases respecto al banco de tubos (flujo cruzado o longitudinal).
- Arreglo de tubos (arreglo cuadrado o triangular).
- Longitud, ancho y profundidad promedio de los tubos en el banco generador.
- Diámetro exterior de los tubos.
- Pinch longitudinal y transversal.
- Longitud y ancho del compartimiento.
- Longitud del área del paso de gases.
- Factor de profundidad y de emisividad de gases.

e) Datos para evaluar el economizador.

- Flujo de gases respecto a la corriente de proceso (flujo a contracorriente o paralelo).
- Flujo de gases respecto al banco de tubos (flujo cruzado o longitudinal).
- Arreglo de tubos (arreglo cuadrado o triangular).
- Temperatura de entrada del agua.
- Temperatura a la salida del economizador.
- Longitud, ancho y profundidad promedio de los tubos en el economizador.
- Diámetro exterior de los tubos.
- Pinch longitudinal o transversal.

f) Datos para evaluar al precalentador de aire.

- Temperatura de entrada y de salida de los gases.
- Diámetro y área del precalentador de aire.
- Área total de transferencia.

A.2. CALCULOS PARA LA EVALUACION DEL GENERADOR DE VAPOR

En esta sección se explican los cálculos que se realizan a partir de los datos antes mencionados considerando que estos cálculos se realizan más de una vez y con diferente entrada de datos de acuerdo al equipo que se esté evaluando, para cada cálculo se especifica de que tipo de combustible se está usando (líquido y gaseoso), si no se indica se usa para ambos.

1.- Cálculos de combustión.

- Combustión de las parafinas, olefinas, hidrógeno y ácido sulfhídrico (combustible gaseoso).
- Combustión (combustible líquido).
- Aire para la combustión .
- Gases de combustión.
- Peso molecular del aire húmedo y de los gases de combustión.

2.- Cálculos preliminares.

- Entalpía del agua de alimentación.
- Entalpía del vapor sobrecalentado.
- Entalpía del vapor saturado.
- Eficiencia térmica:
 - Calor suministrado por la reacción.
 - Calor sensible del combustible.
 - Capacidad calorífica del combustible.
 - Calor sensible del aire.
 - Poder calorífico alto recalculado.
 - Calor sensible de los gases de combustión (secos).
 - Pérdidas de calor en gases secos.
 - Calor perdido por humedad en el combustible.
 - Calor perdido por humedad en el aire.
 - Porcentajes de pérdidas de calor por humedad en el aire y en el combustible.
- Calor disponible en el generador de vapor.

- Cálculo de la temperatura de flama real de los gases de combustión.

3.- Cálculos para la evaluación térmica de la cámara de combustión de un generador de vapor (consta de dos zonas).

- Temperatura máxima de los gases de combustión.
- Evaluación térmica en cada zona.
- Temperatura de entrada y de salida de los gases de combustión de cada zona.
- Calor absorbido en cada zona.
- Radiación que sale de la cámara de combustión hacia el compartimiento posterior.

4.- Cálculos para la evaluación térmica de los equipos.

a) Sobrecalentador primario y secundario.

- Tipo de sobrecalentador.
- Balance térmico del equipo:
 - Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo anterior.
 - Calor por radiación que sale del equipo a un equipo posterior.
 - Calor por radiación que sale del equipo a un equipo anterior.
 - Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo posterior.
- Radiación del equipo anterior.
- Radiación del equipo posterior.
- Radiación al equipo anterior.
- Radiación al equipo posterior.
- Definición de los parámetros de geometría:
 - Superficie de calefacción del área del banco de tubos.
 - Area del equipo y superficie de calefacción.
 - Longitud media del haz radiante.

Area de flujo libre para el paso de los gases de combustión.

Factores para la radiación entre tubos.

