

300617

2  
2e)



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA  
Incorporada a la UNAM

"OPTIMIZACION Y AHORRO ENERGETICO  
EN CALDERAS DE VAPOR EN UNA  
INDUSTRIA DE AUTOGENERACION."

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA CON AREA  
PRINCIPAL EN INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A

ALEJANDRO AGUILERA GUZMAN

ASESOR DE TESIS

INGENIERO JORGE SALCEDO GONZALEZ

MEXICO, D.F.

1994

TESIS CON  
FALLA DE ORDEN

## **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.



**LA SALLE**

Al Paciente Honor:

**Alejandro Aguilera Guzmán**

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Ud. la continuación, el tema que aprobado por esta Dirección, proceso como Asesor de Tesis el Ing. Jorge Salcedo González, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista con área principal en Ingeniería Mecánica.

**"OPTIMIZACION Y AHORRO ENERGETICO EN CALDERAS DE VAPOR  
EN UNA INDUSTRIA DE AUTOGENERACION"**

con el siguiente índice:

	INTRODUCCION
CAPITULO I	GENERALIDADES DE CALDERAS
CAPITULO II	CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR
CAPITULO III	PUNTOS IMPORTANTES PARA EL AHORRO DE ENERGIA
CAPITULO IV	INSTRUMENTACION PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE GENERACION DE VAPOR
CAPITULO V	COSTO DE LA INSTRUMENTACION Y AHORRO ENERGETICO
	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA

Ruego a Ud., tomar debida nota de que un cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

**A T E N T A M E N T E**  
**"INDIVISA MANENT"**  
**ESCUELA DE INGENIERIA**  
Mexico, D.F., a 23 de Marzo de 1991

  
ING. JORGE SALCEDO GONZALEZ  
ASESOR DE TESIS

  
ING. EDMUNDO BARRERA MONSIVAIS  
D I R E C T O R

**UNIVERSIDAD LA SALLE**

BENJAMIN FRANKLIN 47, TEL. 510-99-60 MEXICO 06140, D.F.

**A mis padres por el ejemplo, apoyo, motivación y paciencia constante con que he contado siempre para llegar a cumplir este objetivo. Gracias.**

**A todos mis hermanos por su confianza y ejemplo y en especial a Rebeca y Jaime por la compañía, el apoyo y cariño que han tenido hacia conmigo.**

**A Lucía.**

# INDICE

	PAG.:
INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPÍTULO I .- GENERALIDADES DE CALDERAS.</b>	
1.1 CONCEPTOS TERMODINÁMICOS APLICABLES A CALDERAS	4
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS	21
1.3 PRINCIPALES COMPONENTES DE CALDERAS	26
1.4 MÉTODO DE OPERACIÓN	44
1.5 CIRCUITO DE CONTROL AUTOMÁTICO	48
<b>CAPÍTULO II .- CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.</b>	
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INDUSTRIA	53
2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR	55
2.3 MÉTODO ACTUAL DE OPERACIÓN	58
<b>CAPÍTULO III .- PUNTOS IMPORTANTES PARA EL AHORRO DE ENERGÍA.</b>	
3.1 CONTROL DE MEZCLA AIRE COMBUSTIBLE	64
3.2 APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN	69

3.3 TIPO DE COMBUSTIBLE	74
3.4 MANTENIMIENTO	78
3.5 TRATAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN	78
3.6 IMPORTANCIA DE LA INSTRUMENTACIÓN	83

#### CAPÍTULO IV .- INSTRUMENTACIÓN PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.

4.1 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN Y PRESIÓN DE CABEZAL DE VAPOR	86
4.2 CONTROL DE PRESIÓN DE VAPOR DE ATOMIZACIÓN	95
4.3 CONTROL DE TEMPERATURA DE AIRE DE COMBUSTIÓN	98
4.4 CONTROL DE NIVEL, AGUA DE ALIMENTACIÓN Y PURGA	101
4.5 CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR	108
4.6 CONTROL DE PRESIÓN DEL HOGAR DE LA CALDERA	112

#### CAPÍTULO V .- COSTO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y AHORRO ENERGÉTICO.

5.1 EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN	115
5.2 COSTO DE LA INSTRUMENTACIÓN	119
5.3 MONTO DE LA INVERSIÓN FIJA	124
5.4 MONTO DEL AHORRO ENERGÉTICO	126
5.5 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	130
CONCLUSIONES	131
BIBLIOGRAFIA	136
ANEXO A1	139

## INTRODUCCIÓN.

En la mayoría de las industrias, ya sean grandes o pequeñas, es prácticamente indispensable la utilización de una cantidad de vapor de agua para fines diversos como calefacción, generación de potencia (energía eléctrica), o para cualquier fin en donde ese fluido sea el más económico para algún proceso de fabricación. En muchas ocasiones el generador de vapor no se encuentra en condiciones óptimas de operación por diversas causas, pudiendo ser, falta de mantenimiento en general, alto consumo de combustible, elevadas emisiones contaminantes al ambiente, un sistema de control inadecuado, etc.

Al no operar los generadores de vapor de manera adecuada en una industria, aumentan los costos en la obtención del vapor, principalmente por el consumo innecesario de combustible, pues conjugando su precio elevado y las enormes cantidades que se consumen, resulta una gran cantidad de dinero gastado inútilmente, traduciéndose en una operación totalmente incoesteable para los industriales.

Además del alto precio en la obtención del vapor, también la vida útil de los generadores se ve mermada, y se requerirá de un mayor número de paros al año por mantenimiento, convirtiéndose en gastos fuertes y frecuentes que los industriales desean eliminar. El grado de seguridad en la operación de este tipo de equipos, también se ve afectado, pues se manejan presiones muy altas que requieren de recipientes en buen estado y que esten dentro de especificaciones marcadas por el fabricante. Si existiera algún error en la alimentación del combustible por alguna falla de control, puede presentarse un accidente desastroso. Los índices de emisiones contaminantes fuera de las normas especificadas, provocan costosas multas por parte de SEDESOL, o si fuera necesario, se puede llegar al caso de cierre de planta.

Todas estas razones, conllevan a un consumo de energía totalmente innecesario. Al optimizar el consumo de energía se ahorran grandes cantidades de dinero, además de que la energía es una necesidad que debemos cuidar.

La finalidad de este trabajo de investigación es la revisión de los puntos en los que debemos enfocar nuestra atención para obtener un funcionamiento óptimo, seguro y confiable en los generadores de vapor, enfatizando en los sistemas de control automático, pues de ellos depende en gran parte, una operación estable, segura y económica; se aplica a una industria cervecera, aunque también es aplicable a cualquier otro tipo de industria como una planta termoeléctrica, la industria textil, la petrolera, la papelera, etc.

Este trabajo consta de lo siguiente: primeramente se hace una explicación de los conceptos termodinámicos aplicables a los generadores de vapor y se da una clasificación de los tipos de calderas existentes y sus componentes más importantes; se presenta un método de operación de las calderas en forma sencilla y clara para su fácil comprensión y se explican los conceptos básicos del circuito de control automático.

Se hace una descripción del sistema de generación de vapor en una industria cervecera, mencionando los datos de operación que se utilizan a lo largo de todo el trabajo. Después se presentan los sistemas de control que se están utilizando en dicha industria incluyendo el sistema de control de nivel del domo, el control de combustión, el control de presión del hogar y el control de temperatura del vapor.

En la siguiente parte se da una somera explicación de cada punto que se considera importante, en los que existe la posibilidad de economizar energía, como son, la cantidad de aire que se requiere en relación a la cantidad de combustible que se inyecta a la caldera, el buen aprovechamiento de los gases de combustión, el tipo de combustible que se utilice,

el tener un buen programa de mantenimiento, el tratamiento del agua de alimentación a los generadores y la instrumentación aplicada al sistema de generación de vapor.

En la penúltima parte de este trabajo, se exponen los sistemas de control propuestos para el mejor funcionamiento de los generadores de vapor. Los sistemas que se proponen son, el sistema de control de combustión y presión de cabezal de vapor, el control de presión de vapor de atomización, el control de temperatura del aire de combustión, el control de agua de alimentación y purga, el control de temperatura del vapor y el control de presión del hogar de la caldera.

Por último se presenta un estudio económico, que contiene la descripción de los equipos de control propuestos y sus costos, así como el monto de la inversión y su tiempo de recuperación basado tan solo en el ahorro de combustible obtenido.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES DE CALDERAS

### 1.1 CONCEPTOS DE TERMODINÁMICA APLICABLES A CALDERAS

Empezando por definir termodinámica, es la ciencia que estudia la energía en sus varias formas y establece las fórmulas matemáticas que describen su conversión y su utilización, atendiendo también las propiedades de las sustancias involucradas.

Energía puede definirse como la habilidad para realizar un trabajo. Trabajo es el promedio de fuerzas requeridas para regular un movimiento en la misma dirección de la fuerza. En termodinámica, trabajo es la interacción energética entre un sistema y su exterior a través de aquellos límites del sistema en donde no hay transferencia de masa, debida a alguna diferencia de propiedades intensivas, mientras no sea diferencia de temperaturas.

Calor es la energía en tránsito que se da cuando existe una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos o entre un cuerpo y el medio exterior. El calor siempre se transmite de una temperatura mayor a otra menor. La transferencia de calor puede darse por conducción, por convección y por radiación.

La energía puede tener varias formas que son : térmica, eléctrica, química, solar, eólica, geotérmica, nuclear, biomasa, maremotriz y mecánica; esta última a su vez puede ser potencial o cinética.

Caloría es una unidad de energía térmica y es la suma de energía requerida para elevar un gramo de agua en un grado centígrado. BTU (British Thermal Unit) es la suma de energía requerida para elevar una libra de agua en un grado Fahrenheit.

Un sistema termodinámico se define como una cantidad de materia de masa fija sobre la cual se enfoca la atención para su estudio. Todo sistema tiene sus límites de sistema que lo separa del espacio exterior y pueden ser móviles o fijos. Un sistema aislado es el que no tiene influencia del exterior, o sea que ni calor ni trabajo cruzan los límites del sistema. Se habla de un volumen de control cuando el sistema se ve involucrado con flujo de masa, calor o trabajo que se realiza a través de la superficie que ocupa el volumen de control, llamada superficie de control. Al volumen de control también se le llama sistema abierto; un sistema cerrado es aquel en el que no fluye masa a través de los límites del sistema, pero sí puede fluir energía. Un sistema adiabático es aquel en el que no existe transferencia de calor con el medio exterior.

Cada sustancia puede estar presente en tres fases distintas, sólido, líquido o gaseoso, pero cada fase puede encontrarse a presión y temperatura dadas que definen el estado de la sustancia. El estado de una sustancia puede describirse por ciertas propiedades termodinámicas. Las propiedades termodinámicas se dividen en dos clases: intensivas y extensivas, siendo las primeras independientes de la masa y las segundas varían directamente con la masa. Presión, temperatura, densidad y volumen específico son ejemplos de propiedades intensivas, así como peso y volumen total son propiedades extensivas. Las sustancias pueden cambiar de estado por medio de un proceso. En un proceso isotérmico la temperatura permanece constante, en un isobárico la presión permanece constante y en un isométrico el volumen es constante (Ver figura 1).

Un ciclo es una serie de procesos que sufre un sistema en el que el estado final es

igual al estado inicial. Una sustancia pura es aquella que presenta una composición química homogénea e invariable. Una sustancia simple es aquella que tiene el comportamiento de una sustancia pura aunque no lo sea, mientras no exista un cambio de estado. Para poder definir el estado de una sustancia simple se requiere conocer dos propiedades intensivas e independientes.

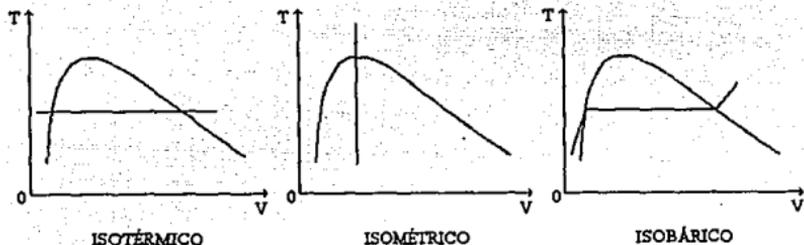


FIG. 1 PROCESOS TERMODINÁMICOS

Volumen específico se define como volumen por unidad de masa. La densidad de una sustancia se define como masa por unidad de volumen, por tanto, es recíproca del volumen específico.

Presión se define como la componente normal de una fuerza por unidad de superficie. Hablando de un fluido en reposo en un punto dado, la presión es la misma en todas direcciones. Al hablar de presión absoluta se está tomando en consideración la presión atmosférica. La presión manométrica es la que tiene un valor mayor a la presión atmosférica y se lee con un manómetro indicando la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. La presión de vacío es menor a la presión atmosférica y se lee con

un vacuómetro indicando también la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica. La presión atmosférica se mide con un barómetro y también recibe el nombre de presión barométrica. La presión absoluta es pues, la suma de la presión manométrica mas la presión barométrica; o bien, la presión absoluta es la diferencia entre la presión barométrica y la presión de vacío.

Temperatura de saturación es la temperatura en la cual se efectua la vaporización a una presión dada, llamada presión de saturación. De igual forma la Presión de saturación es la presión en la cual se efectua la vaporización a una temperatura dada, llamada temperatura de saturación. Para una sustancia pura existe una relación definida entre la presión de saturación y la temperatura de saturación.

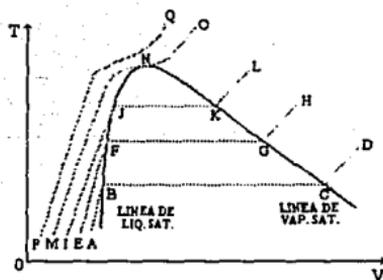
Líquido Saturado es la sustancia que existe como líquido a la presión y temperatura de saturación. Si la temperatura es más baja que la de saturación, o sea que la temperatura es menor a la temperatura de saturación a la presión dada se llama Líquido Subenfriado. Si la presión es mayor a la presión de saturación para la temperatura dada se le llama Líquido Comprimido.

Vapor Saturado es la sustancia que existe como vapor a la presión y temperatura de saturación. Cuando el vapor está a una temperatura mayor a la de saturación se dice que es Vapor Sobrecalentado. Cuando una sustancia se presenta como mezcla tanto en forma líquida como en forma de vapor a la temperatura de saturación, la Calidad de la mezcla se define como la porción de masa de vapor sobre la masa total (porcentaje de vapor); cuando se tiene una calidad de 100 por ciento, se está tratando con Vapor Saturado y Seco. Se conoce como Humedad al porcentaje de agua que tiene una mezcla líquido-vapor; por lo tanto, el porcentaje de humedad mas el porcentaje de calidad es igual a 1.

Si consideramos un sistema con 1 Kg m (masa) de agua contenido en un dispositivo de cilindro y émbolo, en el que se tienen varios bloques encima del émbolo ejerciendo una presión constante de 1.033 Kgf/cm<sup>2</sup> y una temperatura de 15.6°F y se le transmite calor. Si representamos los procesos por los que pasa este sistema en un diagrama temperatura-volumen, obtendremos el diagrama que se presenta en seguida (Ver figura 2).

"A" representa el estado inicial, "B" el estado de líquido saturado a 100°C (212°F) y la línea AB el proceso durante el cual se calienta el líquido desde la temperatura inicial a la de saturación; el punto "C" es el estado de vapor saturado y la línea BC es el proceso a temperatura constante en el cual tiene lugar el cambio de fase de líquido a vapor. La línea CD representa el proceso en el que se sobrecalienta el vapor a presión constante en donde la temperatura y el volumen aumentan.

De manera similar, a una presión constante de 70.31 Kgf/cm<sup>2</sup> a una temperatura inicial de 15.6°C, el punto "I" representa el estado inicial y el volumen específico será menor que el que se tiene a 1.033 Kgf/cm<sup>2</sup>. La vaporización empezará en el punto "J" con una temperatura de 284.8°C (544.6°F). El punto "K" será el estado de vapor saturado y la línea KL el proceso de presión constante en el cual el vapor es sobrecalentado.



**FIG. 2 DIAGRAMA T-V QUE MUESTRA FASE LÍQUIDA Y FASE VAPOR PARA EL AGUA (Diagrama de Mollier)**

A una presión de  $225.4 \text{ Kgf/cm}^2$  encontramos que el proceso representado por la línea MNO ya no es de vaporización a temperatura constante como en los ejemplos anteriores, los procesos BC y JK, sino que "N" es un punto de inflexión con pendiente cero. Este punto "N" se llama Punto Crítico y en él son idénticos el líquido saturado y el vapor saturado. Se llaman temperatura crítica, presión crítica y volumen crítico a los valores de temperatura, presión y volumen específico en el punto crítico.

En el diagrama anterior, la línea NJB representa la línea de líquido saturado y la línea NKC la línea de vapor saturado.

La Ley Cero de la Termodinámica establece que cuando dos cuerpos tienen igualdad de temperatura con un tercero, los tres tienen igualdad de temperatura entre sí.

La Primera Ley de la Termodinámica con frecuencia se llama ley de la conservación de la energía, y establece que la integral cíclica del calor es igual a la integral cíclica del trabajo; es decir, que el calor neto agregado a un sistema que opera cíclicamente, es igual en magnitud, al trabajo neto desarrollado por este. La energía de un sistema está constituida por la suma de energía cinética, energía potencial y energía interna. La energía cinética es la energía relacionada con el movimiento de las moléculas; energía potencial está relacionada con la posición que tienen dichas moléculas y la energía interna es la suma de otras energías manifestadas ya sea como estructura de un átomo, energía química presente en una batería eléctrica, energía eléctrica en un condensador cargado, etc. La energía interna tiene como símbolo la letra U, y depende de la temperatura y de la densidad.

La Entalpía de un sistema se define como la suma de la energía interna más el producto de la presión por el volumen. Esta propiedad no tiene ningún sentido o interpretación

física, sólo es una agrupación de propiedades. Se representa por la letra H.

La ecuación general de la energía para cualquier máquina o proceso se escribe de la siguiente forma:

$$(V_1^2/2g) + P_1v_1 + U_1 + Z_1 \pm W \pm Q = (V_2^2/2g) + P_2v_2 + U_2 + Z_2$$

donde:

V = velocidad

g = constante gravitacional

$(V^2/2g)$  = energía cinética del fluido

P = presión

v = volumen específico

Pv = trabajo de flujo

U = energía interna del fluido

Z = elevación o energía potencial

W = trabajo mecánico hecho por, ó sobre el fluido

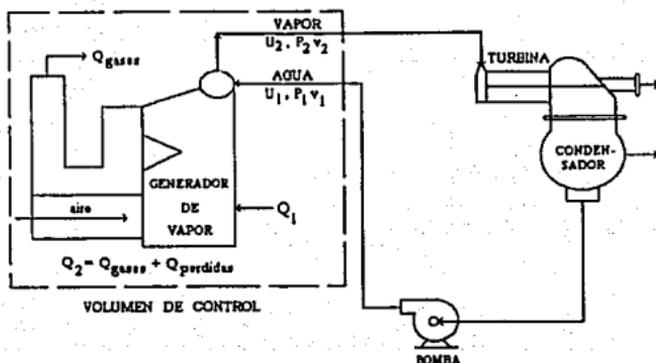
Q = calor añadido o sustraído del sistema

h = entalpía

Subíndice 1 = condiciones de entrada

Subíndice 2 = condiciones de salida

Para aplicar la ecuación general de la energía a una caldera teóricamente ideal, se muestra en la figura 3, el ciclo conformado por los aparatos necesarios dentro de la generación de vapor; éstos son el generador de vapor, la máquina útil o turbina, el condensador y la bomba. Como lo único que interesa analizar es lo que sucede en el generador de vapor, lo tomamos como volumen de control y limitamos su superficie de control por medio del cuadro de líneas pausadas.



**FIG. 3 SUPERFICIE DE CONTROL PARA EL GENERADOR DE VAPOR**

Analizando la ecuación general de la energía para este volumen de control en forma teórica, los términos que involucran velocidad tanto a la entrada como a la salida de la caldera (energía cinética) se eliminan, puesto que la velocidad con la que entra el agua a la caldera es la misma que la velocidad con que sale el vapor.

También los términos que involucran alturas tanto a la entrada como a la salida de la caldera (energía potencial) se eliminan, pues es en el domo superior o domo de vapor en donde entra el agua de alimentación y sale el vapor producido, no existiendo diferencia considerable en la altura de entrada de agua y salida de vapor.

El término que expresa el trabajo mecánico hecho por el fluido o sobre el fluido, también se elimina, puesto que ningún trabajo mecánico se está ejerciendo con el fluido dentro de este volumen de control. Por lo tanto, la ecuación general de la energía para una caldera teóricamente ideal será:

$$P_1 v_1 + U_1 + Q_{1-2} = P_2 v_2 + U_2$$

$$Q_{1-2} = (P_2 v_2 + U_2) - (P_1 v_1 + U_1)$$

$$Q_{1-2} = h_2 - h_1$$

La Segunda Ley de la Termodinámica indica que todo proceso es "degenerativo", es decir, que si el resultado de un proceso es una degradación de la energía, en cuanto a su capacidad de realizar trabajo, el proceso ocurrirá. La Entropía es la propiedad que describe (matemáticamente) la porción de calor añadido a un proceso, que no puede convertirse por sí solo en trabajo. Esta propiedad se representa por la letra "S".

Con el objeto de obtener un análisis del balance de materiales de una caldera, se describen las siguientes ecuaciones:

$$m_{aa} = m_{vs} + m_{pur}$$

donde:

$m_{aa}$  = flujo másico de agua de alimentación

$m_{vs}$  = flujo másico de vapor saturado

$m_{pur}$  = flujo másico de la purga

Por lo general se da una relación entre el flujo de agua de alimentación y el flujo de purga. De igual forma se procede para obtener el balance de materiales en el flujo de aire de entrada y salida de gases de combustión.

Con el objeto de obtener un análisis del balance de energía en la caldera se describen las siguientes ecuaciones:

$$Q_{ai} + Q_{aa} + Q_{comb} = Q_{vs} + Q_{pur} + Q_{ga}$$

donde:

$Q_{ai}$  = calor que lleva el aire que entra a la caldera

$Q_{aa}$  = calor que lleva el agua de alimentación =  $h_{aa} * m_{aa}$

$Q_{comb}$  = calor desprendido por el combustible.

$Q_{vs}$  = calor que lleva el vapor saturado =  $h_{vs} * m_{vs}$

$Q_{pur}$  = calor desprendido en la purga =  $h_{pur} * m_{pur}$ ;  $h_{pur} = h_{vs}$

$Q_{ga}$  = calor que llevan los gases de combustión a la salida.

$h_{aa}$  = entalpía del agua de alimentación; en tablas termodinámicas.

$h_{vs}$  = entalpía del vapor saturado; en tablas termodinámicas.

$h_{pur}$  = entalpía de la purga.

Para encontrar el calor necesario en la caldera, se prosigue de la siguiente forma:

$$Q_{nec} = ( Q_{comb} / \text{Eficiencia} )$$

donde:

$Q_{nec}$  = Calor necesario para la caldera

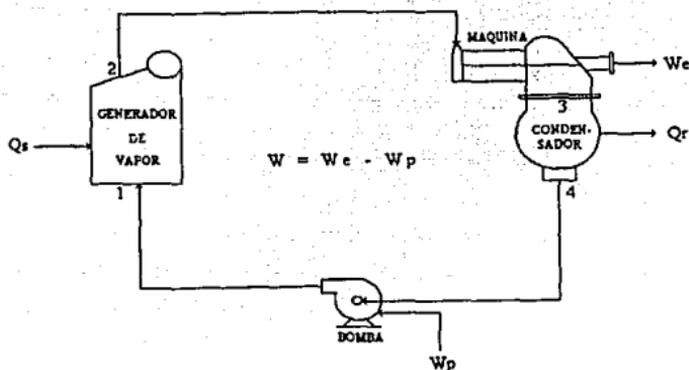
Eficiencia térmica = fracción de calor suministrado al sistema en el ciclo termodinámico que se convierte en trabajo neto positivo (aprovechable).

A esta fórmula anterior se le debe agregar un tres por ciento debido a las pérdidas por radiación. Para conocer la cantidad de combustible necesario se utiliza la siguiente fórmula:

$$m_{comb} = ( Q_{nec} / \text{poder calorífico del combustible} )$$

donde el poder calorífico es la cantidad de calor liberado en la unidad de volumen o de peso de un combustible.