- Calor total que entra al equipo.
- Superficie total de transferencia.
- Superficie efectiva de calentamiento.
- Relación de superficie total de transferencia y superficie del banco de tubos.
- Area libre de flujo.
- Longitud del haz radiante.
- Factor de radiación entre tubos.
- Entalpía del vapor saturado.
- Calor total absorbido en el sobrecalentador.
- Calor que debe absorberse de los gases de combustión.
- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor para un banco de tubos de la sección de convección:
Determinación de las temperaturas promedio.
Capacidad calorífica de los gases de combustión.
Viscosidad de los gases de combustión.
Conductividad térmica.
Masa velocidad de los gases de combustión.
Coeficiente (flujo longitudinal y cruzado).
Factor de propiedades físicas (flujo longitudinal y cruzado).
Factor de temperatura y coeficiente de convección (flujo longitudinal).
Factor de profundidad (flujo cruzado).
Efecto del tipo de combustible.
Longitud media radiante.
Coeficiente de transferencia de calor por convección.
Coeficiente de transferencia de calor por radiación.
Coeficiente global de transferencia de calor.
- Temperatura media logarítmica.
- Factor de arreglo físico.

- Calor absorbido por radiación.
- Calor absorbido de los gases.
- Calor total absorbido.

b) Cavidad.

- Calor por radiación que entra a la cavidad.
- Calor total de los gases de combustión que entran a la cavidad.
- Calor proveniente del equipo anterior.
- Calor proveniente del equipo posterior.
- Definición de la geometría de la cavidad:
 - Volumen de la cavidad.
 - Area frontal.
 - Area posterior.
 - Areas laterales verticales.
 - Areas laterales horizontales.
 - Area total de las paredes.
 - Longitud del haz radiante.
- Temperaturas promedio de pared.
- Temperatura de los gases a la salida de la cavidad.
- Emisividad de los gases en la cavidad.
- Calor absorbido en los equipos adyacentes.
- Temperatura de entrada de los gases.
- Calor absorbido en la cara frontal.
- Calor absorbido en la cara posterior.
- Calor absorbido en caras laterales verticales.
- Calor absorbido en caras laterales horizontales.
- Calor total absorbido de los gases.
- Carga térmica de los gases a la salida.

c) Tubos escudo.

- Balance térmico del equipo:
 - Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo anterior.

- Calor por radiación que sale del equipo a un equipo posterior.
- Calor por radiación que sale del equipo a un equipo anterior.
- Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo posterior.
- Definición de los parámetros de geometría:
 - Superficie de calefacción del área del banco de tubos.
 - Área del equipo y superficie de calefacción.
 - Área de flujo libre para el paso de los gases de combustión.
 - Factores para la radiación entre tubos.
 - Calor total que entra al equipo.
 - Radiación a equipo anterior.
 - Radiación a equipo posterior.
 - Radiación de equipo anterior.
 - Radiación de equipo posterior.
 - Superficie total del banco de tubos.
 - Superficie del equipo.
 - Superficie total de transferencia.
 - Relación de superficie total de transferencia y superficie total del banco de tubos.
 - Área libre de flujo.
 - Longitud del haz radiante.
 - Factor de radiación entre tubos.
 - Determinación del coeficiente global de transferencia de calor para un banco de tubos de la sección de convección:
 - Determinación de las temperaturas promedio.
 - Capacidad calorífica de los gases de combustión.
 - Viscosidad de los gases de combustión.
 - Conductividad térmica.
 - Masa velocidad de los gases de combustión.
 - Coefficiente (flujo longitudinal y cruzado).
 - Factor de propiedades físicas (flujo longitudinal y

cruzado).

Factor de temperatura y coeficiente de convección (flujo longitudinal).

Factor de profundidad (flujo cruzado).

Efecto del tipo de combustible.

Longitud media radiante.

Coeficiente de transferencia de calor por convección.

Coeficiente de transferencia de calor por radiación.

Coeficiente global de transferencia de calor.

- Temperatura de entrada de gases.
- Temperatura de salida de gases.
- Temperatura de entrada del agua.
- Temperatura de salida del agua.
- Temperatura media logarítmica.
- Calor específico de los gases de combustión a la salida del equipo.
- Calor absorbido.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección.
- Coeficiente de transferencia de calor por radiación.
- Coeficiente global de transferencia de calor.

d) Banco generador de vapor.