El ciclo termodinámico ideal para plantas de fuerza de vapor es el Ciclo Rankine que se muestra en la siguiente figura (Ver figura 4):



**FIG. 4 CICLO RANKINE**

El ciclo ideal de Rankine está compuesto por una caldera o generador de vapor, una turbina o máquina motriz, un condensador y una bomba de agua de alimentación a la caldera cerrándose así el ciclo; el proceso que desarrolla la caldera será el proceso 1-2 entrando en la caldera líquido subenfriado, pasa a ser líquido saturado, vapor y después vapor saturado y seco teniendo la posibilidad de obtener vapor sobrecalentado en el punto 2; tenemos entonces que el calor en este proceso de presión constante y flujo estable se calcula como  $Q_s = H_2 - H_1$ .

El vapor fluye hacia la turbina con una entropía  $H_2$  y se expande adiabáticamente con entropía constante y una pérdida de presión en el estado 3; durante la expansión se produce trabajo mecánico  $W_e = H_2 - H_3$ .

En el estado 3, el vapor entra en el condensador como un vapor saturado humedo para transferir energía  $Q_r$  para enfriar el agua; en este paso la energía sale del ciclo y se convierte el vapor en líquido saturado en el punto 4, siendo  $Q_r = H_3 - H_4$ . La bomba succiona el condensado para presurizarlo e inyectarlo nuevamente en la caldera como líquido subenfriado. La bomba necesita energía mecánica de entrada  $W_p$  para trabajar sobre el agua. Esa entrada al ciclo es una compresión adiabática de entropía constante  $W_p = H_1 - H_4$ . Para calcular la eficiencia térmica se debe tomar en cuenta que como es un ciclo cerrado, toda la energía que entra es igual a la energía de salida:

$$Q_s + W_p = W_c + Q_r$$

Reordenando  $W_c - W_p = Q_s - Q_r$

El trabajo neto de salida del ciclo se puede escribir como:

$$W = W_c - W_p = Q_s - Q_r$$

La eficiencia del Ciclo Rankine será:

$$e = (W / Q_s) = [(Q_s - Q_r) / Q_s] = 1 - (Q_r / Q_s)$$

$$e = 1 - [(H_3 - H_4) / (H_2 - H_1)]$$

En los siguientes diagramas T-S se describe el ciclo Rankine; en la Figura 5 inciso (a) se representa un ciclo simple donde la caldera produce vapor saturado y seco.

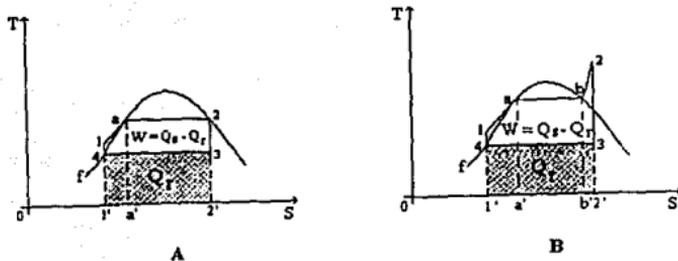


FIG. 5 DIAGRAMAS T-S CICLO RANKINE

En el estado 1 la caldera recibe líquido subenfriado calentándolo hasta ser líquido saturado en el punto "a"; de "a" al estado 2 la caldera vaporiza el líquido saturado hasta vapor saturado y seco; el área bajo 1-a (1-a-a'-1'-1) representa el calor añadido para elevar el agua a líquido saturado; el área bajo la curva a-2 (a-2-2'-a'-a) representa el calor añadido para vaporizar el líquido hasta vapor saturado. La suma total de áreas bajo la curva 1-a-2 (1-a-2-2'-1'-1) es  $Q_s$ , el calor añadido al ciclo.

El proceso 2-3 de entropía constante es la expansión del vapor en la turbina que produce un trabajo  $W_e$ . El proceso 3-4 de enfriamiento a presión constante es la condensación del vapor en el condensador; el área bajo 3-4 (área sombreada) indica el calor sustraído por el fluido de trabajo  $Q_r$ . El pie formado por la distancia entre 4-1 es la compresión de entropía constante del agua que pasa por la bomba  $W_p$ ; para bajas presiones, ese pie aparece como un punto y  $W_p$ , o sea el trabajo necesario para impulsar la bomba es cero.

El total del área bajo la curva f-1-a-2 es  $H_2$  y el área bajo la curva f-1 es  $H_1$ ; de la misma forma el total del área bajo la curva f-4-3 es  $H_3$  y bajo la curva f-4 es  $H_4$ ; recordando que  $H_2 - H_1 = Q_s$ , y  $H_3 - H_4 = Q_r$ .

En el análisis del ciclo Rankine, es útil pensar que su rendimiento es dependiente de la temperatura promedio a la cual se añade calor, y de la temperatura promedio a la cual el calor es cedido. Cualquier cambio que aumente la temperatura promedio a la cual el calor se suministra o que disminuya la temperatura promedio a la cual el calor es cedido, incrementará el rendimiento del ciclo Rankine.

En la Figura 5 inciso (b) se representa un ciclo Rankine con sobrecalentamiento, siendo el área bajo 1-a (1-a-a'-1'-1) el calor necesario para pasar de líquido subenfriado a líquido saturado, el área bajo a-b (a-b-b'-a'-a) indica el calor necesario para vaporizar el líquido saturado y el área bajo b-2 (b-2-2'-b'-b) mide el calor para sobrecalentar el vapor saturado; la suma de las áreas mencionadas indica el calor añadido o de entrada al ciclo  $Q_s$ ; después del punto 2, el ciclo continúa normalmente.

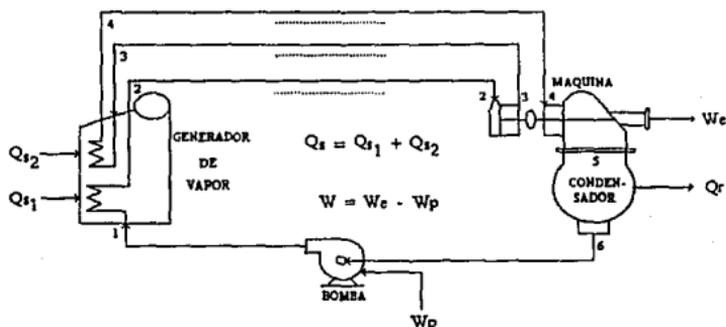


FIG. 6 CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO

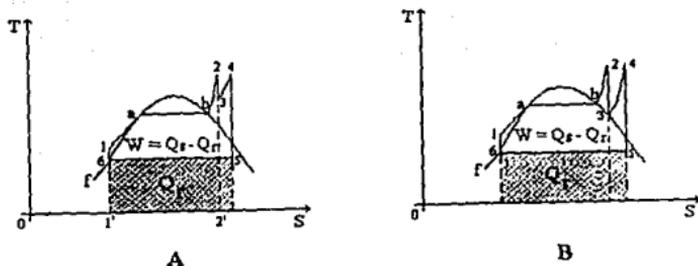
Se puede observar que en el caso de vapor sobrecalentado, el promedio de temperaturas se eleva cuando se añade calor al sistema y tanto el calor añadido ( $Q_s$ ) como el extraído ( $Q_r$ ) aumentan, pero no en la misma proporción, siendo mayor el aumento del calor añadido  $Q_s$ , por lo que aumenta la eficiencia del ciclo, pues se tiene mayor cantidad de calor aprovechable y se obtiene vapor de más alta calidad.

Se pueden obtener mejoras en el ciclo Rankine si se utiliza un recalentamiento de vapor sobrecalentado (Figura 6); el ciclo de recalentamiento ha sido desarrollado para incrementar el rendimiento con altas presiones y también evitar la humedad excesiva en los pasos de baja presión de la turbina. El ciclo se lleva a cabo alimentando dos entradas de vapor en la turbina o máquina motriz (una de vapor sobrecalentado y otra de vapor recalentado). Esto se logra utilizando en el generador de vapor un recalentador de vapor, utilizando el calor que llevan los gases de combustión para tal efecto. Ahora el calor suministrado en el generador de vapor  $Q_s$ , será descompuesto en dos calores  $Q_{s1}$  y  $Q_{s2}$ , siendo el primero el calor absorbido en el sobrecalentador y  $Q_{s2}$  el calor absorbido en el recalentador.

La presión a la cual el vapor es recalentado puede ser variable. En la siguiente gráfica (Figura 7) podemos ver que existe una pequeña pérdida de presión en la expansión del vapor, paso 2-3; en el ciclo ideal, el vapor es recalentado a presión constante del punto 3 al 4; en el proceso de expansión a entropía constante, se llega al estado 5 por medio del condensador.

El área bajo la curva 1-2 (1-2'-1'-1) mide el calor de entrada a la caldera en el sobrecalentador, es decir  $Q_{s1}$ ; el área bajo la curva 3-4 (área sombreada) indica el calor de entrada del vapor recalentado, es decir  $Q_{s2}$ . El proceso de recalentamiento se considera como un segundo sobrecalentamiento.

Se puede variar la presión de recalentamiento para obtener una mejor eficiencia de recalentamiento medida por el trabajo que la turbina o máquina motriz pueda desarrollar, en las gráficas T - S (Figura 7 a y b) podemos ver la diferencia de áreas bajo la curva 3-4, obteniendo un mejor aprovechamiento de calor en la gráfica de la derecha (Figura 7 b) con una presión de recalentamiento menor.



**FIG. 7 DIAGRAMAS T-S CICLO RANKINE CON RECALENTAMIENTO**

Para calcular la eficiencia del ciclo Rankine con recalentamiento, se procede de igual manera que la anterior:

$$e = (W / Q_s) = [(W_c - W_p) / (Q_{s1} + Q_{s2})]$$

y en función de entalpías:

$$e = [(H_2 - H_3) + (H_4 - H_5) - W_p] / [(H_2 - H_1) + (H_4 - H_3)]$$

donde las entalpías corresponden a los estados que se indican en las gráficas.

Resumiendo, al tener vapor sobrecalentado, se aprovecha mejor el calor que se obtiene del combustible notándose con un aumento en la eficiencia del ciclo y obteniendo un vapor de mayor calidad; de igual manera, al recalentar el vapor, aunque se trabaja con presiones menores, se está aprovechando el calor remanente de los gases y se recupera la calidad del vapor que se había perdido en la primera etapa de la turbina, convirtiéndolo nuevamente en vapor aprovechable.

Es muy importante analizar las diferentes formas de aumentar el rendimiento de los generadores de vapor, pues éstos se utilizan en la mayoría de las industrias y representan grandes gastos de operación, siendo en muchas ocasiones, un considerable porcentaje de dichos gastos totalmente inútiles, pues se está perdiendo energía por medio de gases calientes que escapan por la chimenea, y produciendo índices contaminantes por arriba de los permitidos.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS CALDERAS

Antes de hacer cualquier clasificación de calderas, se debe definir lo que es una caldera; una caldera es un transformador de energía térmica capaz de transferir de forma conveniente el calor producido por una combustión, o generado por otro fenómeno físico o químico, a un fluido (generalmente agua) destinado, a su vez, a ceder la energía recibida, bajo forma térmica o mecánica, de diversos modos y para múltiples usos.

Se puede afirmar que prácticamente en todas las industrias es indispensable la utilización de una cantidad de vapor de agua, sea para propósitos de calefacción, de generación de potencia, o para cualquier fin en donde este fluido sea el más económico para algún proceso de fabricación.

Un generador de vapor es entonces, un equipo que aprovecha la energía liberada por el combustible al quemarse, para producir vapor. Debido a las numerosas y diferentes clases de servicio a que se destinan los generadores de vapor, a la variedad de condiciones que acompañan a su uso y a otros aspectos de carácter comercial, son dispositivos durables, seguros y económicos.

No existe una norma estándar para hacer una agrupación, pero en forma general los generadores de vapor pueden clasificarse como sigue:

1. Con respecto a su Construcción y forma de calentamiento:

a) Pirotubulares (tubos de humo). En las calderas pirotubulares, los productos de la combustión pasan por el interior de los tubos que forman la superficie de transferencia de calor, los cuales se encuentran rodeados de agua.

b) Acuotubulares (tubos de agua curvos y rectos). Por el contrario a las anteriores, en las calderas acuotubulares, el agua que se va a transformar en vapor pasa por el interior de los tubos y los gases calientes se encuentran en contacto con la superficie externa de los tubos.

2. Con respecto al servicio que prestan y a su situación:

a) Estacionarios. Una caldera estacionaria es la que se ha diseñado para instalarse en un lugar fijo, para satisfacer demandas de vapor industriales o domésticas, sin que esto quite la posibilidad de trasladarse de un lugar a otro, pero de ser así habría necesidad de desmantelarla parcial o totalmente.

b) Móviles. Las calderas móviles son aquellas que pueden cambiar de lugar y pueden ser portátiles, locomóviles y marinas; las portátiles se pueden fijar en un lugar o en otro siempre y cuando se disponga del espacio suficiente; las locomóviles se utilizaban en las locomotoras de vapor, aunque existen construcciones de este tipo, aplicables a servicio estacionario; una caldera marina es aquella que se ha diseñado específicamente de acuerdo a las necesidades de servicios en transportes marítimos.

3. Con respecto a la presión de vapor <sup>1</sup>(Ver figura 8):

a) Caldereta. Una caldereta maneja presiones por debajo de los 19 Kg/cm<sup>2</sup> (275 lb/pulg<sup>2</sup>)

---

<sup>1</sup>The Babcock & Wilcox Co., Steam

b) Caldera. Se considera una caldera aquella que sea capaz de manejar presiones que estén entre 19 y 53 Kg/cm<sup>2</sup> (275 y 750 lb/pulg<sup>2</sup>).

c) Generador de Vapor. Son todos aquellos que manejan presiones superiores a los 53 Kg/cm<sup>2</sup> (750 lb/pulg<sup>2</sup>).

4. Con respecto a la disposición del hogar:

a) De hogar interior. Generalmente se encuentran calderas de este tipo en las industrias.

b) De hogar exterior. Cuando una caldera tiene el hogar exterior, éste puede estar debajo o enfrente de la caldera.

5. Con respecto al recorrido de los gases de combustión (pirotubulares):

a) De un paso.

b) De dos pasos.

c) De tres pasos.

d) De cuatro pasos.

Al hablar de los pasos de una caldera, se está hablando de que cada paso es el recorrido en un sentido que los gases de combustión realizan dentro de la caldera.

6. Por la posición de los tubos:

a) Horizontales.

b) Verticales.

c) Inclinados.

7. Por la presión del sistema:

a) Presión positiva. Las calderas de presión positiva tienen un ventilador de tiro forzado para la entrada de aire y tiro natural para la salida de los gases de combustión. Así en el interior de la caldera, la presión es mayor que la presión atmosférica, es decir, se tiene una presión positiva.

b) Presión negativa. Las calderas de presión negativa cuentan con un ventilador de tiro forzado para la entrada del aire y un ventilador de tiro inducido para la salida de los gases de combustión. De esa manera se crea un vacío en el interior del generador de vapor, es decir, la presión en el interior es menor a la presión atmosférica, por lo tanto se tiene una presión negativa.

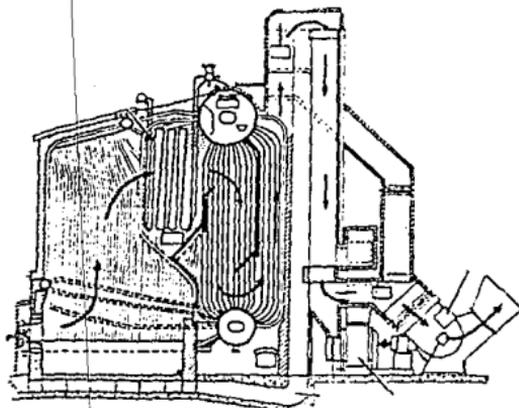
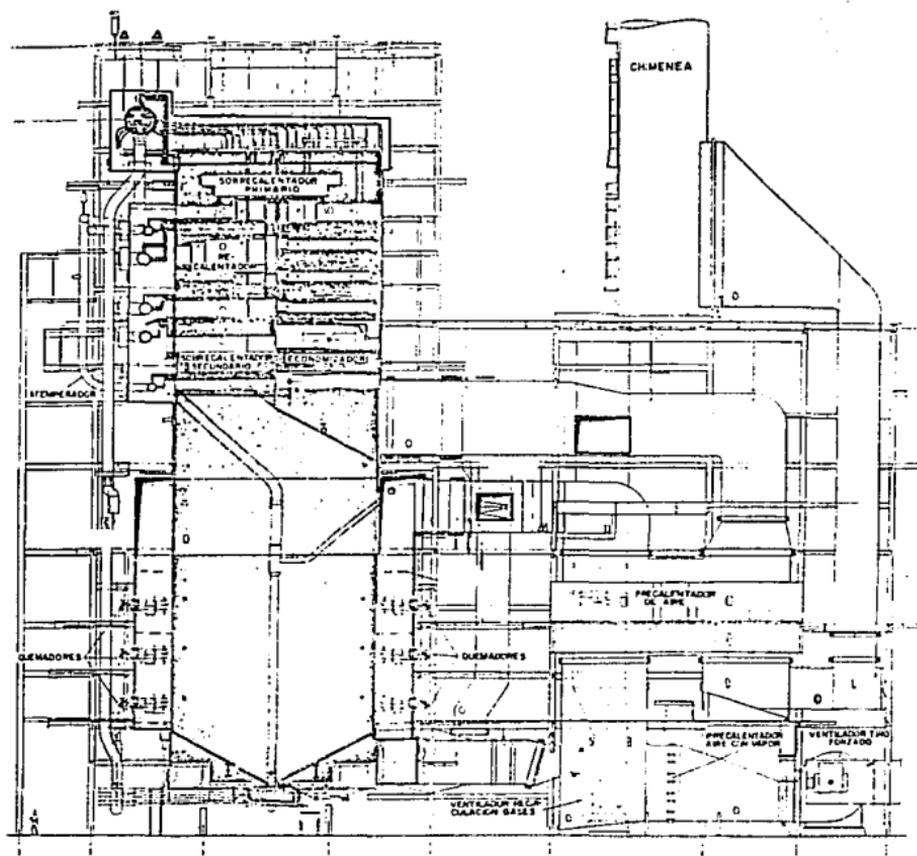


FIG. 8 a) CALDERA



**FIG. 8 b) GENERADOR DE VAPOR**

Después de hacer una clasificación de las calderas, es necesario describir sus principales componentes.

### 1.3 PRINCIPALES COMPONENTES DE CALDERAS

En cualquier caso de calderas de la clasificación anterior, los generadores de vapor constan de dos partes fundamentales que son: el horno u hogar y la caldera. Además de estas partes fundamentales, existen otras partes auxiliares, muchas de ellas indispensables para la operación y otras necesarias desde el punto de vista de economía en la producción de vapor. Entre otras se cuentan las siguientes:

- El sobrecalentador de vapor
- El recalentador de vapor
- El economizador
- El precalentador de aire
- La chimenea
- El quemador (o emparrillado)
- Los ventiladores
- Domo superior
- Domo inferior
- Los dispositivos indicadores y de control
- Los dispositivos de seguridad
- Los registros
- Purgas

El Horno u Hogar es la cámara en donde tiene lugar la combustión del combustible. La forma del horno es una de las consideraciones más importantes en el diseño de un generador de vapor, para tener un buen aprovechamiento del combustible utilizado, que se

traduzca en la obtención de un alto rendimiento térmico. Debe tenerse presente que en las instalaciones muchas veces se descuida este aspecto, haciéndose inversiones de importancia para lograr por otros medios un aumento del rendimiento y olvidando que puede ganarse más con un buen diseño del hogar.

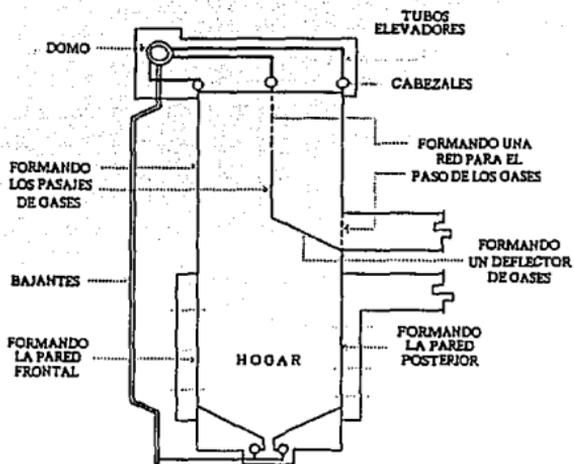
La Caldera es la parte del generador de vapor formada por tubos, cabezales y recipientes que forman parte del circuito de circulación de agua o de la mezcla agua-vapor. Sus principales componentes son los tubos de generación, tubos elevadores, tubos bajantes, domo de vapor, domo inferior y cabezales.

En los tubos de generación se realiza el calentamiento del agua y parte de ésta se convierte en vapor; los tubos se agrupan alineados uno junto a otro para constituir las paredes del hogar y los pasajes de los gases.

Los tubos elevadores son tubos de enlace entre los tubos de generación y el domo; en su interior llevan la mezcla de agua y vapor provenientes de los tubos de generación y estos tubos no están expuestos al calor.

Los tubos bajantes son tuberías de mayor diámetro que bajan por el exterior del hogar no presentándose al calor; contienen el agua que baja del domo superior (de vapor) y la envían al (o a los) domo(s) inferior(es).

El domo es un recipiente cilíndrico horizontal con determinado nivel de agua. Aquí es donde entra el agua de alimentación que circulará por los tubos y también recibe la mezcla de agua-vapor proveniente de los tubos elevadores; consta de separadores de vapor que realizan la separación de vapor producido y agua. El domo no está expuesto al calor.



**FIG. 9 COMPONENTES DE LA CALDERA**

El domo inferior es un recipiente cilíndrico horizontal de menor diámetro que el domo y se localiza en la parte inferior del hogar sin que se exponga la calor; sirve como cabezal distribuidor y enlaza a los bajantes con los tubos generadores. De aquí parten todos los tubos de generación. Cuando la caldera no cuenta con domo inferior, se cuenta con varios cabezales distribuidores.

Los cabezales sirven como distribuidores o descargas comunes de un grupo de tubos y enlazan a los tubos generadores con los bajantes o con los elevadores. No están expuestos al calor.

Un sobrecalentador de vapor, como su nombre lo indica, tiene por objeto elevar la temperatura del vapor que se genera en la caldera, permaneciendo constante la presión del

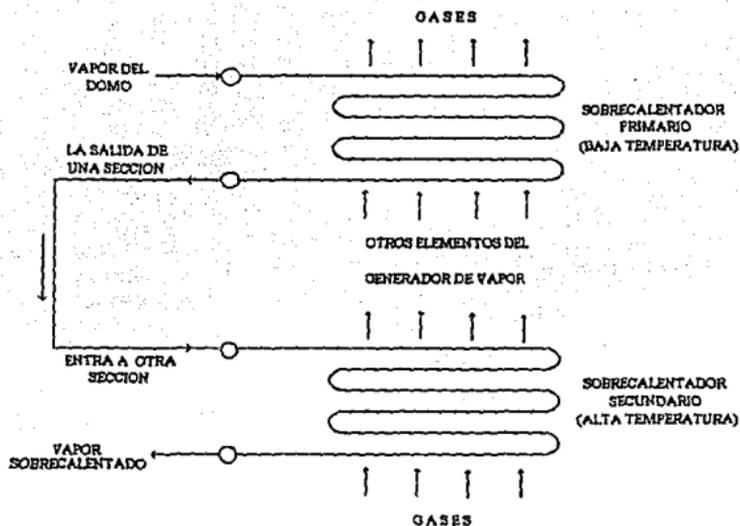
sistema; recibe vapor saturado proveniente del domo y lo sobrecalienta hasta la temperatura requerida por la turbina.

La aplicación de un sobrecalentador de vapor trae numerosos beneficios, entre los cuales están los siguientes:

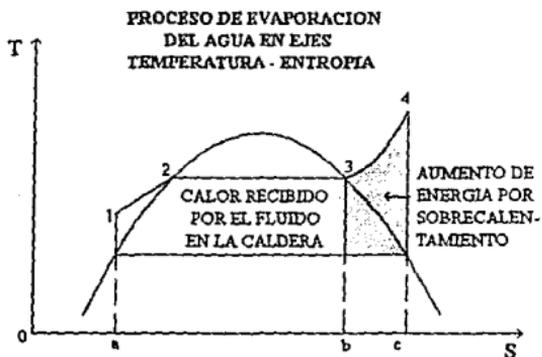
- Aumenta la eficiencia del ciclo.
- Aumenta la calidad del vapor.
- Se obtiene mayor trabajo en la turbina y se pueden tener más pasos en la turbina antes de que se forme humedad en el vapor.

Los sobrecalentadores están formados de gran cantidad de tubos conectados a un cabezal de entrada y otro de salida. Los tubos se fabrican de aleaciones de acero de alta calidad o bien, de aceros inoxidables debido a las altas temperaturas que deben soportar. De acuerdo con su apariencia exterior, los sobrecalentadores pueden ser lisos o de aletas, éstas últimas para aumentar la superficie de transmisión de calor.

Considerando la disposición que guardan dentro del generador, éstos pueden ser convectivos, radiantes y de convección-radiación (combinados), según reciban el calor de los gases de combustión por convección, por radiación o por una combinación de ambos, respectivamente. Los convectivos reciben el calor de los gases de combustión y provocan un aumento en la temperatura de salida del vapor cuando se aumenta la carga; en diferencia, los radiantes provocan una disminución de la temperatura de salida del vapor cuando aumenta la carga y reciben el calor directo de la flama del hogar. Los sobrecalentadores radiantes están colocados en la parte superior del hogar y los convectivos se localizan en los pasajes de los gases calientes; los radiantes-convectivos se encuentran en una zona intermedia.



**FIG. 10 SOBREALENTADOR FORMADO POR DOS SECCIONES**



**FIG. 11 LA ZONA SOMBRADA EQUIVALE AL AUMENTO ENERGÉTICO DEBIDO AL SOBREALENTADOR**

Los sobrecalentadores pueden estar formados por varias secciones (Figura 10) conectadas en serie de tal forma que la salida de una sección va a la entrada de otra posterior, es decir que la temperatura se va elevando por pasos; a la primera sección se le llama sobrecalentador primario, a la segunda secundario y así sucesivamente.

El recalentador de vapor tiene las características y el comportamiento semejante al sobrecalentador, solo que trabaja a una presión menor. El vapor que ya trabajó en la turbina, sale con menor presión y temperatura y es enviado al recalentador para seguir aprovechándose y trabajar en las etapas restantes de la turbina o bien, en otra.

En los generadores de vapor de alta capacidad, a veces es conveniente instalar un aparato llamado Economizador (Figura 12), cuyo objeto es un mejor aprovechamiento del calor de los gases de combustión, calentándose en él, el agua de alimentación a la caldera.

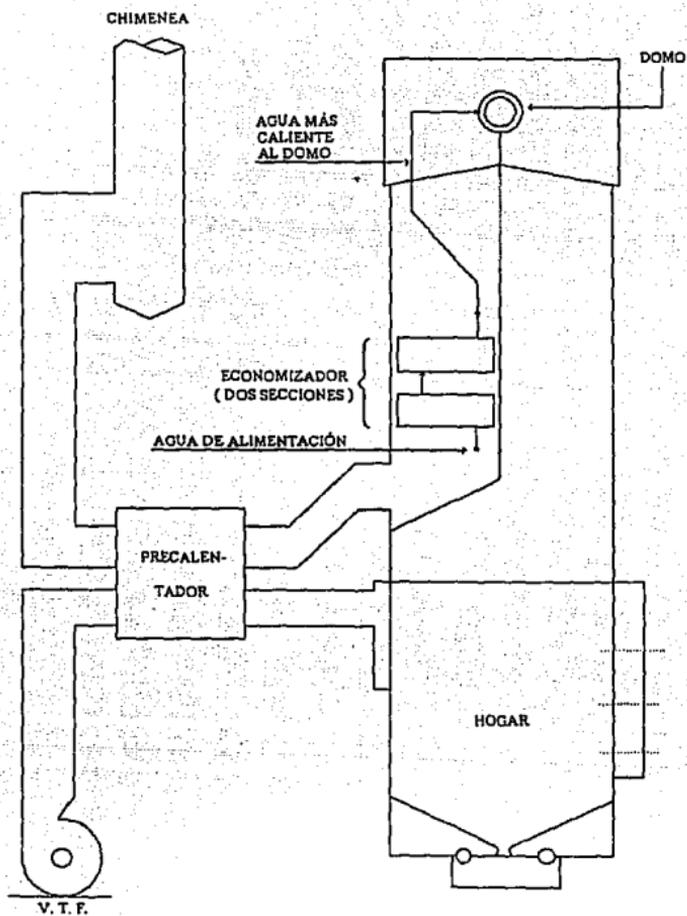
Consta de un número determinado de tubos, por el interior de los cuales pasa el agua y por el exterior los gases de combustión que previamente han pasado por el horno, por el sobrecalentador de vapor y por el recalentador.

La superficie de calefacción del economizador determina la elevación de temperatura del agua de alimentación y casi siempre se calcula de tal manera que el agua entre a la caldera cerca del punto de saturación correspondiente a la presión de ésta última.

En términos generales, por cada 6 grados centígrados de aumento de temperatura del agua de alimentación en el economizador, el rendimiento del generador aumenta 1%.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Descripción de los generadores de vapor, ESIME, Ing. Mario Galeazzi



**FIG. 12 DISPOSICIÓN DEL ECONOMIZADOR**

Por la forma de los tubos que lo constituyen, los economizadores pueden ser: lisos o aleteados. Los segundos, pueden ser de aletas radiales rectas, de anillos o espirales, de anillos ranurados, de pernos radiales soldados; todos estos tipos tienen la finalidad de aumentar el área de transferencia de calor.

Las principales ventajas que presenta un economizador son:

- Aprovechan el calor de los gases de combustión
- Se requerirá menor cantidad de calor para lograr la evaporación del agua en la caldera y por lo tanto, se consumirá menos combustible.

Si se desea evitar la corrosión exterior de los tubos, la temperatura del agua que entre a cualquier economizador no debe ser menor a 74 grados centígrados <sup>3</sup>, pues de otra manera los vapores ácidos que llevan los gases de combustión, pueden condensarse sobre dichas superficies.

Los Pre calentadores de Aire como su nombre lo indica, son dispositivos que tienen por objeto elevar la temperatura del aire que servirá para la combustión, utilizando para ello el calor que todavía llevan los gases y que han pasado previamente por la caldera, el sobrecalentador de vapor, el recalentador y el economizador.

El precalentador de aire hace que aumente el rendimiento del generador, disminuyendo el consumo de combustible necesario para producir cierta cantidad de vapor. El aumento en el rendimiento no sólo se debe a la recuperación de parte del calor que se llevan los gases a la atmósfera, sino también porque ayudan estos dispositivos a mejorar la combustión, reduciéndose las pérdidas de calor en los ceniceros. Según el tipo de

---

<sup>3</sup>Descripción de los generadores de vapor, ESIME, Ing. Mario Galcazzi

combustible y la caldera, por cada 15 ó 25 °C que se eleve la temperatura del aire para la combustión, se obtiene un aumento de 1% en la eficiencia total de la caldera <sup>4</sup>.

El precalentador de aire minimiza la variación de la eficiencia de la caldera con la carga; su superficie es de 80 a 150% de la caldera cuando se tiene economizador y de 300% si no se cuenta con economizador. Una reducción en la temperatura de los gases a la salida de 38°C significa un aumento en la eficiencia de 2.3 a 2.6%; en general, el ahorro total atribuido al precalentador de aire puede estar comprendido entre 5 y 10 %, incluyendo la mejoría en la combustión <sup>4</sup>.

La principal ventaja del precalentador de aire sobre el economizador es que el primero no trabaja a presión, y para la misma recuperación de calor resulta menos costosa su instalación; sin embargo ésto de ninguna manera quiere decir que hay que dar la preferencia al precalentador de aire sobre el economizador, pues en cada caso particular es conveniente hacer un estudio económico de la cuestión y decidir sobre el empleo de uno o de otro, o bien ambos.

Existen dos tipos de precalentadores de aire para la industria, según su medio calefactor:

- Precalentadores aire-vapor.
- Precalentadores aire-gases.

En el precalentador aire-vapor, el medio calefactor es vapor obtenido de otro punto en el proceso, pero sin mezclarse el aire con el vapor. En el precalentador aire-gases, el medio calefactor son los gases calientes que salen del economizador antes de tirarlos a la atmósfera, estando éstos más fríos; tampoco se mezclan los gases y el aire que se calienta.

---

<sup>4</sup>Criterios de Diseño de Plantas Termoelectricas, Martiniano Aguilar R.

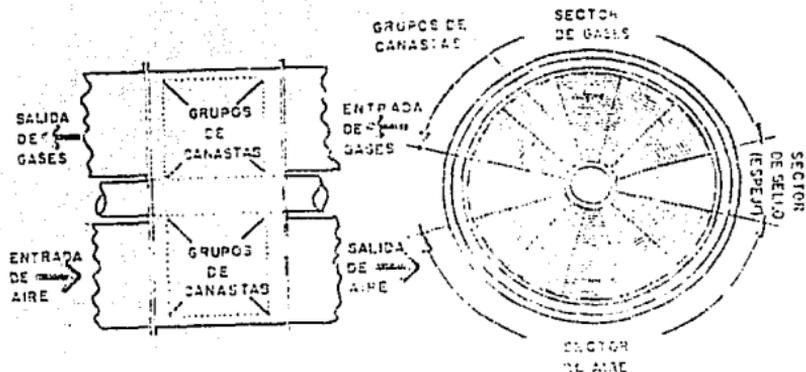
Algunas ocasiones se combinan estos dos tipos de precalentadores, con la finalidad de proteger las partes metálicas del precalentador aire-gases, pues generalmente los combustibles que se usan en los generadores de vapor contienen algo de azufre, por lo tanto, los gases resultantes de su combustión contienen óxidos de azufre y cuando la temperatura de los gases baja hasta llegar al punto de rocío, se produce ácido sulfúrico (por el óxido de azufre y la humedad) que ataca al precalentador aire-gases; para evitar esa corrosión, se hace pasar el aire frío primeramente por un precalentador aire-vapor para que el aire que entre al precalentador aire-gases no este tan frío y los gases al transferir calor, no se enfríen al grado que lleguen al punto de rocío.

Según su forma de operación los precalentadores pueden clasificarse en:

- Recuperativos.
- Regenerativos (Ver figura 13).

Los precalentadores recuperativos transfieren directamente el calor (ya sea de los gases o del vapor) y generalmente son de tipo tubular aunque también existen tipo placas; en el interior de los tubos circula vapor o gases calientes y en el exterior circula el aire.

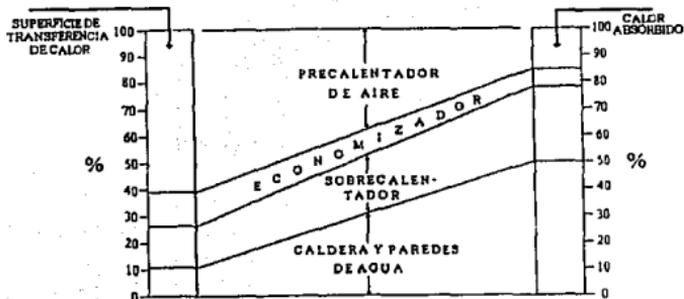
Los precalentadores regenerativos transfieren el calor indirectamente (únicamente de los gases) al aire a través de un elemento intermedio almacenador de calor; en general están formados por un tambor colector que contiene paquetes de laminillas (llamadas canastas) en donde se almacena el calor. La corriente de los gases pasa por las canastas calentándolas y por medio de un movimiento giratorio del tambor a bajas revoluciones, las canastas calientes llegan a una corriente de aire frío cediéndole el calor almacenado. Contienen un sistema de sellos rotatorios para que el aire y los gases no se mezclen.



**FIG. 13 PRECALENTADOR REGENERATIVO**

En la siguiente gráfica (Figura 14) no debe considerarse como común a todos los generadores de vapor, sino más bien una representación general en donde se establece una comparación entre las diferentes superficies de los dispositivos de un generador de vapor y el calor absorbido en cada una de ellas.

Las superficies de la caldera y paredes de agua asimilan la mayor cantidad del calor de los gases de combustión, debido a que se tienen conductividades térmicas más elevadas y las diferencias de temperatura son mucho mayores que en el resto de los dispositivos. El sobrecalentador de vapor, por la disposición que tiene dentro del generador, también absorbe grandes cantidades de calor. La razón de absorción de calor va disminuyendo gradualmente hasta que los gases alcanzan la superficie del precalentador de aire, en donde se necesita una gran superficie para tener asimilaciones relativamente pequeñas de calor.



**FIG. 14 ABSORCIÓN DE CALOR EN LOS DIFERENTES DISPOSITIVOS DE UN GENERADOR DE VAPOR**

La Chimenea es un dispositivo cuya función principal es provocar un "tiro térmico" que permita la entrada al hogar del aire necesario para la combustión y llevar hasta la atmósfera a todos los gases producto de la misma. Además, para distribuir en una zona relativamente grande los gases de combustión, hollín y demás impurezas que arrastran dichos gases.

Las dimensiones de una chimenea dependen del tiro térmico que se necesite provocar, del volumen de gases de combustión que se vaya a desalojar y de las regulaciones existentes para la construcción e instalación de estos dispositivos.

Las chimeneas pueden ser cilíndricas o cónicas, dependiendo de los materiales que se empleen en su construcción (lámina de acero, concreto armado, etc.)

En muchas ocasiones, la función de la chimenea queda sustituida por un ventilador, con lo cual únicamente se hace necesario un tramo de corta altura para distribuir en la atmósfera los productos de la combustión.

Los Quemadores son dispositivos que tienen por objeto lograr una combustión adecuada y económica de los combustibles líquidos y gaseosos, dispersándolos en forma tal que entren en íntimo contacto con el aire.

Las principales funciones de los quemadores son:

- Preparación del combustible para la mezcla con el aire.
- Dirigir y dar velocidad necesaria al combustible y al aire para su mezcla.
- Regulación del flujo de aire y combustible para asegurar una cierta carga térmica con una relación aire-combustible.
- Crear las condiciones de estabilidad de la flama dentro del dominio de su funcionamiento.
- Efectuar la turbulencia inicial necesaria para obtener una cierta velocidad de combustión.
- Dirigir el combustible y el aire en tal forma que se realice cierta distribución de la flama en la zona de temperatura del hogar.

Los quemadores que utilizan combustibles líquidos, se clasifican según el método para lograr la atomización, en la forma siguiente:

- a) Quemadores de atomización con aire.
- b) Quemadores de atomización con vapor.
- c) Quemadores de atomización mecánica.

Las características esenciales de quemadores para aceite, pueden resumirse como sigue:

1. Atomización con alto grado de combustible, sin que se obstruya o tape algún conducto.
2. Mantenimiento de la atomización con variaciones relativamente grandes de la capacidad.
3. Forma correcta de la garganta de descarga, de tal manera que se tenga una buena mezcla del aceite atomizado y del aire en todos los puntos, asegurándose así una combustión completa con un mínimo de exceso de aire.
4. Accesibilidad para efectuar reparaciones, disminuyéndose así el tiempo fuera de servicio y los costos de mantenimiento.

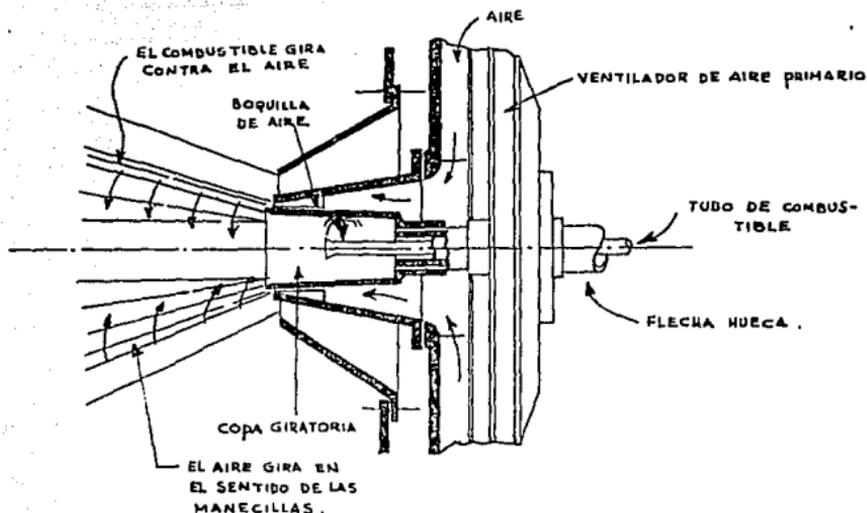


FIG. 15 QUEMADOR DE ATOMIZACIÓN MECÁNICA

Los quemadores de gas pueden ser utilizados para quemar solamente este tipo de combustible o bien pueden ser "combinados" de tal manera que pueda quemarse, según se desee, petróleo crudo o gas, o aceite ligero con alternativa para gas. Cada quemador deberá tener su propio piloto.

En los generadores de vapor que utilizan combustible sólido, sin pulverizar, se hace necesaria la colocación de dispositivos llamados Emparrillados, cuyo objeto es retener el combustible en forma tal que su combustión sea completa y adecuada.

En forma general se les puede clasificar de la siguiente manera:

- a) Sencillos.
- b) Semi-automáticos.
- c) Automáticos:
  - De alimentación superior.
  - De alimentación inferior.
  - De banda.
  - De una, dos o varias retortas.

Los Emparrillados Sencillos se alimentan manualmente y constan de una serie de barras de hierro fundido, dispuestas convenientemente una al lado de otra, según el tamaño de los trozos de carbón o de la clase de leña que se use. Por la parte inferior se deja una cámara que forma el llamado "cenicero" y que además sirve para dar paso al "aire primario" de combustión, mismo que recibe este nombre por ser el que inicia la oxidación de los elementos combustibles.

Por la parte superior entra el aire "secundario", que se encarga de completar la

combustión. Estos emparrillados se utilizan en generadores de vapor de baja capacidad y su rendimiento es comparativamente pobre.

Con el objeto de reducir la mano de obra, para concentrar la atención de los fogoneros a otros servicios importantes y para aumentar el rendimiento de los emparrillados en generadores de vapor de mediana capacidad, se usan a veces los emparrillados semi-automáticos que, al igual que los sencillos, se alimentan a mano, aunque también se les encuentra con alimentación mecánica. Las parrillas están diseñadas de tal manera que permiten su giración utilizando vapor, aire a presión o dispositivos hidráulicos.

En los emparrillados automáticos de alimentación superior, un mecanismo alimentador de carbón manda a ésta por una tolva para que lo descargue sobre el emparrillado que tiene un movimiento ondulatorio, estando dispuesto con una o con doble pendiente para que el carbón vaya resbalando hacia la parte inferior, a medida que se va quemando. La alimentación de carbón no interfiere con la operación de carga y descarga, de tal manera que siempre se tiene una operación continuada. La cantidad de carbón alimentado por hora o por minuto, puede controlarse automáticamente de acuerdo con la demanda de vapor. En estas condiciones se tiene un sistema automático.

En los emparrillados de alimentación inferior, el carbón cae por gravedad en la tolva donde pasa a una "caja" en donde recibe el impulso de un émbolo que tiene movimiento alternativo debido a la acción de una manivela. El émbolo empuja al carbón dentro de una retorta en donde se distribuye uniformemente. El carbón se va moviendo lateralmente, hacia ambos lados, a medida que se va quemando, para finalmente caer al cenicero.

Un ventilador es una máquina que mueve cantidades de aire o gases de un lugar a otro. Está constituido por un rotor con aspas y una carcasa que lo envuelve y a la vez dirige el

aire o gases descargados por el impulsor. Pueden ser:

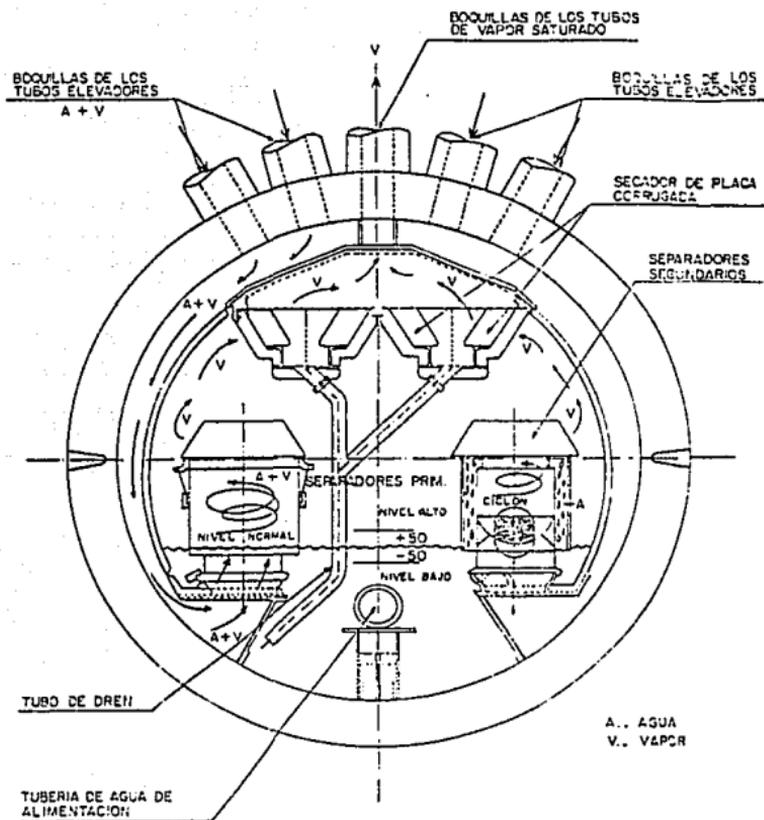
- Radiales o centrífugos.
- Axiales.

El ventilador centrífugo es muy semejante a una bomba centrífuga, moviendo el aire radialmente hacia el exterior de las aspas y descarga en una carcasa que rodea al impulsor en forma de caracol. En el ventilador axial, el aire o gases se mueven en forma paralela al eje de giro del ventilador.

En el domo es donde se realiza la separación del agua y del vapor que se produce; como el vapor tiende a arrastrar humedad al desprenderse de la superficie del agua, y ésto es perjudicial para otros elementos del generador de vapor y la turbina, entonces se utilizan dispositivos separadores que efectúan la separación en forma mecánica; existen dos tipos de separadores: primarios y secundarios.

Los separadores primarios inducen un movimiento rotativo ciclónico al vapor. La fuerza centrífuga sobre las gotas de agua arrastrada (más pesada) hace que éstas se proyecten a la periferia de un cilindro y escurran hacia abajo por gravedad, hasta juntarse con el agua contenida en el domo. Los separadores secundarios están formados por paquetes de lámina acanalada. El vapor pasa por una ruta tortuosa en los espacios entre dos láminas. Los cambios de dirección hacen que el agua se proyecte hacia las láminas y escurra por los bordes.

El domo también cuenta con secadores formados por lámina acanalada, corrugada o mallas que efectúan una acción final de separación o secado, de tal forma que en las salidas de vapor saturado se obtiene vapor sin arrastre de agua.



**FIG. 16 SEPARADORES DE AGUA-VAPOR EN EL DOMO**

Ya que se han descrito los principales componentes de calderas, se debe explicar su método de operación.