- Balance térmico del equipo:

Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo anterior.

Calor por radiación que sale del equipo a un equipo posterior.

Calor por radiación que sale del equipo a un equipo anterior.

- Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo posterior.
- Calor total de los gases de combustión que entran al equipo.
- Contribución por radiación al balance térmico en el

equipo.

- Evaluación térmica en cada zona.
- Definición de los parámetros de geometría:
 - Superficie de calefacción del área del banco de tubos.
 - Área del equipo y superficie de calefacción.
 - Longitud media del haz radiante.
 - Área de flujo libre para el paso de los gases de combustión.
 - Factores para la radiación entre tubos.
- Superficie total de la zona.
- Superficie de la zona.
- Superficie total de transferencia.
- Relación de superficie total de transferencia y superficie del banco de tubos.
- Área libre de flujo.
- Longitud del haz radiante.
- Factor de radiación entre tubos.
- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor para un banco de tubos de la sección de convección:
 - Determinación de las temperaturas promedio.
 - Capacidad calorífica de los gases de combustión.
 - Viscosidad de los gases de combustión.
 - Conductividad térmica.
 - Masa velocidad de los gases de combustión.
 - Coefficiente (flujo longitudinal y cruzado).
 - Factor de propiedades físicas (flujo longitudinal y cruzado).
 - Factor de temperatura y coeficiente de convección (flujo longitudinal).
 - Factor de profundidad (flujo cruzado).
 - Efecto del tipo de combustible.
 - Longitud media radiante.
 - Coefficiente de transferencia de calor por convección.
 - Coefficiente de transferencia de calor por radiación.

Coefficiente global de transferencia de calor.

- Temperatura media logaritmica.
- Calor específico de los gases de combustión a la salida de los tubos del banco generador.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección.
- Coeficiente de transferencia de calor por radiación.
- Coeficiente global de transferencia de calor.

e) Economizador.

- Entalpía del líquido saturado.
- Gasto de agua de alimentación.
- Gasto de agua de atemperación.
- Flujo total de vapor.
- Entalpía del vapor que entra al sobrecalentador secundario
- Entalpía del vapor que sale del sobrecalentador primario.
- Calor de los gases de combustión que entran al equipo.
- Balance térmico del equipo:
 - Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo anterior.
 - Calor por radiación que sale del equipo a un equipo posterior.
 - Calor por radiación que sale del equipo a un equipo anterior.
 - Calor por radiación que entra al equipo desde un equipo posterior.
- Temperatura de salida del agua en el economizador.
- Definición de los parámetros de geometría:
 - Superficie de calefacción del área del banco de tubos.
 - Area del equipo y superficie de calefacción.
 - Longitud media del haz radiante.
 - Area de flujo libre para el paso de los gases de combustión.
 - Factores para la radiación entre tubos.
- Radiación a equipo anterior.

- Radiación a equipo posterior.
- Radiación de equipo anterior.
- Radiación de equipo posterior.
- Superficie total del banco de tubos.
- Superficie del equipo.
- Superficie total de transferencia.
- Relación de superficie total de transferencia y superficie total del banco de tubos.
- Area libre de flujo.
- Longitud del haz radiante.
- Factor de radiación entre tubos.
- Calor que debe absorberse de los gases de combustión.
- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor para un banco de tubos de la sección de convección:
 - Determinación de las temperaturas promedio.
 - Capacidad calorífica de los gases de combustión.
 - Viscosidad de los gases de combustión.
 - Conductividad térmica.
 - Masa velocidad de los gases de combustión.
 - Coefficiente (flujo longitudinal y cruzado).
 - Factor de propiedades físicas (flujo longitudinal y cruzado).
 - Factor de temperatura y coeficiente de convección (flujo longitudinal).
 - Factor de profundidad (flujo cruzado).
 - Efecto del tipo de combustible.
 - Longitud media radiante.
 - Coefficiente de transferencia de calor por convección.
 - Coefficiente de transferencia de calor por radiación.
 - Coefficiente global de transferencia de calor.
- Temperatura media logarítmica.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección.
- Coeficiente de transferencia de calor por radiación.
- Coeficiente global de transferencia de calor.