## 1.4 MÉTODO DE OPERACIÓN

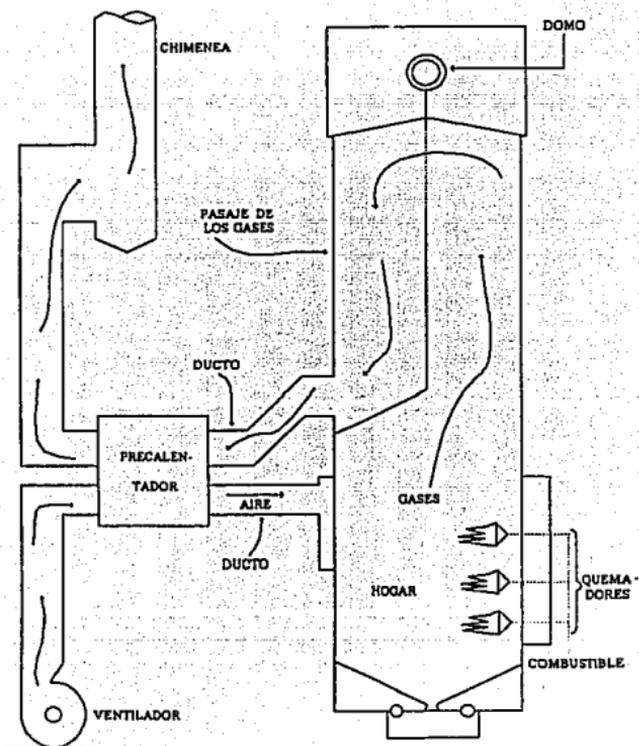
Las partes esenciales de una caldera pueden individualizarse analizando el funcionamiento de la propia caldera según dos circuitos distintos que se reconocen claramente, sea cualfuere el tipo de caldera: Circuito Aire-Gases y Circuito Agua-Vapor.

El circuito aire-gases se compone principalmente por: ventiladores, ductos, precalentadores de aire, compuertas, pasaje de los gases ( sobrecalentadores, recalentador, economizador y precalentador) y chimenea. Dependiendo de las características de la caldera, pueden tenerse ventilador de tiro forzado (a la entrada de aire a la caldera) y ventilador de tiro inducido (salida de gases en chimenea), o bien, solamente uno de los dos; también se puede tener precalentadores aire-vapor y aire-gases combinados ó tan sólo uno de los dos.

El aire se aspira del exterior por medio del ventilador de tiro forzado y pasa al precalentador de aire por el lado de aire para mezclarse posteriormente en el hogar con el combustible; después de la combustión, los gases pasan por las superficies de intercambio de calor (sobrecalentadores, recalentador, economizador y precalentador por el lado de los gases), cediendo gran parte del calor que contienen y finalmente salen por la chimenea a la atmósfera.

El circuito agua-vapor está compuesto principalmente por: bomba de agua de alimentación, economizador, domo, tubos de bajada, domo inferior o cabezales

distribuidores, paredes de agua (tubos generadores), sobrecalentadores y recalentador. Dependiendo de las características de la caldera, puede tener bomba de agua de alimentación (circulación controlada) o no tenerla (circulación natural).



**FIG. 17 CIRCUITO AIRE-GASES**

El agua impulsada por las bombas de alimentación de la caldera, atraviesa el economizador donde se precalienta a expensas de los gases de salida, alcanzando la temperatura de evaporación; en seguida el agua entra en el domo y pasa por los tubos bajantes y se distribuye a los tubos generadores en donde tiene lugar la evaporación; la mezcla de agua y vapor entra nuevamente al domo en donde se produce la separación del vapor y el agua; el vapor producido sale del domo y por medio de las superficies del sobrecalentador, se transforma de saturado en sobrecalentado y, por lo tanto, se envía al consumo o turbina de alta presión. Al vapor que sale de la turbina se le llama vapor recalentado frío y regresa a la caldera entrando al recalentador; el vapor que sale del recalentador tiene una presión menor y se llama vapor recalentado caliente y se envía a otra fase de la turbina.

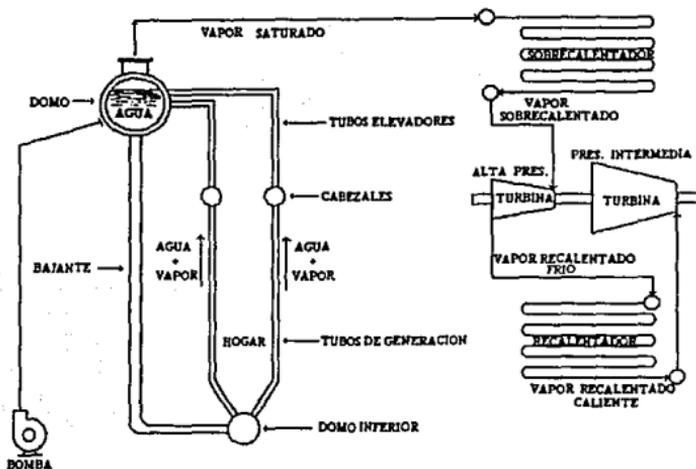


FIG. 18 CIRCUITO AGUA-VAPOR

Este método de operación aunque parece sencillo, en ocasiones no es tan fácil de llevar, pues se pueden obtener operaciones muy riesgosas. Para hacer que opere adecuadamente, se requiere una operación controlada y la forma de llevar un control, es por medio del control automático, que obedece a un circuito teórico que se presenta en seguida.

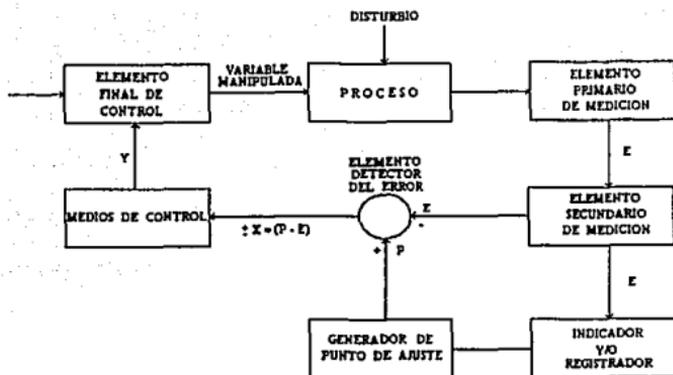
## 1.5 CIRCUITO DE CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático es de gran importancia para los procesos continuos. El funcionamiento de muchos procesos continuos modernos sería imposible sin una aportación adecuada de instrumentos. Los procesos industriales exigen que cada uno de sus pasos se lleve a cabo en condiciones rigurosamente controladas en todo momento, por lo tanto, la aportación de instrumentos a las industrias de proceso no debe considerarse como una cosa conveniente, sino como una necesidad absoluta.

Los sistemas de control de circuito cerrado, son aquellos donde la acción del control está relacionada con la salida, a este tipo de control también se le llama de retroalimentación, y se define como la propiedad de un sistema de trayectoria cerrada la cual permite que la salida sea comparada con la entrada del sistema, de modo que, la acción apropiada del control se puede realizar como una función de la entrada y la salida.

Este sistema es el más utilizado dentro de la industria de proceso continuo, y así se tiene que un controlador automático es un instrumento que mide el valor de una variable, la compara con un valor de referencia y actúa de manera de hacer que la variable se mantenga en el valor deseado, punto de ajuste o señal de referencia (Ver figura 19).

El elemento primario de medición es aquel que detecta el valor de la variable, es decir, mide la salida del sistema para producir un efecto de corrección por medio de una señal.



E = Variable Controlada  
 P = Punto de ajuste  
 X = Desviación o error  
 Y = Señal Controlada

**FIG. 19 CIRCUITO DE CONTROL AUTOMÁTICO**

Los elementos primarios de medición más comunes son:

Para temperatura: termómetros bimetalicos, de vástago de vidrio, elementos para sistemas termales, llenos de: liquido (clase I), vapor (clase II), gas (clase III), mercurio (clase V), de resistencia eléctrica, de termopar, pirómetros de radiación, ópticos e infrarrojos, indicadores de color, indicadores pirométricos, termistores y termómetros de cristal de cuarzo, etc.

Para presión: tubo bourdon, espiral, helicoidal, fuelles, diafragmas, manómetros, sensores de vacío tipo ionización, detectores térmicos de vacío, detectores mecánicos de vacío, sensores electrónicos de presión, etc.

Para flujo: placa de orificio, tubo venturi, tubo pitot, tobera, rotámetros y medidores de desplazamiento positivo, de turbina, magnéticos, de vórtice, bombas dosificadoras, etc.

Para nivel: flotadores, desplazadores y medidores de presión diferencial, de burbujeo, de capacitancia, de radiación, ultrasónicos, etc.

El elemento secundario de medición y transmisión se encarga de amplificar la señal proveniente del elemento primario de medición, o bien en transformar esa función en una señal útil, fácilmente medible, como una señal eléctrica o una presión neumática, que dependiendo de los fabricantes de instrumentos, comunmente, son señales de 4 a 20 ó 10 a 50 ma (miliamperes) en los electrónicos, y de 3 a 15 ó 6 a 30 lb/pulg<sup>2</sup> en el caso de los neumáticos.

La señal detectada y transmitida por los medios de medición (elementos primario y secundario) es una función de la variable controlada, o sea de la cantidad o condición que es medida y/o controlada y se representa con la letra E. La señal de la variable controlada ya sea eléctrica, neumática, hidráulica, electrónica, etc., es transmitida simultáneamente a un dispositivo de indicación y/o registro y a un controlador. La señal que va al elemento de indicación y/o registro es transformada a unidades de la variable controlada, o bien a porcentajes de escala o puntos (decimales), que multiplicados por un factor, dan el valor en unidades de la variable medida.

La señal de la variable, que va al controlador (constituido éste por dos partes: elemento detector del error y medios de control), llega al elemento detector del error donde se compara con una referencia seleccionada llamada punto de ajuste o set - point, representado por la letra P, encontrándose una diferencia o error ( $X=P-E$ ). Esta señal es enviada a los medios de control, donde se realizan las funciones de control, o sea, cuenta

con los medios necesarios para corregir la desviación, mandando una señal correctiva y a un elemento final de control, que por lo general es una válvula operada automáticamente; también podría ser un amortiguador, un excitador variable de velocidad, un reóstato variable, un autotransformador, una resistencia variable o cualquier dispositivo similar capaz de cambiar la variable manipulada de un proceso.

Si se trata de una válvula automática de diafragma, ésta, dirigida por la señal controlada, acciona directamente sobre el flujo que pasa a través de ella, siendo éste, una de las variables del proceso, conocida como variable manipulada.

El elemento final de control sirve por lo tanto, para convertir variaciones en la señal de salida del controlador, en variaciones correspondientes en la variable manipulada, cuyos cambios afectan el valor de la variable controlada.

Las acciones de una válvula automática, de un control o de un sistema de control, deben estar perfectamente establecidas para los fines que se persiguen, pudiendo tener cada una de ellas dos acciones: acción directa y acción inversa. Las acciones de la válvula automática, del control y del sistema de control, se definen como se indica a continuación:

A) Acción de una válvula automática:

- Directa.- Cuando la válvula cierra con aire (abre a falla de aire).
- Inversa.- Cuando la válvula abre con aire (cierra a falla de aire).

La acción de una válvula, se determina según lo que se desea que haga cuando falle el aire controlado.

## B) Acción de un control:

Tomando el set-point como referencia (fijo), se tiene:

- Directa.- (Aumento con aumento). Cuando al aumentar la variable, aumenta el valor de la señal de salida del controlador, y al disminuir la variable, disminuye el valor de dicha señal de salida.

- Inversa.- (Aumento con disminución). Cuando al aumentar la variable, disminuye el valor de la señal de salida del controlador y al disminuir la variable, aumenta el valor de dicha señal de salida.

Habiendo escogido la acción de la válvula, la acción de control sólo depende de la acción que debe tener el sistema de control según el proceso.

## C) Acción de un sistema de control:

- Directa.- Cuando al aumentar la variable, la válvula debe cerrar.

- Inversa.- Cuando al aumentar la variable, la válvula debe abrir.

Habiendo descrito ya la clasificación y principales componentes de calderas, y expuesto los principios básicos de termodinámica y de control automático, se expondrán las características de la generación de vapor en la industria cervecera en que se enfoca la atención para la realización de este trabajo.

## CAPÍTULO II

### **CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR**

#### **2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA INDUSTRIA**

La industria a la cual se enfoca la atención en esta tesis es una industria cervecera. Para la fabricación de cerveza se requiere de cantidades de vapor necesarias para operar los turbogeneradores y para calentamiento del proceso, por ejemplo, en el proceso de maceración se requiere de vapor con un control muy preciso de la temperatura, al igual que en el proceso de cocimientos, en el proceso de ebullición de cerveza con lúpulo, etc.

El tipo de industria al que se va a enfocar la atención es una industria autosuficiente y de proceso continuo; autosuficiente quiere decir que la industria tiene que abastecerse de electricidad por sí misma por medio de un turbogenerador eléctrico que es alimentado o movido por un flujo de vapor sobrecalentado, para lo cual se requiere de un generador de vapor de gran capacidad.

Se tiene una instalación de este tipo cuando no se quiere depender al 100% de Compañía de Luz y Fuerza, puesto que cualquier falla en el suministro de energía eléctrica provocaría un paro que puede ser general en el proceso de fabricación, lo que representa horas muertas de trabajo y se transforma en una gran pérdida de dinero. Para mantenerse ajeno a este problema, se puede tomar la opción de generar su propia energía eléctrica aprovechando el poder calorífico de algún combustible para

producir vapor que accione un turbogenerador eléctrico para tal fin, además de utilizar el vapor remanente en los procesos de fabricación.

Es importante mencionar que únicamente se pondrá en marcha este tipo de sistema cuando la carga sea máxima para Compañía de Luz y Fuerza, es decir, en las horas pico de mayor demanda de energía eléctrica, o bien, cuando se presente alguna falla en el suministro de energía, o cuando resulte más económico generar electricidad sin abastecerse por fuera de la planta.

Al hablar de proceso continuo se refiere a que se lleve a cabo una producción totalmente continua de vapor, ya sea porque la demanda de producción de la planta es elevada o por los altos costos que resultan por paros en el proceso de fabricación; esto obliga a tener una constante producción de vapor para generar energía eléctrica y para cualquier otro proceso de fabricación que requiera de una cantidad de vapor. De aquí que se debe enfocar la atención en gran parte a los generadores de vapor de la industria.

Tomando en cuenta que los generadores de vapor juegan un rol de mucha importancia en la mayoría de las industrias, como en una industria autosuficiente y de proceso continuo, se debe procurar obtener un menor costo en la operación de los generadores obteniendo altos rendimientos, tanto por el lado energético que se ha convertido en un problema en nuestros días, como por alargamiento de la vida útil de las máquinas térmicas (turbina y generador) y por muchos otros factores de por sí importantes tales como disminución en los índices de contaminación, obtención de un mayor margen de seguridad para los operarios, mayor eficiencia en el proceso, etc.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

El sistema cuenta con tres calderas, cada una de 65 Ton/hr de vapor, obteniendo una presión de alta de 42.27 Kg/cm<sup>2</sup> absolutos. Las características del vapor de alta son las siguientes: temperatura 399 grados centígrados, entalpía 766.7 Kcal/Kg. Las características del vapor de baja son: presión de 5 Kg/cm<sup>2</sup> abs., temperatura de 160 grados centígrados, entalpía 664.2 Kcal/Kg.

En la planta se tienen dos turbogeneradores de 12,500 KVA, 10,000 KW y 6,900 V, los que trabajan lógicamente a condiciones de vapor de alta presión que tienen sus respectivos condensadores (Ver figura 20 A); el condensado se concentra en un tanque de condensados; en este mismo tanque de condensados se reciben los condensados del área de cocimientos, de embotellado y de la etapa precalentadora de combustóleo. Ese condensado es bombeado junto con el agua de la cisterna de agua desmineralizada a un deaerador con una capacidad de 500,000 Lb/hr; ésta es el agua que se bombea a las calderas, aunque no toda el agua contenida en el deaerador es utilizada en la alimentación de calderas.

El proceso de precalentamiento de combustóleo (Ver figura 20 B), empieza en el tanque de recibo, al que en su salida, se le hace pasar una línea de vapor (sin tener contacto) para ser bombeado a tanques de almacenamiento y en cada uno de ellos se tiene una línea de vapor a la salida para ser enviado a tanques llamados tanques de día que también cada uno de ellos tiene su precalentamiento con el paso de una línea de vapor en su salida; posteriormente el combustóleo se pasa a los calentadores finales que trabajan por medio de vapor y así se obtiene el combustóleo caliente que será inyectado a las calderas.

El vapor se usa en el área de turbogeneradores, embotellado, cocimientos, unitanques, secadoras y en el desaerador por mencionar algunos usos.

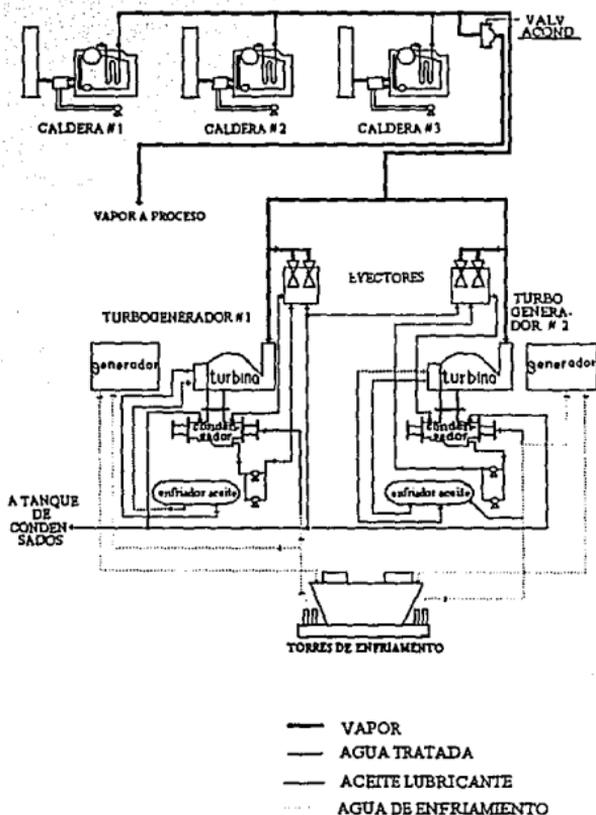


FIG. 20 A DESCRIPCION DE LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA CON VAPOR

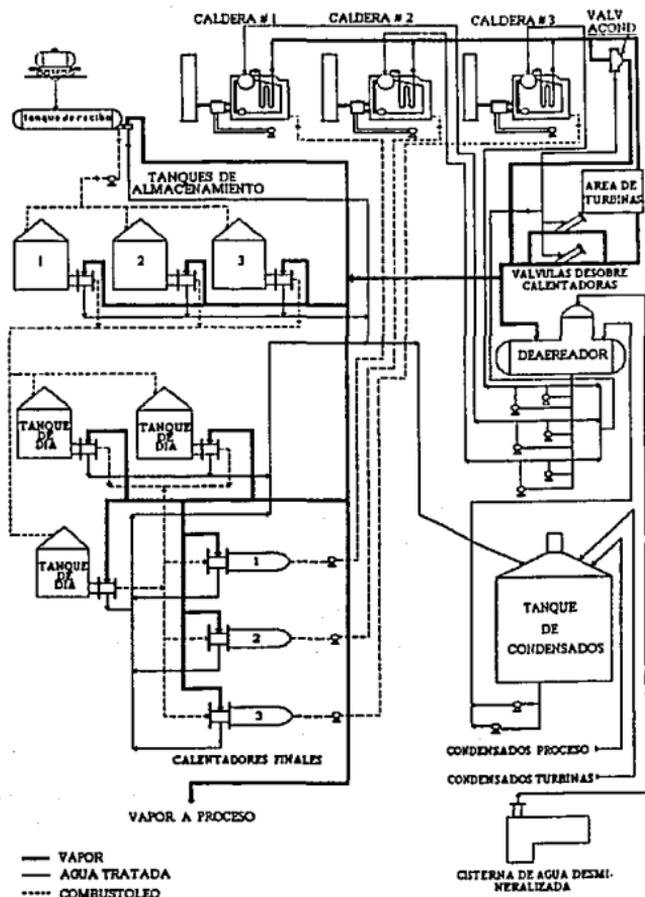


FIG. 20 B DESCRIPCION DEL PRECALENTAMIENTO DEL COMBUSTIBLE

Después de esta descripción, se explicará la forma en que operan los sistemas de control en dicha industria, para luego proponer nuevos sistemas (Cap. IV).

## 2.3 MÉTODO ACTUAL DE OPERACIÓN

El sistema de generación de vapor consta de la instrumentación necesaria para poder tener un control de aire-combustible, control de nivel, control de agua de alimentación, control de presión de salida de vapor, control de presión en el hogar de la caldera y control de temperatura.

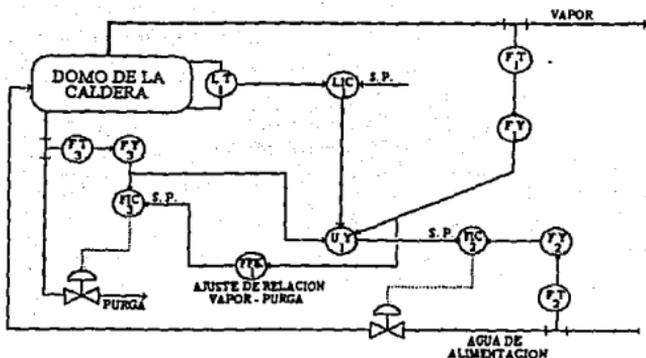
En esta parte se describe como funciona el control actual para poder hacer mejoras en el sistema de control que es parte fundamental en el ahorro de energía. El sistema actual de control, esta basado en dispositivos operados neumáticamente.

### CONTROL DE NIVEL.

Para el control de nivel se tiene un sistema que comunmente es llamado sistema de control de tres elementos (Ver figura 21); las variables que se toman en cuenta para controlar el nivel del domo, son el flujo de vapor, el flujo de agua de alimentación y el nivel del domo de la caldera. Este sistema de tres elementos se usa en las calderas grandes y también en las pequeñas que estan sujetas a variaciones grandes y rápidas de carga. El sistema de tres elementos se muestra en la figura 16 y este sistema mantiene la entrada de agua igual a la salida del vapor.

El sistema funciona de la siguiente forma: El transmisor de nivel LT-1 manda su señal al controlador de nivel LIC-1; a la señal de flujo de salida de vapor (proveniente de FT-1) se le extrae raíz cuadrada (en FY-1) y esta señal linearizada se suma con la señal que

manda el controlador de nivel LIC-1 en el sumador UY-1; la salida total del sumador se manda como punto de ajuste (set-point) al circuito de control de flujo FIC-2, (que consiste de un transmisor del flujo de agua FT-2, al que se le extrae su raíz cuadrada (en FY-2) y se manda como variable controlada al controlador de flujo) el que compara esta señal con la variable controlada y manda a posicionarse a la válvula de control de flujo de agua de alimentación.



**FIG. 21 CONTROL DE NIVEL Y AGUA DE ALIMENTACIÓN.**

Consta también de una forma automática para purga que consiste en tener una relación de flujo purgado con respecto a la cantidad de flujo de vapor producido por la caldera, con lo que se garantiza que la cantidad de sólidos este controlada. El transmisor de flujo de purga FT-3 manda una señal al extractor de raíz cuadrada FY-3 y posteriormente al controlador de flujo FIC-3 y al sumador UY-1 para reponer la cantidad de agua que se está drenando. El transmisor de flujo de vapor FT-1 manda su señal al extractor de raíz cuadrada FY-1 y posteriormente a la estación de relación FFK-1, en la que se multiplica la

señal por un valor menor que la unidad (porcentaje de flujo de vapor que se debe purgar) y posteriormente esta señal se manda como punto de ajuste al controlador de flujo de purga.

### CONTROL DE COMBUSTIÓN.

El sistema de control de la combustión es un sistema de aire y combustible a control de presión de cabezal de vapor (Ver figura 22); el sistema consiste en un transmisor de presión en el cabezal de vapor PT-1, que manda su señal a un controlador de presión PIC-1; en este controlador de presión se le ajusta el punto de ajuste (set-point) a la presión deseada del cabezal; la señal de salida del controlador de presión, se dirige a un selector manual-automático y de ahí se manda la señal a cada una de las estaciones bias de cada caldera, que manda las señales balanceadas a los controladores, que son el controlador de combustible CIC-1 y el de tiro forzado FIC-1; a cada uno de los controladores se le ajustará por medio de calibración la relación de aire y combustible según el exceso de aire que se debe tener. Así, cuando los controladores de combustible y de tiro forzado reciban la señal de corrección proveniente de PIC-1, dejarán pasar o no mayor cantidad de combustible y aire según su relación de calibración.

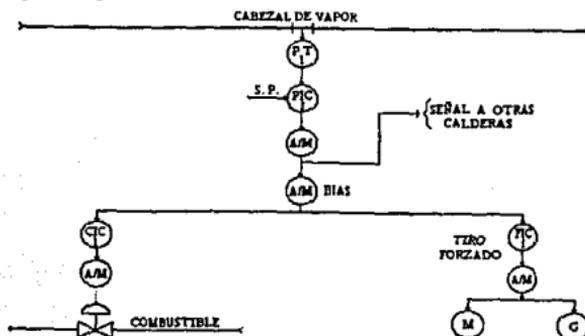


FIG. 22 CONTROL DE PRESIÓN, AIRE Y COMBUSTIÓN.

La señal de salida del controlador de combustible CIC-1, se manda a un selector manual-automático y de ahí la señal es mandada a la válvula de control para ajustar la alimentación de combustible. La señal de salida del controlador de tiro forzado FIC-1 también es mandada a un selector manual-automático que envía la señal tanto a un gobernador de tiro forzado como al accionador de las mamparas de tiro forzado.

## CONTROL DE PRESIÓN DEL HOGAR.

El control de la presión en el horno de la caldera, tiene un sistema llamado sistema de tiro balanceado (Ver figura 23); este sistema usa control para el soplador de tiro forzado y para el de tiro inducido. El control de tiro forzado se lleva a cabo con el control de combustión; el control de tiro inducido remueve los gases quemados calientes para mantener una presión del orden de 1" de agua de vacío y este control se conoce como control de presión de un elemento para tiro inducido.

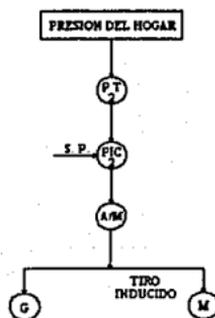


FIG. 23 CONTROL DE PRESIÓN DEL HOGAR

El transmisor de presión PT-2 localizado en el hogar de la caldera, detecta y transmite

la presión del hogar y la manda como señal de variable controlada al controlador de presión PIC-2, donde se compara contra su punto de ajuste (que se ajusta a la presión de vacío deseada) y la salida del controlador pasa por una estación manual-automático y opera el obturador de tiro inducido para remover los gases quemados del hogar y lograr la presión negativa deseada.

### CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR.

Para el control de temperatura del vapor a la salida de la caldera, se tiene un control llamado control de temperatura de vapor de un elemento (Ver figura 24); consta de un transmisor de temperatura TT-1 localizado a la salida del atemperador de vapor, que manda la señal de temperatura del vapor como variable controlada al controlador de temperatura TIC-1 y la salida de este controlador proporciona la acción correctiva a la válvula de atomización, la cual regula el agua a la tobera del desobrecalentador o atemperador, con lo que se controla la temperatura de vapor. El punto de ajuste (set-point) de este controlador se ajusta a la temperatura que se requiera en el vapor a la salida de la caldera.

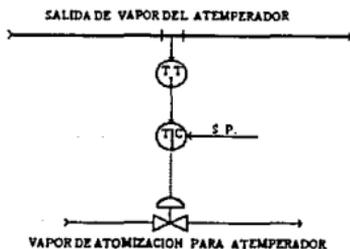


FIG. 24 CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR.

Estos sistemas de control ya son viejos y no están operando con la eficiencia que la planta requiere. Además de revisar los sistemas de control, es importante revisar algunos puntos que son importantes para el ahorro energético y para la eficiencia de la generación de vapor. Estos puntos se tratan en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO III

### PUNTOS IMPORTANTES PARA EL AHORRO DE ENERGÍA

#### 3.1 CONTROL DE MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE

Se debe tener en cuenta que una mezcla aire-combustible puede ser tan eficiente en los momentos de combustión al desprender calor aprovechable (en este caso para generación de vapor), según la relación de aire y combustible que estequiométricamente sea la indicada. Es decir, si no se da correctamente la cantidad de aire necesario para un tipo de combustible, la combustión no será eficiente, ya sea por tener exceso de aire o falta de aire.

Al decir aire se está hablando de oxígeno, y si se tiene en exceso en la mezcla, va a ahogar la combustión y además se va a tener un gran desperdicio de energía en la cantidad de gases calientes que salen de la chimenea y de lo contrario, no tendrá el oxígeno que requiere detectándose con presencia de humo en la chimenea, produciendo en los dos casos una combustión ineficiente desaprovechando las cualidades del poder calorífico del combustible y derrochando energía.

Además de no aprovechar el combustible a su máxima capacidad, los gases que resultan al quemarse, contienen altas cantidades de gases tóxicos que al ser emitidos a la atmósfera, se convierten en fuertes contaminantes del aire; todo esto debido a la mala combustión que se genera por no tener una relación adecuada de aire y combustible

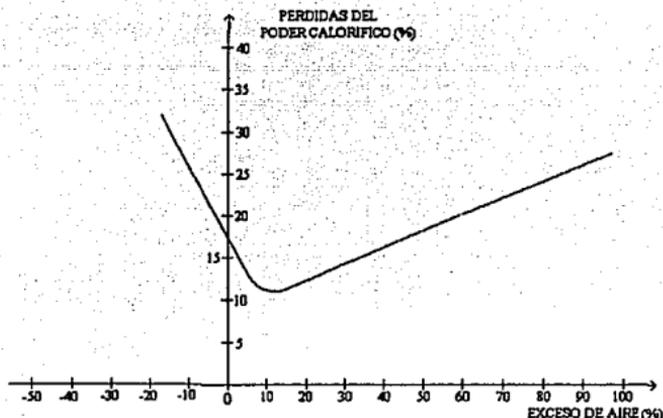
inyectados a la caldera o generador de vapor. Al suministrar un exceso de aire muy elevado se tendrá formación de óxidos de nitrógeno (NOx) y al no darle a la combustión el aire necesario, es decir, una combustión con poca cantidad de aire o mezcla pobre, se tendrá formación de monóxido de carbono (CO).

Debido a la contaminación, al costo elevado y a la carestía de combustible es muy importante que se mantenga en forma óptima la relación aire-combustible, para generar una combustión óptima. La cantidad de combustible quemado debe ser función de la demanda de vapor para poder mantener la presión de descarga a la presión requerida o deseada, es decir, que cuanto mayor demanda de vapor exista, mayor combustible se deberá inyectar a la caldera para mantener la presión estable en el cabezal de salida de vapor y viceversa.

Concluyendo, no es bueno el exceso ni la carencia de aire, no solamente por el mayor consumo de combustible, sino que en un momento esto puede afectar la producción de vapor producido por no obtener del combustible el calor necesario; al tener una variación en la producción de vapor en el caso de una industria autosuficiente en generación de energía eléctrica, se tendrán variaciones en la frecuencia del turbogenerador y variaciones en la frecuencia eléctrica, cosa que no es muy deseable para el funcionamiento de los aparatos que se alimentan. En la mayoría de los diseños de combustión, se recomienda usar un 20% de exceso de aire, para garantizar la combustión total del combustible, lo cual no es lo óptimo, según la siguiente curva que muestra la relación de la pérdida del poder calorífico del combustible y el porcentaje de exceso de aire, de la cual vemos que el óptimo se obtiene aproximadamente del 8 al 12% de exceso de aire. Es conveniente aclarar que para obtener un 0% de pérdida, se tendría que suministrar un 0% de exceso de aire en forma "ideal", pero debido a que la probabilidad de que todas las moléculas de combustible reaccionen con todas las de oxígeno no es muy alta, hay que suministrar el

exceso de aire.

Las mayores pérdidas de energía de un generador de vapor, las constituyen los gases de combustión que escapan por la chimenea. Esta corriente está compuesta por productos de la combustión  $\text{CO}_2$  y agua y en menor proporción  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ , el oxígeno alimentado en exceso y el nitrógeno y vapor de agua contenidos en el aire de combustión.



**FIG. 25 RELACIÓN PODER CALORÍFICO - EXCESO DE AIRE**

La pérdida de energía asociada con el exceso de aire es igual a la necesaria para elevar su temperatura, desde las condiciones ambiente hasta la de los gases de combustión a la salida de la chimenea. La pérdida es menor cuando el exceso de aire se mantiene al mínimo posible, éste es función de las características del combustible, del tipo de quemador y del sistema de regulación de la relación aire-combustible. El exceso de aire de

combustión puede reducirse hasta el nivel en que permita una combustión completa, estable y segura, mediante el empleo de analizadores y controladores; en términos generales, la instalación de estos dispositivos mejora la eficiencia entre un 2 y un 5%, dependiendo del exceso con que opere.

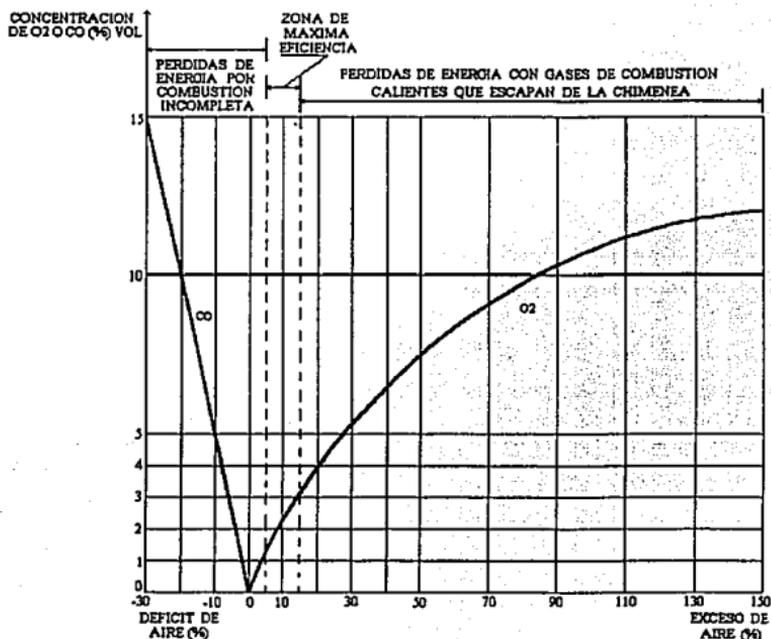


FIG. 26 GRÁFICA DEL CONTROL DEL EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN

Se puede decir entonces, que quemar eficientemente significa reducir al máximo posible en los gases:

Partículas, porque producen ensuciamiento, reducción de los coeficientes de transferencia de calor y contaminación.

Monóxido de carbono (CO), porque representa combustible no quemado y es contaminante.

Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), porque combinado con agua (condensaciones de los gases) produce corrosión en las zonas frías de la caldera.

Oxígeno (O<sub>2</sub>), porque produce SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (pentóxido de vanadio) que es corrosivo y oxidante en las partes de alta temperatura de la caldera, debido al bajo punto de fusión que tienen la partículas en suspensión.

Lo anterior se puede controlar directamente con el exceso de aire suministrado. Los valores usuales de exceso de aire son los siguientes:

- Combustible gaseoso	5 a 10%
- Combustible líquido	5 a 10%
- Combustible sólido (en suspensión)	20 a 40%
- Combustible sólido ( en parrillas)	40 a 80%

### 3.2 APROVECHAMIENTO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Las pérdidas de energía por la chimenea, como se ha hecho mención anteriormente, son las más importantes en los generadores de vapor y representan cuando menos un 9,3% de la energía suministrada por el combustible. Este valor se obtuvo asumiendo combustión completa y que la temperatura mínima de los gases de combustión, (antes de que se presente condensación de vapor de agua que contienen los combustibles) varía entre 160°C y 200°C dependiendo del tipo de combustible.

En una caldera con superficies de transferencia de calor en buen estado, se considera adecuada una temperatura para gases de combustión de 80°C mayor que la correspondiente a la del vapor saturado, a la presión de operación de la caldera y antes de trampas de calor (economizadores o precalentadores de aire). Por ejemplo, al generar vapor de 42 Kg/cm<sup>2</sup> de presión, su temperatura de saturación es 252°C, los gases de combustión saldrían de la caldera a una temperatura mínima de 332°C. Para aprovechar el calor sensible que contiene esta corriente, se hace uso de los precalentadores de aire y economizadores; con estas trampas de calor pueden alcanzarse las temperaturas mínimas indicadas.

Los diseños convencionales de precalentadores únicamente recuperan calor sensible de los gases de combustión y el calor latente contenido en el vapor de agua escapa por la chimenea junto con el calor sensible remanente. En éstos equipos, se evita la condensación del vapor de agua para prevenir la corrosión, la cuál es producto de la combinación de los óxidos de azufre con el condensado.

Se estima que por cada 55°C de decremento en la temperatura de los gases de combustión, se logra un incremento de 66°C en el aire de combustión y se mejora la eficiencia en un 2.5%.

Como resultado de investigaciones en el campo de la conservación de energía, en la actualidad se dispone en el mercado de precalentadores de aire contruidos con materiales resistentes a la corrosión; los precalentadores de aire "de canal abierto" son capaces de recuperar calor latente del vapor de agua y gran parte del calor sensible remanente. Entre sus ventajas podemos mencionar:

1. Recuperan más calor.
2. Con la adecuada selección de materiales y recubrimientos, se eliminan los problemas de corrosión.
3. Sin problemas de ensuciamiento.
4. Se integran fácilmente en instalaciones en operación.
5. Libres de mantenimiento cuando se emplean combustibles limpios; en caso de presentar ensuciamiento, son compatibles con métodos de limpieza convencionales, incluyendo sopladores de hollin o lavado con agua.
6. Requieren poco espacio para instalarse y mínima cimentación.

Los economizadores son equipos que se instalan antes de la chimenea para incrementar la temperatura del agua de alimentación a la caldera, aprovechando la de los gases de combustión. Generalmente están contruidos con tubos aleteados por los cuales circula el agua de alimentación. Su empleo se restringe por los efectos corrosivos que sufren del lado de los gases, por caídas de presión excesivas, cuando se presenta ensuciamiento y por factores económicos.

Comparados con los precalentadores de aire presentan las siguientes ventajas:

1. Menor inversión inicial.
2. No incrementan las emisiones de NOx.
3. Provocan menores caídas de presión en los gases de combustión.

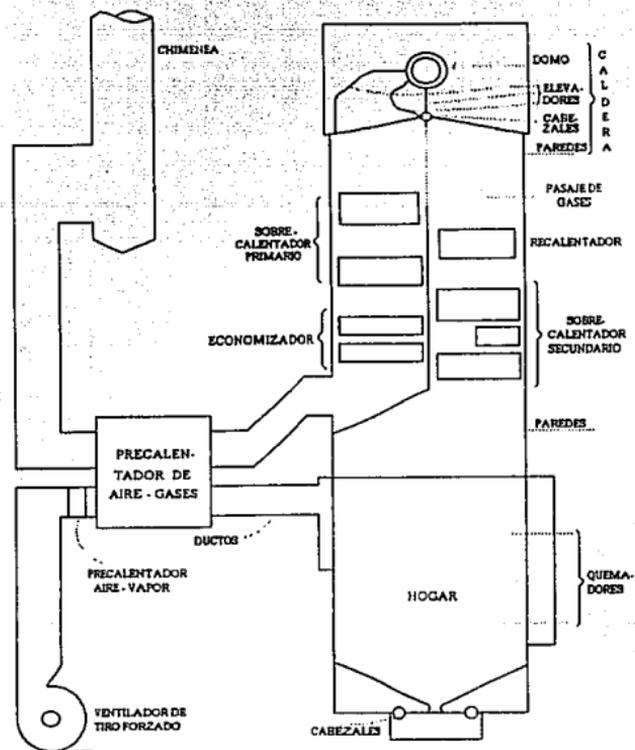


FIG. 27 PRECALENTADOR, ECONOMIZADOR Y SOBRECALENTADOR

Existen también otros aparatos destinados a aprovechar el calor sensible que aunque no están localizados cerca de la chimenea, también absorben calor de los gases de combustión, como son los sobrecalentadores de vapor, en los que la finalidad que se persigue es la de obtener vapor de mayor calidad, es decir, vapor sobrecalentado para no dañar los equipos que se alimentan, así como aumentar el rendimiento de la planta; o como los recalentadores de vapor que persiguen el mismo fin, sólo que se obtiene un vapor de mayor calidad, a presiones más bajas y un rendimiento mayor de la planta.

En muchas ocasiones la temperatura de los gases de combustión es muy elevada en el momento que salen de la chimenea, lo que nos indica que no se está transfiriendo el calor que contienen. Algunas causas de la mala transferencia de calor, y por tanto, la elevación de la temperatura de los gases, pueden ser las siguientes:

- Se produce un volumen muy alto de gases, obligándolos a que circulen a muy alta velocidad por el sistema, reduciendo el tiempo de contacto y sus posibilidades de transferencia de calor a los tubos.
- Las superficies de transferencia de calor se encuentran sucias por el lado de gases (hollín) o del agua (incrustaciones), dificultando la transferencia de calor.
- Las reacciones de combustión no se completan en el hogar, produciéndose post-combustión en zonas cercanas a la chimenea.
- Existen fugas de calor sensible de los gases que pasan directamente a la chimenea por alguna colocación defectuosa, o fallas del refractario (descolocación, agrietamiento) durante la operación.

Algunas acciones correctivas para la mala transferencia de calor es sensar con un termómetro constantemente la temperatura de los gases a la salida de la chimenea, notando con su incremento una falla en la transferencia de calor, revisar el nivel de ensuciamiento tanto interno como externo de los tubos, regular el exceso de aire y estabilizar la llama, realizar la limpieza en forma mecánica de las superficies de calefacción por el lado de los gases y cuidar que la dureza del agua de alimentación sea cero para evitar incrustaciones por el lado del agua.

Se debe cuidar el límite inferior de temperatura de los gases de combustión, que se define principalmente por el punto de rocío que produce corrosión y depende del contenido de azufre del combustible.

### 3.3 TIPO DE COMBUSTIBLE

El tipo de combustible que utilice un generador de vapor influye en la eficiencia de operación. De acuerdo con análisis efectuados, existen diferencias hasta de 3.7%, al cambiar de gas natural a carbón. Esto se debe a que los combustibles cuya relación entre átomos de hidrógeno y átomos de carbono es baja, forman menor cantidad relativa de agua de combustión y conllevan menores pérdidas de energía por humedad de los gases de combustión, sin embargo, para quemarse por completo requieren de mayores excesos de aire, de tal manera que las pérdidas de energía por la chimenea son del orden siguiente: 13% para el gas natural, 11.5% para el aceite combustible No.2, 12.8% para el No.6 y 9.3% para el carbón.

Otros factores importantes en la elección del combustible, son los diferentes poderes caloríficos que tiene cada combustible, el estado físico y las impurezas que contiene. Es fácil suponer, que entre mayor sea el poder calorífico del combustible, se obtendrá mayor cantidad de calor aprovechable y viceversa; debido a la diferencia en la interacción molecular entre un combustible sólido, uno líquido y uno gaseoso, existe cierta facilidad o dificultad para hacer reaccionar cada molécula de combustible con una molécula de oxígeno, según sea el estado físico del combustible, siendo más fácil de inflamar un combustible gaseoso, siguiéndole el líquido y por último el sólido. Estos dos últimos tipos de combustible entonces, requerirán de mayores excesos de aire en la mezcla para forzar a que se presente la reacción con el oxígeno, interviniendo también el grado de impureza que presente el combustible.

Cabe anotar que cuanto más pesado es un combustible, es decir, cuanta mayor sea su densidad, mayor será su masa por unidad de volumen y por lo tanto será mayor su poder calorífico por unidad de volumen. Este concepto es muy importante, puesto que los

combustibles se venden por unidad de volumen. El precio de un combustible se define según su poder calorífico.

Los principales combustibles industriales derivados del petróleo son el Diesel 2, el Residual 4 y el Residual 6. Algunas de sus características son las siguientes:

El Diesel 2 es concebido y normalizado específicamente para ser empleado en motores de combustión interna del ciclo diesel, puesto que el índice de Cetano es una de sus especificaciones de mayor importancia. Aunque gran parte de su producción se consume en el sector transportes, también se utiliza en usos industriales, cuando por el tamaño y capacidad de los equipos no resulta conveniente utilizar combustibles residuales. Algunas de sus características más importantes para su uso industrial son:

- No requiere de calentamiento previo para ser bombeado, ni para su atomización.
- Por ser un producto destilado, es un combustible limpio con mínimo contenido de cenizas, sin humedad ni sedimentos y bajo contenido de azufre.
- Su poder calorífico expresado en términos de volumen es menor que el de los combustibles residuales.

El Residual 4 se emplea para sustituir al Diesel 2 en usos industriales, pues presenta características similares conformándose con una porción de Diesel 2 que varía de 70 y 80% y residual 6. Sus características para usos industriales son:

- En condiciones normales no requiere calentamiento para su bombeo ni para su atomización.
- En climas fríos, cuando la temperatura ambiental disminuye por debajo de 15 grados centígrados, podría requerir un ligero calentamiento para su adecuada atomización,

dependiendo del quemador empleado.

- El contenido de impurezas tales como cenizas, agua, sedimentos y azufre, es ligeramente superior al del diesel 2 pero no representa mayor problema.
- Su poder calorífico expresado en función de volumen es ligeramente mayor que el del diesel 2.
- El atractivo de su utilización al sustituirlo por el diesel 2 es de carácter económico pues su precio normalmente es de 10 a 15% menor y combustiona en condiciones similares.

El Residual 6 tiene características muy diferentes a los destilados y la presencia de impurezas afectan la eficiencia de combustión, con contaminación y se debe dar un mayor mantenimiento al generador. Algunas de sus características son las siguientes:

- Requieren de calentamiento para su bombeo (45°C) y para su correcta atomización (110°C).
- Su viscosidad no debe exceder de los 300 segundos Saybolt Furol a 122°F.
- El contenido de cenizas presentando en su composición, elementos corrosivos en condiciones térmicas exigentes, tales como vanadio, níquel, sodio, magnesio, etc. que requieren de atención especial.
- El contenido de azufre, normalizado en menos del 2% que ocasiona problemas de corrosión y contaminación.
- El poder calorífico expresado en función del volumen, es mayor aproximadamente un 7% que el diesel 2.
- El contenido de agua y arrastre de sedimentos puede resultar un problema si no se da la atención necesaria, particularmente en la recepción y almacenamiento.

Este combustible se emplea por razones económicas o por su disponibilidad.

Además de las diferencias en la eficiencia, existen otros factores preponderantes en la selección del combustible, tales como: su disponibilidad en el mercado, el precio, las

instalaciones con que se cuenta para su distribución, manejo y almacenamiento, así como las técnicas para utilizarlo. En las siguientes gráficas se puede ver el ahorro energético tanto para gas como para combustóleo.

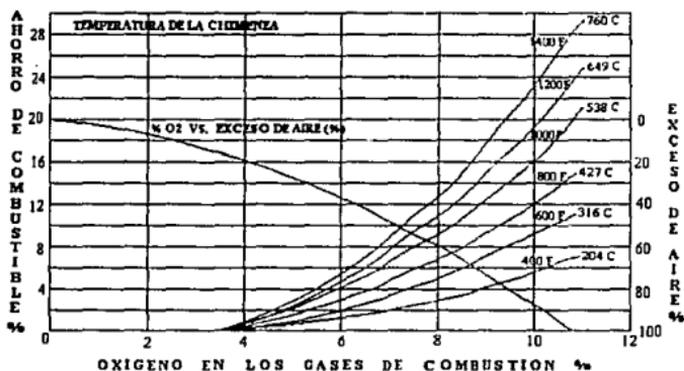


FIG. 28 AHORRO DE COMBUSTÓLEO REDUCIENDO EL E.A. A 20%

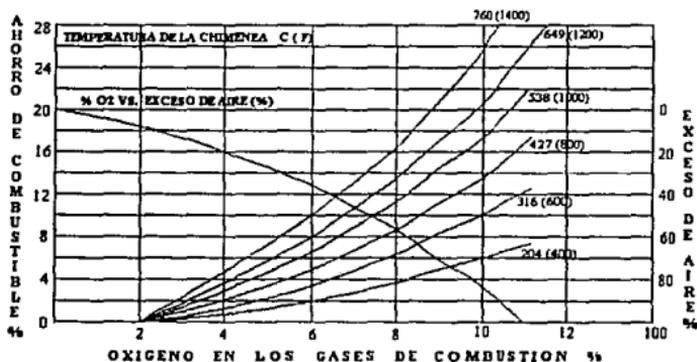


FIG. 29 AHORRO DE GAS REDUCIENDO EL E.A. A 10%

### 3.4 MANTENIMIENTO

El mantenimiento es una parte esencial en el buen funcionamiento y altos rendimientos de los generadores de vapor, tanto en su parte preventiva como en su parte correctiva. Con las revisiones periódicas y correcciones necesarias en las partes importantes de los generadores de vapor, se asegura un mayor margen de prevención de accidentes, un alargamiento de la vida útil de la caldera y un menor costo de operación.