- Factor de arreglo físico.

f) Precalentador de aire (Tipo Ljungstrom).

- Calor total disponible.
- Coeficiente global de transferencia de calor.
- Viscosidad de los gases de combustión.
- Calor específico de los gases de combustión a la salida del equipo.
- Temperatura media logarítmica.
- Temperatura de entrada de los gases de combustión.
- Temperatura de salida de los gases de combustión.
- Temperatura de entrada del aire.
- Temperatura de salida del aire.
- Calor absorbido.

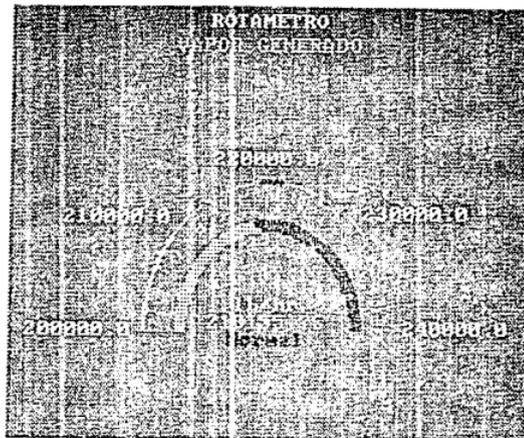
A.3. IMPRESION DE RESULTADOS DE LA EVALUACION TERMICA DE UN GENERADOR DE VAPOR.

Al término de la ejecución del programa se obtiene una impresión de resultados la cuál consta de los resultados más relevantes que se obtienen al final y durante su ejecución, a continuación se mencionaran algunos de ellos.

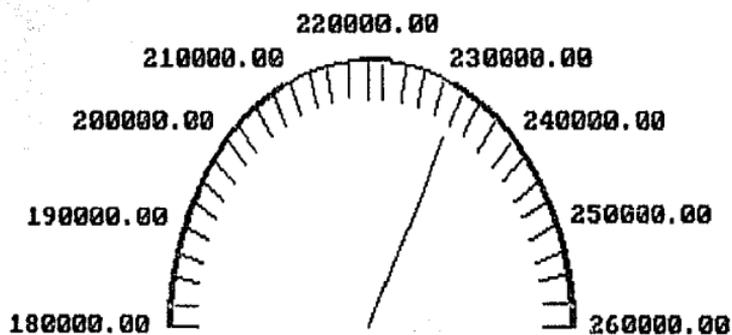
- Condiciones térmicas del generador de vapor.
- Datos del combustible.
- Datos del aire de combustión.
- Resultados de los equipos.
 - Cámara de combustión.
 - Sobrecalentador primario y secundario.
 - Cavidad.
 - Tubos escudo.
 - Banco generador de tubos.
 - Economizador.
 - Precalentador de aire.