En las características de diseño de los generadores de vapor se considera imperativo reducir al mínimo los riesgos de operación para el operador, para los equipos y para la producción, aunque éste no resulta suficiente. Los sistemas de control, la resistencia de materiales, los automatismos, las indicaciones electrónicas, mecánicas y visuales, etc. se degradan con el tiempo; el mantenimiento preventivo tiene la función de reducir al mínimo estas condiciones peligrosas.

Algunos puntos donde debemos enfocar la atención, además de los puntos de mantenimiento de rutina, pueden ser, las revisiones periódicas de la calidad del combustible con el fin de cerciorar si la relación aire-combustible es la adecuada, pues al tener un mayor aprovechamiento del combustible con su buena combustión, se obtienen desechos (gases) menos sucios que permiten mantener las superficies de transferencia de calor más limpias; se deben revisar y eliminar todas las fugas en tuberías, válvulas, etc.; verificar que la atomización del combustible sea la indicada y funcione correctamente, así como ajustar la temperatura del combustible; la revisión y reposición en casos necesarios de los filtros de combustible, y el aislamiento de las superficies externas de las tuberías, que por diseño lo requieran.

Otros puntos importantes son, la limpieza interna de las superficies de transferencia de calor, la verificación del buen funcionamiento de las válvulas de control de alimentación de agua, aire y combustible, revisar y mantener en buen funcionamiento y estado los quemadores, así como el cambio de obsoletos por otros de mayor eficiencia, eliminar las entradas parásitas de aire y las fugas de gases de combustión, la revisión del buen estado de las válvulas de seguridad, etc.

### 3.5 TRATAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN

Las sustancias contenidas en el agua de alimentación a una caldera pueden provocar diversos efectos nocivos como incrustación, corrosión, depósitos, espumeo, fragilización y formación de películas. Parte de estos efectos dañan los materiales de construcción de la caldera, otros reducen la transferencia de calor hacia el fluido de trabajo proporcionando mayores pérdidas de energía por la chimenea. La concentración de estas sustancias se regula mediante el adecuado tratamiento del agua de alimentación y el régimen de purga.

Se estima que al reducir en 0.03 unidades la fracción de purga (volumen de purga / volumen de agua de alimentación), la eficiencia del generador de vapor se incrementa en 1%, pero al purgar una caldera se pierde agua y la energía que contiene. La mayoría de los generadores de vapor en operación no cuentan con sistemas para volver a utilizar estos mismos recursos; así las pérdidas crecen al aumentar la purga.

Con un arreglo adecuado es factible recuperar gran parte de la energía y del agua contenidas en las purgas de calderas. El sistema más simple consiste en un tanque de separación, en el cual se reduce bruscamente la presión de la purga, propiciando la evaporación de parte de esta corriente. La fracción vapor puede aprovecharse para precalentar el agua de alimentación a la caldera. El agua remanente se pasa a través de un intercambiador de calor para que ceda parte del calor sensible que contiene al agua de repuesto de la caldera. Con esta práctica es factible recuperar alrededor del 50% de la energía de la purga.

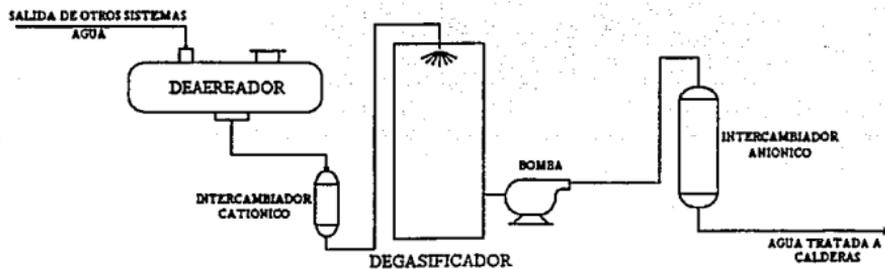
Las especificaciones de calidad del agua de alimentación para calderas dependen en gran parte de la presión de operación del generador de vapor; entre mayores sean la presión y temperatura de operación de la caldera, mayores serán los requerimientos de calidad del agua de alimentación, lo que se traduce en darle un mejor tratamiento al agua.

En general para las calderas, el agua de alimentación debe ser deaerada. El tratamiento químico interno también es, por lo general, necesario en todos los casos.

El método de tratamiento del agua de alimentación de una caldera, además de depender de la presión y temperatura de operación, depende de la calidad del agua con que se cuenta en el lugar donde está la caldera; si se toma el agua de un río limpio, el agua requerirá de un tratamiento ligero, pero si el agua se toma de un lugar en donde se manejen sólidos en suspensión ó materia orgánica, el agua necesita un tratamiento sumamente completo.

Algunos de los equipos para tratamiento de agua que se utilizan en las calderas son los siguientes: clarificadores, aereadores, filtros, suavizadores, deaeradores, intercambiadores de iones para desmineralización, evaporadores, etc.

Algunos de los procesos utilizados en tratamiento de agua son: aereación y cloración, cal-carbonato en frío ó con proceso caliente, suavización mediante intercambiador de cationes en frío, suavización ácida y desalcalinización con degasificación, desmineralización, evaporación, ósmosis inversa, deaeración, etc.



**FIG. 30 PROCESO DE DEAREACIÓN Y DESMINERALIZACIÓN DEL AGUA**

### 3.6 IMPORTANCIA DE LA INSTRUMENTACIÓN

Con la evolución que ha sufrido la industria, hoy en día, requiere de una serie de aparatos que en conjunto den un mayor rendimiento a los generadores de vapor; éste conjunto de aparatos se llama **INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**.

Dentro de los sistemas de control, el automático forma parte integral de los procesos continuos, llegando a tal grado su importancia que difícilmente se puede encontrar un proceso industrial en el que no esté presente. Los procesos se controlan con mayor precisión mediante la aplicación del control automático para dar productos más uniformes y de alta calidad.

Los procesos exigen que cada uno de sus pasos se lleven a cabo en condiciones rigurosamente controladas en todo momento. La uniformidad en la producción y el control uniforme de las variables que intervienen en el proceso, aumenta la eficiencia del equipo así como la calidad de los productos obtenidos.

Los beneficios económicos incluyen la reducción de los costos de operación, mantenimiento, producto fuera de especificaciones, mejoramiento de la funcionabilidad del proceso y una producción mayor.

Para lograr un aumento en la eficiencia total de operación por medio de la instrumentación y el control, es necesario efectuar los ajustes requeridos a los controladores, con afinaciones continuas, ya que éstos en muchas ocasiones ajustan variables que escapan a la detección humana, relevando al personal de muchos ajustes

rutinarios.

Debido a la complejidad del proceso involucrado en los generadores de vapor, es necesario un sistema completo de instrumentación que opere la planta, ya que humanamente se hace imposible operar estas plantas sin la adecuada instrumentación y los dispositivos de potencia necesarios para accionar las diferentes válvulas, compuertas, etc., que se tienen y que deben ajustarse en la operación.

Los procesos industriales exigen que cada uno de sus pasos se lleve a cabo en condiciones rigurosamente controladas en todo momento. Por consiguiente, la aportación de instrumentos a las industrias de proceso no debe considerarse como una cosa conveniente sino como una necesidad absoluta.

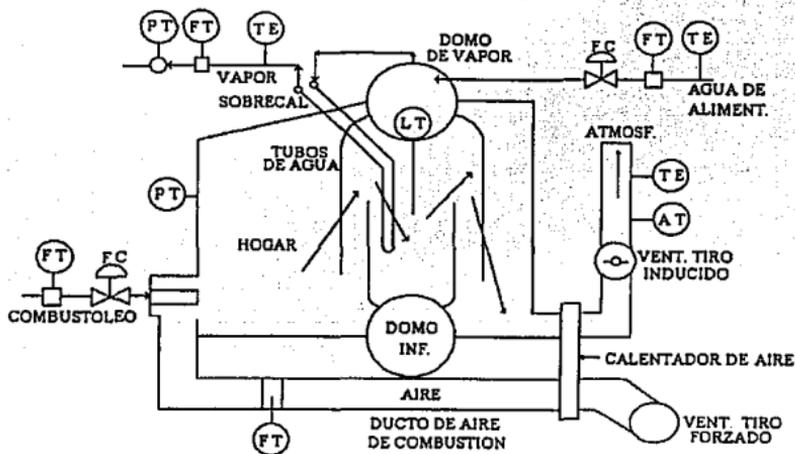


FIG. 31 DIAGRAMA TÍPICO DE INSTRUMENTACIÓN DE CALDERAS

Es importante señalar que estos puntos deben someterse a revisiones periódicas y no solamente al momento de iniciar la operación, pues creando esa costumbre se detectarán fallas que no se ven a simple vista pero que pueden resultar muy costosas. En el capítulo siguiente se expondrán los sistemas de control que se proponen para un mejor funcionamiento del sistema.

## CAPÍTULO IV

### **INSTRUMENTACIÓN PROPUESTA PARA EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.**

#### **4.1 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN Y PRESIÓN DE CABEZAL DE VAPOR**

En el presente capítulo, se expondrán los sistemas de control que se proponen para el sistema de generación de vapor descrito en el capítulo dos, con la finalidad de obtener mejoras en ahorro energético, disminuir el número de paros por mantenimiento, obtener un mejor control de las variables y una mayor eficientización del proceso de generación de potencia entre otras cosas.

Uno de los puntos de gran importancia en la instrumentación de calderas, es el control de la combustión en donde se debe usar un método de operación sistemático y conveniente, que traiga como consecuencia el menor esfuerzo humano, un costo de operación mínimo, bajo mantenimiento y una operación uniforme.

El control de combustión no solamente involucra la relación aire-combustible, sino también el control de agua de alimentación, así como control de tiro, ajustes de exceso de aire y otros muchos refinamientos empleados para llegar a la optimización de una operación uniforme, principalmente en grandes instalaciones.

El sistema de control de combustión controla la presión del vapor manipulando el

flujo de combustible y aire hacia los quemadores, y para tal fin, se usará un control llamado de límites cruzados, es decir, se relaciona el controlador de aire con el controlador de combustible por medio de selectores de alta o de baja señal; el sistema de control de combustión funciona de la siguiente manera (Ver figura 32):

El sistema de control de combustión esta compuesto por los siguientes elementos: dos transmisores de flujo FT-1 y FT-2 (uno de combustible y otro de aire), un transmisor de presión en el cabezal de vapor PT-1, un transmisor analizador de oxígeno en los gases de salida AIT, un controlador maestro de presión PIC-1, tres controladores que manejan la función bias HIC-3 (uno por cada caldera), tres controladores maestros de flujo de combustible FIC-1 (uno por cada caldera), tres controladores maestros de flujo de aire FIC-3 (uno por cada caldera), tres controladores de flujo de oxígeno FIC-5 (uno por cada chimenea) y dos transductores convertidores de corriente a presión FY-5 y FY-6 (el primero para la válvula de combustible y el segundo para el servomotor del ventilador de tiro forzado).

El controlador maestro de presión PIC-1 está compuesto por todos los elementos que encierra la línea punteada; éstos son: un elemento comparador FY-2, el controlador de presión (en su modo proporcional más integral PI, es decir  $K+I$ , ver anexo A1) PIC-2 y una estación manual-automático HIC-2. El controlador maestro de flujo de combustible FIC-1 está compuesto por: un controlador de flujo ( $K+I$ ) FIC-2, un selector de alta HSS-1 y un selector manual-automático HIC-1. El controlador maestro de flujo FIC-3 está compuesto por: la estación de relación FY-3, un generador de funciones FY-4, el controlador de flujo de aire ( $K+I$ ) FIC-4, el selector de baja LSS-1 y la estación manual-automático HIC-4. El controlador de flujo de oxígeno ( $K+I$ ) FIC-5 está compuesto por

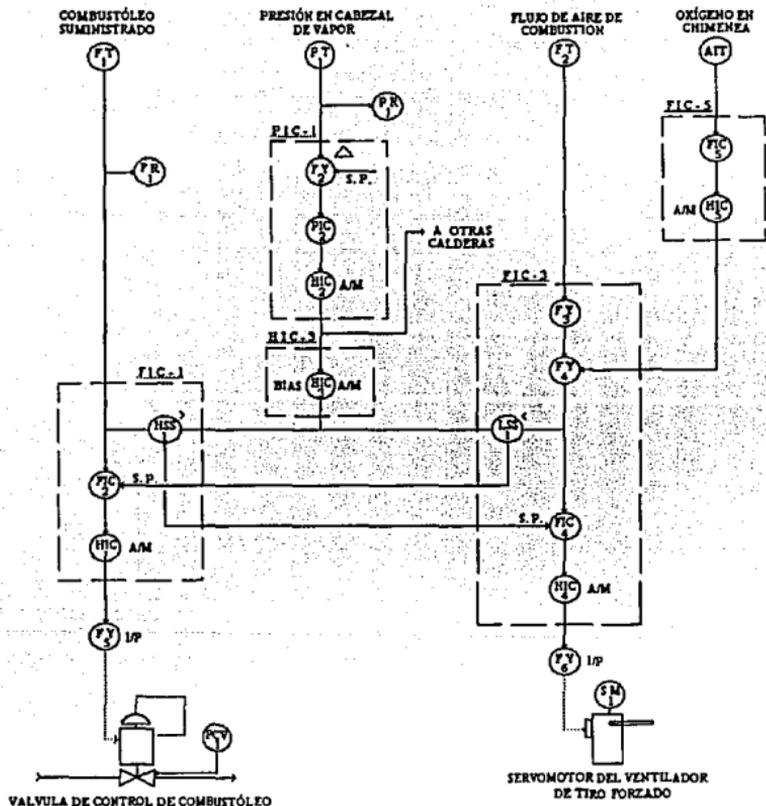


FIG. 32 CONTROL DE COMBUSTIÓN Y PRESIÓN DE CABEZAL DE VAPOR.

un controlador FIC-5 y una estación manual-automático HIC-5 y la estación maestra HIC-3 está compuesta solamente por la estación manual-automático con la función bias HIC-3.

El funcionamiento es el siguiente: el transmisor de presión PT-1 manda la señal de presión del vapor al controlador maestro de presión PIC-1 y al registrador de presión PR-1. Esta señal se compara con el punto de ajuste en FY-2 y el controlador PIC-2 manda la señal correctiva a la estación maestra HIC-3 de cada caldera, habiendo pasado por el selector HIC-2. Esta estación maestra HIC-3, tiene la operación bias (polarización) para el balance de carga en cada caldera y la salida de esta estación indica la demanda de combustóleo y aire para mantener la presión de vapor deseada en el cabezal.

El maestro HIC-3 es una estación manual-automática que provee tres funciones: a) sigue la señal del controlador maestro de presión para controlar cada caldera automáticamente cuando el maestro caldera está en modo automático; b) el operador puede ajustar la demanda de la relación de quemado individualmente para cada caldera cuando el maestro caldera está en modo manual, y c) provee un ajuste manual para bias a la carga de cualquiera de las calderas a un punto más abajo, en el cual el control de combustión no deberá modular el flujo de combustóleo y aire dentro del horno.

El transmisor de flujo de combustóleo FT-1 manda su señal al controlador maestro de flujo FIC-1 y es una señal variable (variable controlada de combustible) la que se compara con el punto de ajuste en el controlador FIC-2 y su salida pasa por la estación HIC-1. La salida del controlador maestro FIC-1 es la que se encarga de controlar la apertura de la válvula de combustóleo y para esto se utiliza un convertidor de corriente a presión FY-5, puesto que la válvula de control es neumática.

Este sistema de control cuenta con un analizador de oxígeno AIT localizado en la

salida de los gases. El objeto de este analizador es corregir la entrada de aire si se presenta exceso o falta de oxígeno en los gases de salida de la caldera, por medio de un controlador FIC-5, en el que el punto de ajuste es el valor requerido de oxígeno, mandando su señal correctiva al generador de funciones FY-4 localizado en el controlador maestro de flujo FIC-3.

El flujo de aire se mide con FT-2, y su señal se manda al controlador maestro de flujo de aire FIC-3, y dentro de este controlador, se le extrae la raíz cuadrada a la señal de flujo de aire (en FY-3), dejándola linearizada; la salida de la estación FY-3 es mandada al generador de funciones FY-4 para que haga la corrección que indique el analizador de oxígeno y su señal de salida es la variable controlada de flujo de aire, la que se compara con el punto de ajuste del controlador de flujo de aire FIC-4; la salida del controlador maestro de flujo FIC-3 posiciona las paletas del soplador de tiro forzado para controlar el flujo de aire a los quemadores de la caldera, por medio de un convertidor de corriente a presión FY-6.

El selector de baja LSS-1 selecciona el valor más bajo de señal entre el flujo de aire (proveniente de FY-4) y la señal de la estación maestra HIC-3. La señal de salida de LSS-1 se dirige como punto de ajuste (set-point) al controlador de flujo de combustóleo FIC-2 dentro del controlador maestro de combustóleo FIC-1.

El selector de alta HSS-1 selecciona la señal más alta entre el flujo de combustóleo y la demanda que ordena la estación de control HIC-3. La salida del selector HSS-1 se alimenta como punto de ajuste al controlador de flujo de aire FIC-4 dentro del controlador maestro de flujo FIC-3.

El control de combustión por límites cruzados tiene por objeto controlar los flujos

de aire y combustible, de tal forma que nunca exista un exceso de combustible que origine una condición insegura. Para ejemplificar las ventajas de tener límites cruzados supongamos que se presenta un incremento en la demanda de vapor, por lo tanto se da origen a los siguientes eventos:

- 1 - La presión de vapor en cabezal baja.
- 2 - Dado que la acción del control de presión PIC-2 es inversa, la salida de éste aumenta.
- 3 - El selector de alta HSS-1 deja pasar la señal de presión que aumentó.
- 4 - El punto de ajuste (set-point) remoto del controlador de aire FIC-4 aumenta.
- 5 - Dado que el controlador de aire es de acción directa, el flujo de aire aumenta.
- 6 - El selector de baja LSS-1 selecciona la señal de flujo de aire que se encuentra aumentando, pero es aún menor que la señal de presión.
- 7 - El punto de ajuste remoto del controlador de combustible FIC-2 aumenta.
- 8 - Dado que el control de combustible es de acción directa, el flujo de combustible aumenta.
- 9 - Después de un determinado tiempo, el selector de alta HSS-1 selecciona la señal de flujo de combustible, estabilizándose el sistema.

Ahora, supongamos que la demanda de vapor disminuye, por lo tanto se da lugar a los siguientes eventos:

- 1 - La presión de vapor en cabezal aumenta.
- 2 - Dado que la acción del control de presión PIC-2 es inversa, la salida de éste disminuye.
- 3 - El selector de baja LSS-1 deja pasar la señal del control de presión que disminuyó.
- 4 - El punto de ajuste remoto del controlador de combustible FIC-2 disminuye.
- 5 - Dado que el control de combustible tiene acción directa, el flujo de combustible

disminuye.

- 6 - El selector de alta HSS-1 toma la señal de flujo de combustible que, aunque empieza a disminuir es mayor que el de la señal del control de presión.
- 7 - El punto de ajuste remoto del controlador de aire FIC-4 disminuye.
- 8 - Dado que el controlador de flujo de aire es de acción directa, el flujo de aire disminuye.
- 9 - Después de un determinado tiempo, el selector de baja selecciona la señal de flujo de aire, y se estabiliza el sistema.

Con el sistema de control de combustión de límites cruzados, se obtiene una operación más eficiente y segura, pues en el caso de que la demanda de vapor disminuya, se registrará un aumento en la presión del cabezal y el sistema cerrará primeramente la alimentación del combustible y después disminuirá el flujo de aire de combustión. En el caso contrario de que la demanda de vapor aumente, se registrará una disminución en la presión del cabezal y el sistema mandará suministrar primeramente el flujo de aire, siguiéndole la alimentación del combustible; de esta forma se obtiene una operación segura en la combustión, al no tener suministro de combustible innecesario sin presencia de aire.

El sistema de control de combustión que estaba operando es neumático y cualquier falla en la línea de conducción de aire (como obstrucción parcial por ensuciamiento en las toberas de los controladores, transmisores, etc.), ocasionaba falla en la operación normal del control; debido a que el sistema es neumático, se tenían respuestas lentas y poco precisas, obteniendo una velocidad de respuesta tardada. La operación del sistema neumático es hasta cierto punto riesgosa, pues al tener una variación de carga en la caldera y tanto el aire como el combustible se corrigen simultáneamente, existe la posibilidad de que se presente alguna cantidad de combustible sin presencia del aire necesario dentro del hogar.

Algunas de las ventajas que tiene este sistema de control sobre el anterior son:

- En el sistema de control de combustión propuesto se puede caracterizar más eficientemente la relación de aire-combustible debido a que se está trabajando con equipo electrónico, obteniendo así, una mejor combustión independientemente de la carga de vapor que se requiera.

En el sistema anterior, esa caracterización era mala, pues no se tiene la misma precisión en un sistema de control neumático comparado con un electrónico, y esto provocaba que se tuvieran desechos altamente contaminantes a la atmósfera, saliéndose de los límites que indican las normas de emisiones impuestas por Sedesol; al tratar de corregir esta falla para evitar riesgos de multas, se suministraba mayor cantidad de aire de combustión, provocando grandes derroches de energía por la gran cantidad de gases calientes que escapaban por la chimenea y con esto incrementaban el costo de generación de vapor.

Con el sistema de control de combustión propuesto se mejora por mucho la combustión, dando como resultado un menor consumo de combustible (el fabricante del equipo de control garantiza cuando menos un 5% de ahorro en combustible), emisiones contaminantes dentro de norma, menor costo de operación, menor ensuciamiento en el trayecto de los gases calientes por combustión completa y mayor tiempo de operación sin paros por mantenimiento.

- Las refacciones del equipo neumático cuestan casi el doble que las electrónicas, elevando el costo por reparaciones.

- El costo por mantenimiento en el control neumático es mucho mayor que el electrónico, pues ocupa demasiado tiempo en cualquier reparación y se incrementa el pago de mano de obra.

- El sistema anterior no contaba con totalizadores y registradores, lo que provocaba descontrol al no tener una cuantificación tanto en generación de vapor, como en consumo de combustible y agua, no conociendo el costo de la generación de vapor.

- Además de los puntos anteriores, el empleo de instrumentos de control a través de microprocesadores, presenta las siguientes ventajas:

+ Se tiene una comprensibilidad inmediata por la facilidad de lectura en los caracteres, que se presentan con toda claridad a fin de evitar errores o confusiones.

+ Se obtiene mayor precisión, pues se reducen los errores en las lecturas por parte del operario y las fallas en el funcionamiento mecánico.

+ La velocidad de respuesta es mayor, ya que se pueden presentar datos tan rápido como el ojo humano pueda seguirlos.

+ Se tiene mayor flexibilidad, debido a que los controladores electrónicos son capaces de registrar con gran rapidez, unidades y símbolos de medición muy diferentes entre sí, como son, tiempo, presión, temperatura, etc.

Con estas ventajas se obtiene un mayor control y precisión del proceso, empleando un menor esfuerzo de los operadores y teniendo una operación más uniforme y segura.

## 4.2 CONTROL DE PRESIÓN DE VAPOR DE ATOMIZACIÓN

El control de presión de vapor de atomización a quemadores (Ver figura 33), está compuesto por dos transmisores de presión; uno situado en el cabezal de atomización de vapor a quemadores, y el otro en la línea final de combustóleo hacia quemadores; consta también de un controlador maestro de presión PIC-2 y de un transductor convertidor de corriente a presión FY-7. El controlador maestro de presión de vapor de atomización PIC-2 está compuesto por un controlador de presión (K+I) PIC-3 y una estación manual-automática HIC-6.

Los transmisores de presión mandan su señal al controlador de presión PIC-3 en donde se hace la comparación entre las dos señales; generalmente se ajusta el controlador para que se tenga una diferencia de presión entre las dos señales de 1 a 1 1/2 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo la mayor, la de vapor de atomización. Este valor entre 1 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup>, es un valor fijo y es el valor que se registrará como punto de ajuste. La salida del controlador de presión se envía a la estación manual-automática HIC-6.