ANEXO B

PANTALLAS DE LA SIMULACION

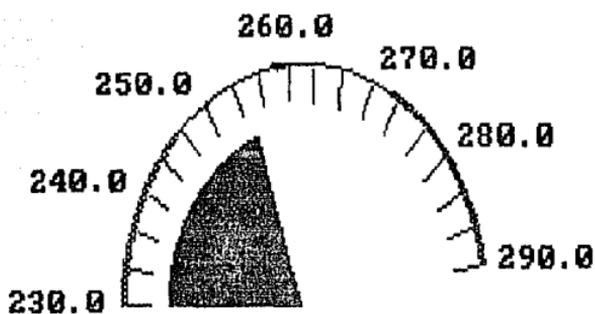


**ROTAMETRO DEL GENERADOR DE VAPOR
VAPOR**



lb/hr
Alarma Alta

**ROTAMETRO DEL GENERADOR DE VAPOR
CARGA TERMICA**



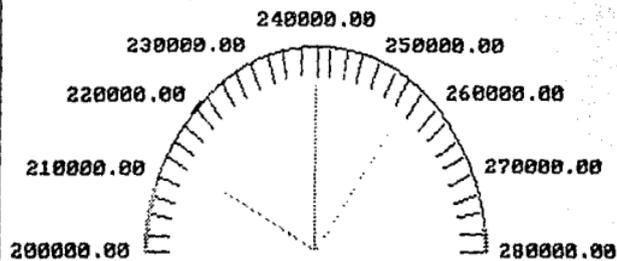
**MMBtu/hr
254.86
Normal**

ROTAMETRO DEL GENERADOR DE VAPOR

VAPOR

AIRE

WATER CURR.



libras/hora

213321.000

240141.452

WATER CURR.