La salida del controlador maestro PIC-2 manda su señal correctiva al servomotor que controla la válvula de presión de vapor de atomización, habiendo pasado previamente por el convertidor de corriente a presión FY-7; de esta forma, se obtiene la seguridad de que el combustóleo que va a ser quemado va a tener la atomización requerida.

Este sistema de control sirve básicamente para obtener mayor seguridad. El sistema se encarga de asegurar que se tenga el valor de presión deseado en el cabezal de vapor de atomización y que no baje según lo que indique su punto de ajuste. De esta

forma podremos asegurarnos de no tener combustible sin la debida atomización dentro del hogar de la caldera, o bien, de no tener tan sólo la atomización con falla de combustible.

Si no se tiene una atomización adecuada, nos enfrentaríamos a una operación insegura y una combustión incompleta, pues el combustible no se fracciona de tal manera que se facilite su quemado. Si la presión de vapor de atomización está por arriba del límite ajustado, se tiene una mala combustión observándose contaminación por la formación de monóxido de carbono. Si la presión es menor que el punto de ajuste, puede ocurrir que en un caso muy crítico, el combustible que no se fraccionó debidamente, caiga al fondo del hogar, soltando vapores fácilmente inflamables; si por alguna razón se hace un paro de la caldera, al intentar encenderla nuevamente, se provocaría una explosión debida a que se queman todos los vapores que se encontraban en el hogar.

Algunas de las ventajas que se obtienen con este sistema de control propuesto son las siguientes:

- El ajuste de la presión de vapor de atomización se efectuaba manualmente, lo que provocaba inestabilidad en la combustión. Ahora que se automatiza el ajuste, permite al operario tener confiabilidad de operación, además de que se puede ocupar con más concentración a otra actividad.

- Se reducen los índices de contaminación de CO por la eficientización en la combustión.

- Se eliminan riesgos en la operación normal de la planta.

- Se obtienen todas las ventajas de un sistema de control electrónico, como son:

+ Buena precisión, pues el sistema funciona a base de microprocesadores y no se tienen presentes los errores humanos.

+ Se obtiene una lectura constante de la presión de vapor de atomización, detectando en forma rápida cualquier cambio en ésta.

+ La velocidad de respuesta es bastante rápida, no permitiendo grandes variaciones en la presión.

+ Se obtiene un gran margen de seguridad.

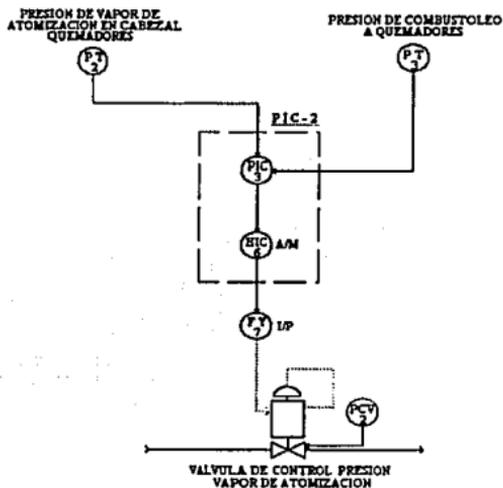


FIG. 33 CONTROL DE PRESIÓN DE VAPOR DE ATOMOZACIÓN

### 4.3 CONTROL DE TEMPERATURA DE AIRE DE COMBUSTIÓN

El objetivo de este sistema de control es mantener la temperatura de los gases de combustión por arriba de su punto de rocío, además de eficientar la combustión. Los gases de salida de la caldera contienen vapor de agua y óxidos de azufre, los cuales, si llegan a condensarse, pueden causar corrosión severa en las partes del calentador de aire, tubos del economizador, y ductos del horno. Para evitar este problema de corrosión deben mantenerse al mínimo las temperaturas de metal del calentador de aire y los tubos del economizador. Además de eliminar este problema, se obtiene un aire caliente de entrada, lo que significa que el calor que lleva ya no va a ser suministrado por el combustible.

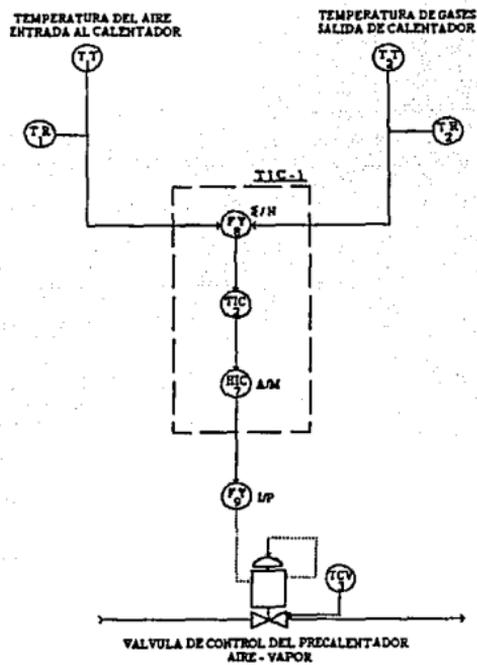
Para el control de temperatura de aire de combustión (Ver figura 34), se utilizan dos transmisores de temperatura TT-1 y TT-2; uno de ellos se localiza en la entrada de aire frío al calentador de aire, y el otro transmisor está ubicado en la salida de gases entre el calentador de aire y la chimenea; generalmente el aire que entra al calentador de aire ya ha sido pasado previamente por el precalentador de aire con vapor para calentar el aire de combustión antes de entrar al calentador y conservar los gases de salida a una temperatura por encima del punto de rocío. Cada señal del transmisor de temperatura representa un promedio de más de una temperatura tomada en el mismo plano de la sección transversal del ducto. Consta también de un controlador maestro de temperatura TIC-1 y de un transductor convertidor de corriente a presión FY-9.

El controlador maestro TIC-1 está formado por un elemento sumador FY-8, el controlador de temperatura TIC-2 y una estación manual-automática HIC-7.

Las señales de los dos transmisores de temperatura se envían al controlador maestro de temperatura TIC-1, pasando la señal por el bloque FY-8 que se encarga de obtener el promedio de las señales mandadas por los transmisores; la salida de este bloque representa el promedio de temperaturas en el "lado frío" del precalentador y llega al controlador de temperatura con su acción proporcional más integral TIC-2 como variable de proceso. El punto de ajuste del controlador deberá ser el promedio de temperaturas deseado en el "lado frío" del precalentador de aire. La salida del controlador TIC-2 pasa por la estación HIC-7 y por último, sale la acción correctiva hacia la válvula que controla el flujo de vapor al precalentador de aire, por medio del convertidor de corriente a presión FY-9.

Anteriormente no se tenía este sistema de control, y la finalidad de su instalación es más importante por el lado de seguridad de la caldera que por el de ahorro energético. Algunas de las ventajas que se obtienen por su instalación son:

- Eficientiza la combustión, al mantener aire caliente en el hogar y consumiendo menos combustible por no tener la necesidad de calentar el aire.
- Aumenta la vida útil de la caldera al no provocar corrosiones severas en su interior por los ácidos que se forman con el azufre que contiene el combustible.
- Se obtiene una operación precisa independientemente de la carga que tenga la caldera.
- Se tiene una lectura constante de las temperaturas sensadas en forma clara y rápida.
- La velocidad de respuesta del sistema es rápida, obteniendo mayor estabilidad.



**FIG. 34 CONTROL DE TEMPERATURA DE AIRE DE COMBUSTIÓN**

#### 4.4 CONTROL DE NIVEL, AGUA DE ALIMENTACIÓN Y PURGA

Este sistema de control, más que para obtener un menor consumo de combustible o alguna otra manifestación de ahorro de energía, sirve básicamente para protección de la caldera.

Es importante mantener controlada la relación de agua de alimentación al domo de la caldera, con respecto a la cantidad de vapor generado para lograr un nivel de agua constante en el domo.

Cuando el vapor se genera, la concentración de impurezas se concentran en el agua y las más insolubles se precipitan en el domo inferior (tanque de lodos). La concentración de sales disueltas y lodos debe mantenerse a un nivel no mayor de su límite prefijado por el fabricante de la caldera. Si éste límite se sobrepasa, podría presentarse arrastre de sólidos con el vapor y si la concentración de sales es muy grande, se presenta depósito en las tuberías y con esto una disminución en la eficiencia de la transferencia de calor y posteriormente en ambos casos, un taponamiento y quemado de tubos.

Para controlar la concentración de sólidos y sales es necesario drenar o purgar el fondo del tanque de lodos, lo cual se puede realizar en forma intermitente o en forma continua, relacionando la cantidad de agua de alimentación con la cantidad de purga; comúnmente el porcentaje de drene es del orden del 5 al 8% del gasto del agua de alimentación, pero si el tratamiento del agua de alimentación no es muy bueno, se puede llegar al orden del 12 al 16% de drenaje con respecto a la alimentación.

Una de las variables más importantes en las calderas para su protección es el nivel del domo, debido a que si se opera a un nivel muy alto, ocurrirán arrastres de agua a las líneas de vapor, agua que por impacto dañará la maquinaria que es alimentada (turbogeneradores). Por el contrario, si el nivel es bajo, pueden dañarse los tubos que comunican el domo superior con el inferior. Estos tubos en condiciones normales, están llenos de agua, la cual al evaporarse, los refrigera y en el momento que dejan de estar llenos se suspende la refrigeración y se sobrecalientan hasta que se queman.

Es importante aclarar que el nivel puede ser una de las variables más fáciles de controlar, debido a que en muchas ocasiones se asemeja bastante a un sistema de primer orden; sin embargo en una caldera no es una variable fácil de controlar, debido a que influyen otros factores como son:

- Las variaciones de nivel pueden ser muy rápidas debido a que en algunas calderas el tiempo de retención es muy pequeño; el tiempo de retención se obtiene dividiendo el contenido de agua normal en el domo superior dado en Kg., entre la producción de vapor normal en Kg/min., obteniéndose el tiempo de retención en minutos. Si el tiempo de retención es pequeño, más difícil será mantener el nivel en forma controlada.

- Existe un efecto de compresión-expansión (shrink and swell), el cual en sistemas de control convencionales produce en el flujo de agua de alimentación un efecto totalmente inverso a lo requerido para controlar el nivel; el efecto de impresión o compresión se presenta cuando disminuye en forma brusca la demanda de vapor y por lo tanto se presenta un aumento de presión en el domo, con lo que disminuye la producción de burbujas y por lo tanto baja el nivel; cuando se presenta un demanda grande de vapor,

se presenta una disminución de la presión en el domo, lo que genera una mayor producción de burbujas y por lo tanto un aumento de nivel.

El control de nivel que se propone, es un sistema de control de tres elementos con corrección de presión y reposición de purga automática. El nivel del tanque de vapor se mide con un transmisor de presión diferencial. Las conexiones del transmisor se hacen en los extremos del domo y estas conexiones son simétricas arriba y abajo del nivel normal. Un recipiente (cámara de condensación) se usa en la conexión de alta presión para condensar el vapor y mantener una carga constante de agua en un lado del transmisor.

La cámara de condensación se conecta al lado de alta presión del transmisor. La conexión inferior del domo se conecta al lado de baja presión del transmisor. Las variaciones en el nivel del domo cambian la presión en el lado de baja del transmisor y así cambia la diferencia de presión a través del transmisor, lo que se interpreta como nivel.

El agua en la pierna de referencia está a las condiciones ambientales de temperatura y ejerce una presión constante en el lado de alta presión del transmisor. Las variaciones de la temperatura ambiente cambian la densidad del agua en la pierna de referencia y subsecuentemente la presión hidrostática. Sin embargo éste cambio de presión es despreciable y normalmente no se compensa. La presión ejercida en el lado de baja presión del transmisor es una función del nivel del agua en el domo de vapor y de la densidad del agua o si el transmisor se calibra a las condiciones normales de presión del domo causará un error significativo en el nivel del agua del tanque (medido).

Cualquier reducción grande de presión en el domo de vapor, tales como las que se presentan en el arranque, la variación de la presión en el domo puede ocasionar un error

de varias pulgadas de agua en la medición del nivel, lo cual ocasiona inestabilidad en el sistema.

Para calderas con presiones normales menores de 500 psig, las variaciones de presión pueden despreciarse. Para calderas con presiones normales de operación mayores de 500 psig deberá hacerse corrección del nivel por presión.

El agua en el domo de vapor está en saturación a una temperatura y presión, y para cualquier valor de presión existe un valor correspondiente de temperatura y densidad. Puede usarse temperatura y presión para corregir la medición de nivel por variación de densidad del agua.

La variable que se usa para corrección del nivel por variación de densidad del agua es la presión. Para calderas con variaciones de presión entre 500 y 1000 psig., la relación entre densidad del agua y la presión es relativamente lineal y para presiones arriba de 1000 psig. se debe caracterizar la relación presión - densidad del agua.

Este sistema de control de nivel (Ver figura 35) funciona de la siguiente forma. La presión del domo de vapor se detecta con el transmisor PT-4, el cual manda su señal al controlador maestro de nivel LIC-1 que está compuesto por un sumador restador PY-1, un elemento multiplicador LY-1, un controlador de nivel (K+I) LIC-1 y un selector manual-automático HIC-1; la señal del transmisor PT-1 la recibe el sumador restador FY-10, el que genera una corrección lineal y se manda al multiplicador LY-1. El nivel de agua en el domo de vapor se transmite por LT-1 y se manda al multiplicador LY-1. La señal del nivel del agua después de LY-1 está compensada por los cambios en la densidad del agua causada por los cambios de presión. La señal de salida de LY-1 es la señal que se alimenta al controlador de nivel LIC-1 dentro del controlador maestro LIC-1. A este controlador se

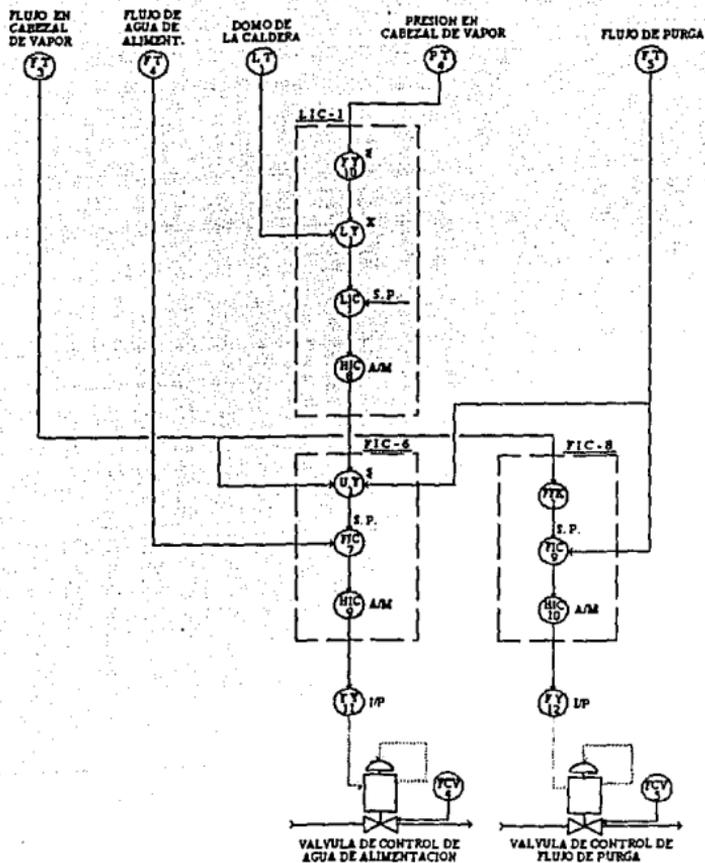


FIG. 35 CONTROL DE NIVEL, AGUA DE ALIMENTACIÓN Y PURGA

le proporciona su punto de ajuste al nivel deseado y la señal de salida se manda al selector manual-automático HIC-8.

La señal de salida del controlador maestro de nivel LIC-1 se manda al controlador maestro de flujo de agua de alimentación FIC-6 que está compuesto por un elemento sumador UY-1, un controlador de flujo (K+) FIC-7 y una estación manual-automática HIC-9.

El funcionamiento siguiente es igual al que se tiene actualmente en operación: La señal de flujo de cabezal de vapor (proveniente de FT-3 y linerarizada en el controlador maestro FIC-6) se suma con la señal que manda el controlador maestro de nivel LIC-1 en UY-1 siendo su salida el punto de ajuste del controlador de flujo FIC-7; este controlador recibe la señal del transmisor de flujo de agua de alimentación FT-4 para ser comparada con su punto de ajuste y su señal de salida se manda al selector manual-automático HIC-9 para enviar la acción correctiva a la válvula de control de agua de alimentación convirtiendo la señal eléctrica en neumática con FY-11.

El sistema de flujo de purga también funciona de igual manera que el sistema que ya se tenía en funcionamiento (ver tema 2.3). El controlador maestro de flujo de purga FIC-8 está compuesto por una estación de relación FFK-1, el controlador de flujo (K+) FIC-9 y una estación manual-automática HIC-10. La señal enviada del transmisor de flujo de vapor FT-3 es recibida por la estación de relación vapor-purga FFK-1 y la señal de salida sirve como punto de ajuste al controlador FIC-9; este controlador recibe también la señal del transmisor de flujo de purga FT-5 para ser comparada con el punto de ajuste y la salida del controlador pasa por la estación HIC-10 para enviar la acción correctiva a la válvula de control de flujo de purga por medio de FY-12 para convertir la señal eléctrica en neumática.

Algunas de las ventajas de este sistema de control sobre el anterior son las siguientes:

- Se tienen elementos más exactos, que permiten mantener el nivel del domo constante, sin variaciones grandes.

- Se eliminan las fallas por obstrucciones parciales de toberas debidas a ensuciamiento, en controladores, transmisores, etc. pues son equipos neumáticos.

- Se reduce el costo de las refacciones. El costo de las refacciones del control neumático es mayor que el de las refacciones electrónicas, bajando el costo de mantenimiento correctivo.

- Se reduce el costo de mantenimiento. El costo de mantenimiento es mayor en el equipo neumático, debido a que ocupa mucho tiempo, incrementándose el costo de mano de obra.

- Se obtiene una mayor comprensibilidad de los datos, ya que éstos aparecen con claridad, evitando errores o confusiones.

- La precisión es mucho mayor en la operación de control electrónico, debido a los microprocesadores, eliminando fallas mecánicas.

- La velocidad de respuesta es mayor, estabilizando más rápidamente el sistema.

- Se tiene flexibilidad, ya que los controladores electrónicos son capaces de registrar rápidamente unidades y símbolos de medición como son, tiempo, presión, temperatura, etc.

#### 4.5 CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR

El sistema de control de temperatura del vapor es importante, pues se requiere una temperatura específica para que el vapor pueda ser utilizado en los turbogeneradores eléctricos.

El sistema de control de temperatura del vapor es un sistema de tres elementos. Este sistema usa para su operación el flujo de aire de combustión (sensado en FT-6), la temperatura de salida del sobrecalentador (sensada en TT-3) y la temperatura de salida del desobrecalentador o atemperador (sensada en TT-4) como variables controladas o variables de proceso (Ver figura 36). Utiliza un controlador maestro de temperatura TIC-3 que efectúa un control en cascada y un convertidor de corriente a presión FY-13.

El controlador maestro de temperatura ( $K+I$ ) TIC-3 está compuesto por un controlador de temperatura del sobrecalentador TIC-4, un elemento sumador UY-2, un controlador de temperatura del desobrecalentador o atemperador TIC-5 y una estación manual-automática HIC-11.

El sistema funciona de la siguiente forma: el flujo de aire de combustión se utiliza como una señal de control prealimentada por medio de un sumador UY-1. La temperatura de salida del sobrecalentador (proveniente de TT-3) se usa como variable controlada para el controlador de la temperatura de salida del sobrecalentador TIC-4.

La señal de salida del controlador TIC-4, se suma a la señal prealimentada de flujo de aire de combustión en UY-1 y su salida se manda como punto de ajuste al controlador de la temperatura a la salida del desobrecalentador TIC-5.

La temperatura de salida del desobrecalentador (proveniente de TT-4) se usa como variable controlada para el controlador de la temperatura de salida del desobrecalentador TIC-5. La salida del controlador TIC-5 acciona la válvula de agua fría de atomización convirtiendo la señal eléctrica en neumática en FY-13.

Se dice que la señal de flujo de aire es una señal prealimentada, porque anticipa al sistema de control de cualquier cambio de carga, lo que produciría un cambio en la temperatura del vapor. Esta señal, proviene del sistema de control de combustión, que con el sistema de límites cruzados, cualquier cambio de carga de vapor, la primera variable modificada es el aire de combustión; es por esto que se utiliza el flujo de aire como señal prealimentada, previniendo un cambio de temperatura y permitiendo al sistema de control de temperatura del vapor, hacer una corrección anticipada.

El sistema de control de temperatura de vapor anterior era de un elemento, además de que era un sistema neumático. El sistema de control propuesto tiene las siguientes ventajas:

- En el sistema propuesto, se sensan las temperaturas tanto a la entrada del desobrecalentador como a la salida de éste. Se tiene un mejor control de la temperatura por este hecho.

- Se eliminan los errores causados por ensuciamiento de las toberas de los controladores y transmisores neumáticos.

- El costo de las refacciones del equipo neumático es mayor que el de los microprocesadores.

- El costo de mano de obra en cualquier reparación es más barato en el sistema electrónico que en el neumático, debido a que requieren de más tiempo las reparaciones del equipo neumático.

- Se alarga la vida útil del equipo que se alimenta con el vapor al tener una temperatura constante.

- La velocidad de respuesta se incrementa en los controles electrónicos.

- Se obtienen lecturas rápidas y claras, evitando confusiones y errores.

- El sistema de control tiene mayor estabilidad y precisión en la variable controlada (temperatura del vapor).

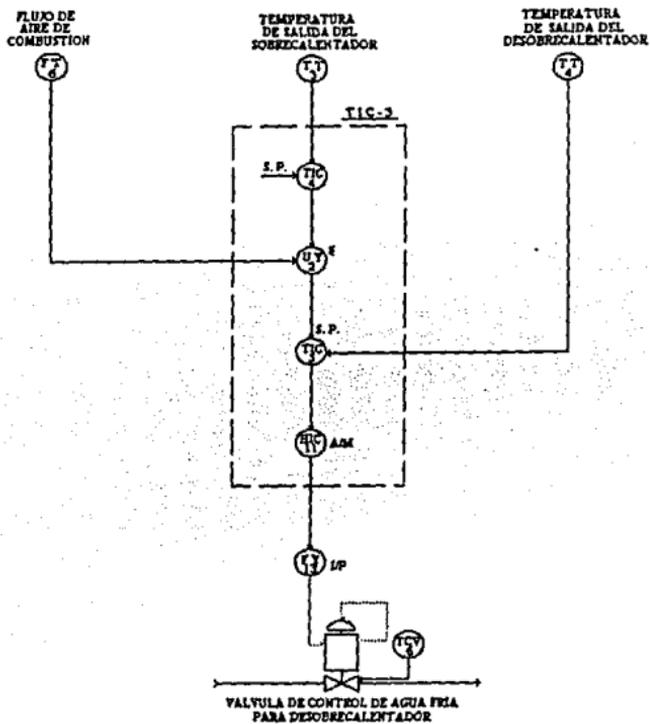


FIG. 36 CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR

#### 4.6 CONTROL DE PRESIÓN DEL HOGAR DE LA CALDERA

El control de presión del hogar de la caldera que se tenía en operación, se combina con el sistema de control de combustión para obtener un sistema de control de dos elementos (Ver figura 37).

El sistema de control de presión del hogar, consta de un transmisor de presión PT-5 localizado en el hogar de la caldera, un controlador maestro de presión PIC-4 y un transductor convertidor de corriente a presión FY-14. El controlador maestro de presión PIC-4 está compuesto por un controlador de presión (K+) PIC-5 y un elemento sumador UY-3.

El controlador de flujo de aire del sistema de control de combustión, en su señal de salida, proporciona una señal prealimentada para posicionar el obturador del tiro inducido y adelantarse, para mantener la presión del hogar en cualquier caso de cambio en la demanda de carga de la caldera. El controlador de presión del hogar PIC-4, actúa para corregir el efecto de la señal prealimentada del aire de combustión. La señal de salida del controlador de flujo de aire y la señal de salida del controlador de presión PIC-5, se suman para proporcionar la señal de control correcta para el obturador del tiro inducido.