Manera Baja

Normal

Normal

Normal

ANUNCIADORES

BANCO			
S. I.			
STU/haf14			
Normal			

BANCO			
S. I.			
STU/haf14			
Normal			

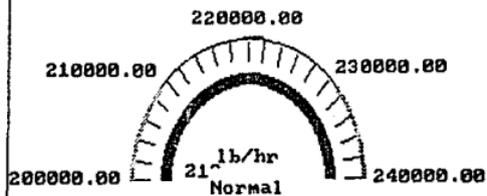
BANCO			
S. I.			
STU/haf14			
Normal			

II
STU/haf14
Normal

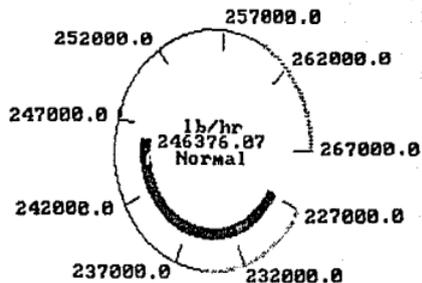
ANUNCIADOR DE FLUJOS

PERSONA	CATEGORIA	CATEGORIA	CATEGORIA
186507	18/02	18/02	18/02

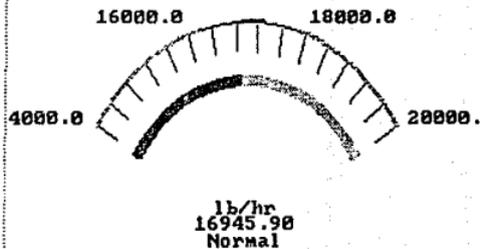
ROTAMETRO 0
Medidor de Arco



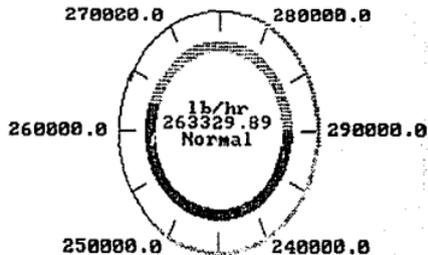
ROTAMETRO 1
Medidor de Arco

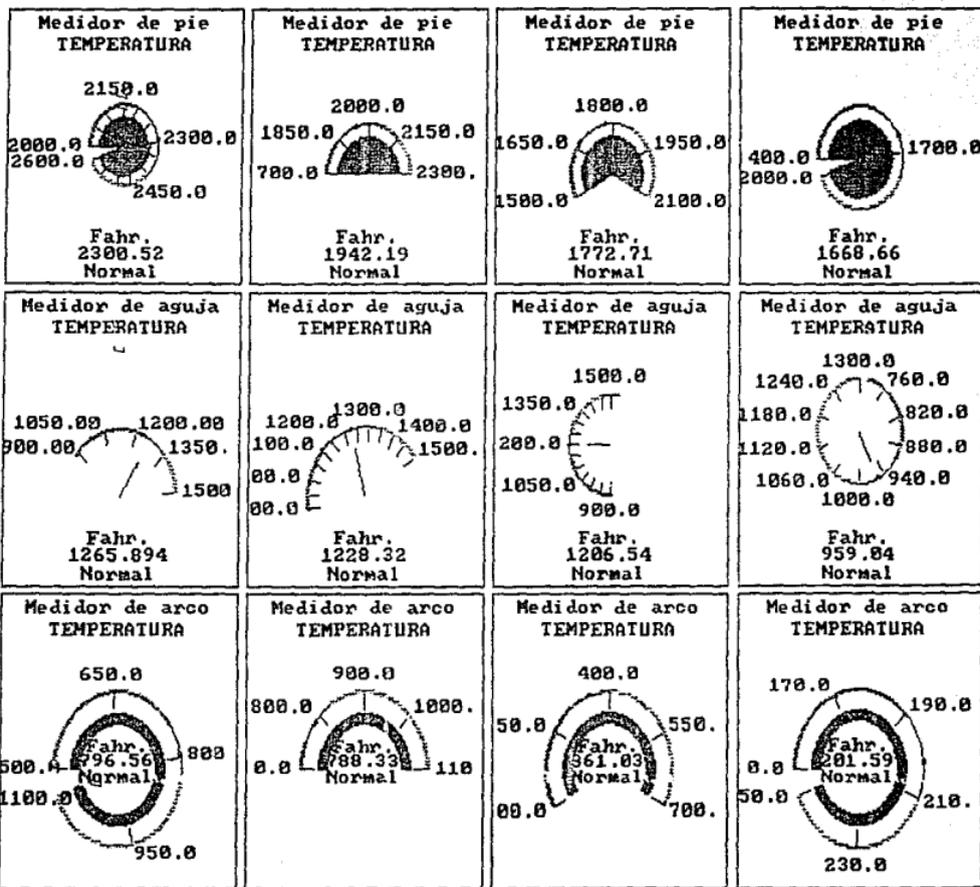


ROTAMETRO 2
Medidor de Arco



ROTAMETRO 3
Medidor de Arco





BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

American Boiler Manufacturers, "Industry Standards and Engineering Information - Steam Generating Equipment".

American Society for Testing Materials.

American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, ASHRAE.

American Society of Mechanical Engineers, ASME "Boiler and Pressure Vessel Code" (Sec. I - IX).

American Standards Association, ASME "Piping Code (ASA B31.1); American Standard Listing Requirements for Relief and Automatic Gas Shutoff Valves for Use on Water Heating Systems (Z21.22).

American Welding Society, "Welding Handbook".

Babcock & Wilcox Co. "Steam, Its Generation and Use".

de Lorenzi, O., "Combustion Engineering", Combustion Engineering Inc.

Institute of Boiler and Radiator Manufacturers, IBR, "Testing and Rating Code for Low Pressure Heating Boilers; IBR Ratings for Cast-Iron Boilers; IWH Testing and Rating Code for Indirect Storage and Tankless Water Heaters, External Type, Tested in Tank; IWH Testing and Rating Code for Indirect Tankless Water Heaters, Tested in Boilers".

Irvine and Lille., "Steam and Gas Tables with Computer Equations", Academic Pres Inc.

Keenan, J. H. and Keyes, F. G., "thermodynamics Propriertes of Steam", John Wiley & Sons, New York.

Marks, L. S., "Mechanical Engineers' Handbook", McGraw-Hill, New York.

National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, "National Board Inspection Code; Recommend Rules for National Board Boiler Blowoff Equipment; Safety Valves and Relief Valves Approved by the National Board".

Spring, H. m., Jr., "Boiler Operators Guide", McGraw-Hill, New York.

Steel Boiler Institute, SBI, "Rating code for Steel Boilers".

Taylor, P. B. and Foster, P. J., "The Total Emissivities of Luminous and Non-Luminous Flames", vol 17. Pergamon Press.

U. S. Departament of Navy, "General Specifications for Machinery".

"Van Nostrand's Scientific Enciclopedia", D. Van Nostrand, Princenton, New Jersey.