El sistema de tiro balanceado anticipa los cambios en la presión del hogar y ejecuta acción correctiva antes de que ocurran los cambios en el tiro forzado, con lo que se mejora considerablemente la eficiencia en la circulación de los gases de combustión dentro del hogar.

Generalmente es recomendado utilizar un punto de ajuste de 5 a 10 mm col. de agua de vacío. Este punto es fijo y el controlador accionará el obturador de tiro inducido para mantener esa presión.

Es muy importante que el control sea estable, pues al tener mucha presión en el hogar, puede darse el caso de que explote la caldera, y en el caso contrario, se puede presentar una implosión.

Algunas ventajas de este sistema propuesto sobre el anterior, son las siguientes:

- Se tiene una señal anticipada proveniente de la variable que primeramente se corrige en cualquier caso de cambio en la demanda de vapor (flujo de aire), dando tiempo al sistema de control de presión del hogar para ejercer la debida corrección, obteniendo mayor estabilidad.

- No existen fallas por el mal funcionamiento del control neumático, debido al ensuciamiento u obstrucción parcial de las toberas de los controladores y transmisores.

- El costo tanto de las refacciones como del mantenimiento del sistema electrónico se reduce, ya que el costo de refacciones neumáticas es casi el doble que el de las refacciones del equipo electrónico; el tiempo que tardan las reparaciones del equipo neumático es mucho mayor que las del equipo electrónico, reduciendo el costo por mano de obra.

- El sistema electrónico tiene claridad en su lectura de datos, que se presentan casi al instante de que se registre un cambio medible, teniendo la información de la presión en el hogar en cualquier momento.



## CAPÍTULO V

### **COSTO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y AHORRO ENERGÉTICO**

#### **5.1 EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN**

En éste capítulo, se expondrá el equipo de instrumentación que será aplicado a los sistemas de control descritos en el capítulo cuatro. Primeramente se definirá el tipo de aparato que se va a utilizar ya sea transmisores, controladores, transductores, registradores, elementos finales de control, etc., y después se verán los costos por sistemas de control en el orden del capítulo anterior, empezando pues, por el sistema de control de combustión y terminando con el sistema de control de presión del hogar.

El equipo que se va a utilizar en los sistemas de control propuesto, es el siguiente:

#### **TRANSMISORES:**

##### **+ DE FLUJO:**

Para Combustible: Transmisor tipo Coriolis con medición de masa directa y entrada de 4 a 20 mA.

Para Aire: Transmisor de Presión Diferencial con entrada de 4 a 20 mA y salida cuadrática para ser linearizada en el controlador, con elemento primario de placa de orificio.

Para Vapor: Transmisor de Presión Diferencial con las mismas características que el anterior.

Para Agua : Transmisor de Presión Diferencial con las mismas características que el anterior.

Para Purga: Transmisor de Presión Diferencial con las mismas características que el anterior.

**+ DE PRESIÓN:**

Elemento tipo Diafragma, piezoresistivo con entrada de 4 a 20 mA.

**+ DE TEMPERATURA:**

Bulbo de resistencia con Transductor integrado y salida de 4 a 20 mA.

**+ DE NIVEL:**

Transmisor de Presión Diferencial con entrada de 4 a 20 mA y salida cuadrática, para ser linearizada en el controlador.

**+ DE OXÍGENO:**

Analizador de oxígeno marca servomex.

**CONTROLADORES:**

**+ EN GENERAL:**

Estaciones de Control Autocontenidas, cuya función configurable es la siguiente:

Control.

- Indicación de la Variable Controlada.
- Bias.
- Estación manual-automática (A/M).

## **TRANSDUCTORES:**

### **+ EN GENERAL:**

Convertidores de Corriente a Presión de 4 - 20 mA a 3 - 15 psig. Se usaran éstos transductores para poder utilizar las válvulas de control ya existentes que se encuentran en buen estado, para lo que es necesario convertir la señal eléctrica proveniente del sistema de control a señal neumática que es la que manejan las válvulas de control.

## **REGISTRADORES:**

Para Presión del cabezal: Registradores Electrónicos de 1 pluma con entrada de 4 a 20 mA.

Para Flujos de Aire y Combustible: Registradores Electrónicos de 2 plumas con entrada de 4 a 20 mA.

Para Nivel y Flujos de Agua y Vapor: Registradores Electrónicos de 3 plumas con entrada de 4 a 20 mA.

Para Temperaturas de Aire de Combustión, Gases a la salida del atemperador y Gases a la salida de sobrecalentador secundario: Registradores Electrónicos de 3 plumas con entrada de 4 a 20 mA.

#### **VÁLVULAS DE CONTROL:**

Válvula de control tipo globo, puerto balanceado, con interiores en acero inoxidable y cuerpo de acero al carbón. Actuador neumático tipo diafragma y electroposicionador, con transductor integrado, entrada de 4 a 20 mA y salida de 3 a 15 psig.

#### **TOTALIZADORES:**

Totalizador electrónico con indicación de flujo instantáneo e integración del flujo.

## 5.2 COSTO DE LA INSTRUMENTACIÓN.

En esta parte, se expondrán los costos que tiene el equipo de instrumentación, siguiendo el mismo orden de aparición de los sistemas de control propuestos en el capítulo cuatro. Con la finalidad de identificar cada equipo de cada sistema, será necesario ir revisando conjuntamente las figuras correspondientes a cada control. (Figs. 32 a 37 del Cap. IV). Los precios que a continuación se presentan son los precios de lista del fabricante menos el 20% de descuento obtenido por la extensa cantidad de equipo que se comprará para este proyecto.

### + CONTROL DE COMBUSTIÓN Y PRESIÓN DE CABEZAL DE VAPOR:

Para éste sistema se utilizará el siguiente equipo de instrumentación:

Cant.	Descripción:	P.U. en N\$	Costo:
3	Transmisores de Flujo tipo Coriolis para combustible (un transmisor por caldera)	25,040	75,120
1	Transmisor de Presión de Cabezal de Vapor tipo diafragma, piezoresistivo.	1,540	1,540
3	Transmisores de Presión Diferencial con Placa de Orificio para medición del Flujo de Aire de Combustión (un transmisor por caldera)	3,920	11,760
13	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (1 control de presión, 3 controladores flujo de comb., 3 controladores de flujo de aire, 3 estaciones BIAS y 3 controles de oxígeno en chimenea.)	4,540	59,020

6	Transductores de corriente a presión (3 transd. para válv. de combustible, 3 para servo tiro forzado)	1,520	9,120
3	Analizadores de oxígeno marca servomex.	35,000	105,000
3	Registros de 2 plumas (flujo de comb. y flujo de aire)	7,400	22,200
1	Registro de 1 pluma (presión del cabezal)	5,780	5,780
<b>SUMA TOTAL DEL SISTEMA</b>		<b>NS 289,540</b>	

**+ CONTROL DE PRESIÓN DE VAPOR DE ATOMIZACIÓN:**

Este sistema requiere el siguiente equipo de instrumentación:

Cant.	Descripción:	P.U. en NS	Costo:
6	Transmisores de Presión tipo diafragma, piezoresistivo (un par por caldera).	1,540	9,240
3	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (uno para cada caldera).	4,540	13,620
3	Válvulas de Control tipo globo (una para cada caldera) de 1/2"	6,040	18,120
<b>SUMA TOTAL DEL SISTEMA</b>		<b>NS 40,980</b>	

**+ CONTROL DE TEMPERATURA DE AIRE DE COMBUSTIÓN:**

Este sistema requiere de la siguiente instrumentación:

Cant.	Descripción:	P.U. en N\$	Costo:
6	Transmisores de Temperatura (un par por caldera)	2,150	12,900
3	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (uno para cada caldera).	4,540	13,620
3	Registros de 2 plumas (entrada de aire y salida de gases)	7,400	22,200
3	Válvulas de Control 1" (una para cada caldera)	6,440	19,320
<b>SUMA TOTAL DEL SISTEMA</b>			<b>N\$ 68,040</b>

**+ CONTROL DE NIVEL, AGUA DE ALIMENTACIÓN Y PURGA:**

Este sistema ocupa el siguiente equipo:

Cant.	Descripción:	P.U. en N\$	Costo:
1	Transmisor de Flujo para Cabezal de Vapor	3,000	3,000
3	Transmisor de Flujo de Agua de Alimentación (uno por cada caldera).	3,000	9,000
3	Transmisor de Nivel de Domo (uno por caldera)	3,920	11,760
3	Transmisor de Flujo para Purga (uno por caldera)	2,570	7,710
9	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (tres por caldera).	4,540	40,860

6	Transductores de corriente a presión (un par por caldera)	1,520	9,120
3	Registros de 3 plumas (nivel y flujos de agua y vapor)	8,560	25,680
6	Totalizadores (dos para agua y dos para vapor por caldera)	7,040	42,240
SUMA TOTAL DEL SISTEMA			<b>NS 149,370</b>

**+ CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR:**

El equipo necesario para este sistema es el siguiente:

Cant.	Descripción:	P.U. en NS	Costo:
6	Transmisores de Temperatura (un par por caldera)	2,150	12,900
3	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (uno por caldera).	4,540	13,620
3	Transductores de corriente a presión (uno por caldera)	1,520	4,560
1	Registrador de 3 plumas (temperatura de vapor a la salida del sobrecalentador, en las tres calderas).	8,560	8,560
SUMA TOTAL DEL SISTEMA			<b>NS 39,640</b>

**+ CONTROL DE PRESIÓN DEL HOGAR:**

Para éste sistema se requiere el siguiente equipo de instrumentación:

Cant.	Descripción:	P.U. en NS	Costo:
3	Transmisor de Presión Diferencial (con la toma de alta presión a la atmósfera, uno por caldera).	3,920	11,760
3	Estaciones de Control Autocontenidas (Controladores) (uno por caldera).	4,540	13,620
3	Transductores de corriente a presión (uno por caldera)	1,520	4,560
<b>SUMA TOTAL DEL SISTEMA</b>		<b>NS 29,880</b>	

### 5.3 MONTO DE LA INVERSIÓN FIJA

Para obtener el monto de la inversión es necesario tomar en cuenta la suma del costo de todos los sistemas de control, agregándoles los costos de su instalación, gastos en tubería, gastos en equipo eléctrico como son cable, conexiones, adaptación de las alimentaciones, tableros, etc. y otros gastos imprevistos. Los porcentajes que se utilizarán en estos conceptos dentro del cálculo de la inversión, están basados en datos biográficos.

Primeramente se sumarán los costos de los sistemas de control:

+ Control de Combustión y Presión de cabezal de Vapor.	NS\$ 289,540
+ Control de Presión de Vapor de Atomización.	NS\$ 40,980
+ Control de Temperatura de Aire de Combustión.	NS\$ 68,040
+ Control de Nivel, Agua de Alimentación y Purga.	NS\$ 149,370
+ Control de Temperatura del Vapor.	NS\$ 39,640
+ Control de Presión del Hogar.	NS\$ 29,880
<b>SUMA TOTAL DEL EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN</b>	<b>NS\$ 617,450</b>

Para calcular el costo de la instalación se tomará un 20% del costo total del equipo a instalar; para conocer el costo de la tubería, se calculará con el 20%; el 15% del costo del equipo será el costo de la instalación eléctrica y el 10% del costo directo (suma del equipo, instalación, tubería y equipo eléctrico), será el gasto en imprevistos.

+ Costo total del Equipo	NS 617,450
+ Instalación (20% del equipo)	NS 123,490
+ Tubería (20% del equipo)	NS 123,490
+ Equipo Eléctrico (15% del equipo)	NS 92,618

**COSTO DIRECTO** NS 957,048

+ Imprevistos (10% del costo directo) NS 95,705

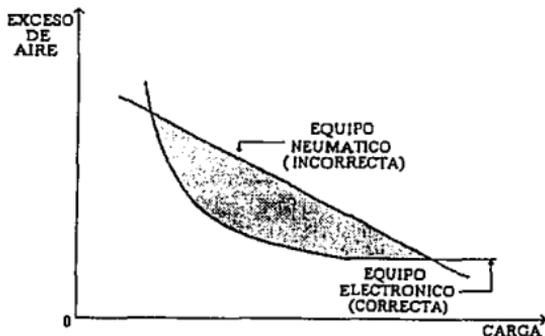
**INVERSIÓN FIJA** NS 1'052,753

+ I. V. A. NS 105,275

**TOTAL** NS 1'158,028

#### 5.4 MONTO DEL AHORRO ENERGÉTICO

En esta parte, se hará un cálculo del combustible que se ahorra al considerar un 3% de reducción en su consumo, ya que el fabricante del equipo de instrumentación asegura obtener un 5% de ahorro en combustible, pero para efectos de cálculo de ahorro energético se considerará un 3%. Se toma un 3% de ahorro en combustible principalmente por que el sistema de control de combustión que se estaba utilizando es neumático, en donde se limita la caracterización de la relación de aire-combustible por ser un sistema antiguo y al no tener una velocidad de respuesta rápida se tienen momentos de despilfarro energético por la inyección inadecuada de combustible sin el exceso de aire correspondiente; esto lleva a grandes cantidades desaprovechadas de combustible por su deficiente combustión.



**FIG. 38 DIFERENCIA EN LA CARACTERIZACIÓN DE RELACIÓN EXCESO DE AIRE EN UN SISTEMA NEUMÁTICO Y UN ELECTRÓNICO**

En la figura 38 (adimensional), se muestra en el área sombreada, el desajuste que se tiene en un sistema neumático en la relación de exceso de aire, debido a su mala caracterización, pues el sistema neumático representa la relación de exceso de aire contra carga en forma lineal, mientras que la función correcta forma una curva. El sistema electrónico es capaz de caracterizar la curva de relación de exceso de aire contra carga, tal como debe ser.

Primeramente se hará el cálculo del consumo de combustóleo según la cantidad de calor que se requiere para obtener vapor a las características de operación de la caldera; estas son: 65 Ton/hr de vapor a una presión de 42.27 Kg/cm<sup>2</sup> y temperatura de 399°C.

**Tipo de combustóleo:**

Combustóleo # 6

Poder calorífico 18,500 BTU/lb

densidad 980 Kg/m<sup>3</sup> y su recíproco: volumen específico (1 / 980) m<sup>3</sup>/Kg.

Su costo: combustóleo: 0.2179 N\$/lt + IVA = 0.23973 N\$/lt

fletes locales: 0.0127 N\$/lt + IVA = 0.01397 N\$/lt

Total: = 0.2537 N\$/lt

**Generación de vapor:**

$$(65 \text{ Ton/hr}) \cdot (1000 \text{ Kg} / 1 \text{ Ton}) \cdot (2.205 \text{ lb} / 1 \text{ Kg}) = \underline{143,325 \text{ lb/hr}}$$

**Presión Absoluta de Vapor:**

$$(42.27 \text{ Kg/cm}^2) \cdot (2.205 \text{ lb} / 1 \text{ Kg}) \cdot [(2.54)^2 \text{ cm}^2 / 1 \text{ pulg.}^2] = 601.32 \text{ psia} \approx \underline{600 \text{ psia}}$$

**Temperatura del vapor sobrecalentado:**

$$[(399^\circ\text{C}) \cdot (9 / 5)] + 32 = 750.2^\circ\text{F} \approx \underline{750^\circ\text{F}}$$

**Entalpía:**

De tablas de vapor sobrecalentado a 600 psias y 750°F:

$$h = \underline{1,380,05 \text{ BTU/lb}}$$

**Calor necesario:**

La energía o calor necesario para obtener vapor a estas condiciones es:

$$E = (\text{Generación de vapor}) * (\text{entalpía del vapor})$$

$$E = (143,325 \text{ lb/hr}) * (1,380.05 \text{ BTU/lb}) = \underline{197,795,666.3 \text{ BTU/hr}}$$

**Flujo de combustible necesario:**

Se obtiene dividiendo el calor necesario entre el poder calorífico del combustible:

$$m_c = (197,795,666.3 \text{ BTU/hr}) / (18,500 \text{ BTU/lb}) = \underline{10,691.65 \text{ lb/hr}}$$

**Flujo de combustible real:**

Si consideramos un 80 % de eficiencia de la caldera, el consumo real de combustible será:

$$m_{c \text{ real}} = (10,691.65 \text{ lb/hr}) / (0.8) = \underline{13,364.57 \text{ lb/hr}}$$

Con la finalidad de pasar de unas unidades a otras:

$$m_{c \text{ real}} = (13,364.57 \text{ lb/hr}) * (1 \text{ Kg} / 2.205 \text{ lb}) = \underline{6,061.03 \text{ Kg/hr}}$$

Multiplcando el flujo de combustible por su volumen específico y convirtiéndolo a decímetros cúbicos (un decímetro cúbico es igual a un litro), tenemos:

$$m_{c \text{ real}} = (6,061.03 \text{ Kg/hr}) * (1 \text{ m}^3 / 980 \text{ Kg}) * [(10)^3 \text{ dm}^3 / 1 \text{ m}^3] = \underline{6,184.72 \text{ lt/hr}}$$

**Flujo de combustible real anualizado:**

$$m_{c \text{ anual}} = (6,184.72 \text{ lt/hr}) * (24 \text{ hr} / 1 \text{ día}) * (30 \text{ día} / 1 \text{ mes}) * (12 \text{ mes} / 1 \text{ año})$$

$$m_{c \text{ anual}} = \underline{53,436,019.6 \text{ lt/año}}$$

**Flujo de combustóleo para dos calderas en operación:**

$$m_{c \text{ total}} = (53'436,019.6 \text{ lt/año}) * (2 \text{ calderas en funcionamiento}) = \underline{106'872,039.2 \text{ lt/año}}$$

**Ahorro de combustóleo:**

Se considera un 3% de ahorro en consumo de combustóleo:

$$\text{Ahorro de comb.} = (106'872,203.9 \text{ lt/año}) * (0.03) = \underline{3'206,161.17 \text{ lt/año}}$$

**Monto del ahorro de combustible anual:**

Si el litro de combustóleo cuesta 0.2537 N\$, entonces:

$$\text{AHORRO} = (3'206,161.17 \text{ lt/año}) * (0.2537 \text{ N\$/lt}) = \underline{\text{N\$ } 813,403.08/\text{año}}$$

### **MONTO ANUAL DEL AHORRO ENERGÉTICO:**

Con un 3 % de reducción en consumo de combustible:

**N\$ 813,403.08/año.**

## 5.5 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.

Analizando los resultados de los dos temas anteriores, podemos obtener un estimado del tiempo que tardaría en recuperarse la inversión de modo sencillo sin que intervengan posibles requerimientos de intereses por manejo de capital y sin considerar todas las ventajas que conlleva el sistema de control electrónico, sino considerando solamente la de mayor importancia que en este caso sería el ahorro en el consumo de combustóleo (un 3%), que a fin de cuentas es lo que beneficia en mayor parte al sistema, tomando en cuenta el precio elevado del combustóleo por cada litro.

El monto de la inversión fija es de: N\$ 1'158,028.30

y

el monto anual del ahorro energético es de: N\$ 813,403.08

Si dividimos estas dos cantidades, obtendremos el tiempo expresado en años que se necesita para que tan sólo el ahorro de combustóleo cubra la totalidad de la inversión.

$$t = (1'158,028.3 \text{ N\$}) / (813,403.08 \text{ N\$/año})$$

$$t = 1.423 \text{ años.}$$

que equivale a:

$$t = 1 \text{ año, 5 meses, 3 días.}$$

Es importante hacer mención, que este tiempo puede ser mayor en cuanto a la forma de efectuar el pago de la inversión, pues posiblemente la industria requiera de un préstamo bancario para poder realizar la compra del equipo de control, lo que afectaría directamente al tiempo de recuperación debido al pago de intereses.

## CONCLUSIONES.

Este trabajo de investigación está enfocado al sistema de generación de vapor de una planta autogeneradora, específicamente a los generadores de vapor, para lo cual se escogió la industria cervecera, ya que cumple con esta característica. Se toman en cuenta algunos de los puntos más importantes que están relacionados con el aumento de la eficiencia, optimización y el ahorro energético en las calderas. Este trabajo hace énfasis en los sistemas de control automático, ya que considero que la mayor parte del alto consumo de energía en dicha planta se debe al sistema de control obsoleto que se tiene en funcionamiento.

Este sistema de control funciona neumáticamente. El equipo es anticuado y no ofrece todas las ventajas que tienen los controladores electrónicos. Al tener en operación un sistema de control neumático viejo se presentan ciertas inconveniencias que se traducen principalmente en grandes cantidades de energía perdida o mal aprovechada debido a la inadecuada relación de aire y combustible que logran mantener. Además del malgasto de energía, éstos sistemas son caros tanto en refacciones como en mantenimiento por el tiempo que tardan en repararlos; trabajan a una velocidad lenta, se produce una operación con grandes márgenes de inestabilidad y su grado de funcionalidad y seguridad disminuye.

Existen varios puntos en los equipos neumáticos que en conjunto causan ineficiencia en la operación de los generadores de vapor; uno de estos puntos es el hecho de que se tiene una mala combustión, causando altos derroches de energía por el mal quemado de combustible, pues no se puede caracterizar en forma óptima la relación de exceso de aire requerido en base a la cantidad de combustible suministrado a la caldera,

proporcionando una cantidad de aire mayor o menor a la que se requiere para facilitar su quemado.

Si el generador de vapor trabaja con carencia de aire de combustión, el combustible no se quema completamente y los gases resultantes serán altamente contaminantes, formándose monóxido de carbono y productos inquemados; el sistema de control como medida correctiva, manda suministrar una cantidad de aire mayor que provoque una combustión más completa, combatiendo el problema de contaminación, pero desaprovechando una gran cantidad de calor en los gases calientes que escapan por la chimenea. Resulta importante pues, caracterizar lo mejor posible la relación aire-combustible, ya que tanto carencia como exceso de aire produce un mal funcionamiento del generador y un alto consumo de energía.

Al tener mala combustión, los gases van ensuciando las partes internas de la caldera en su trayecto y a través del tiempo, se va formando una capa que reduce el coeficiente de transferencia de calor, requiriéndose una mayor cantidad de combustible para mantener la producción de vapor y desperdiciando gran cantidad de gases calientes que salen por la chimenea.

Se propone un sistema de control electrónico completo que elimina gran parte de estas irregularidades en el funcionamiento de las calderas, operando con mayor estabilidad, seguridad, rapidez y eficiencia.

Con el sistema de control de combustión por límites cruzados, la caracterización de aire y combustible se hace más real, obteniéndose una combustión más completa y segura; con la presencia del analizador de oxígeno, que actúa prealimentando al sistema de control, se asegura que las emisiones contaminantes estarán dentro de norma. Con este

sistema, el costo de operación del generador de vapor bajará, se tendrá una combustión más limpia con menor ensuciamiento de las partes internas y los tiempos de operación continua serán mayores, pues los paros por mantenimientos se reducirán. Con este sistema se pueden obtener ahorros hasta del 5% de combustible, según datos del fabricante del equipo.

Con el sistema de control de presión de vapor de atomización, que anteriormente no se tenía, se tendrá mayor estabilidad en la combustión. Aumentará la eficiencia y la protección del generador de vapor al considerar el sistema de control de aire de combustión, pues los gases se mantendrán a una temperatura mayor a la de su punto de rocío y no habrá condensaciones que corroan las partes internas de la caldera; también se tendrá un ahorro de combustible por el calor que ya contiene el aire de combustión que tomó de los gases y que no tendrá que calentarse.

El control de nivel de agua de alimentación es muy similar al que se tenía en operación, pero se maneja con instrumentos electrónicos mucho más precisos y la variable controlada se mantendrá prácticamente sin variación, protegiendo al generador de vapor y a las máquinas alimentadas.

La temperatura del vapor, aparecerá más constante al ser controlada por el sistema electrónico de tres elementos con señal prealimentada del aire de combustión, pues cualquier cambio de carga, se anticipará la señal de aire de combustión para que no exista una variación considerable en la temperatura y no dañe los turbogeneradores.

Al igual que el sistema de temperatura de vapor, el sistema de control de presión del hogar será más exacto, pues tiene la señal de aire de combustión anticipadamente, para mantener el hogar a condiciones apropiadas para la combustión y ayudando a tener un

menor tiro en los gases.

Con los sistemas de control propuestos se tiene una velocidad de respuesta más rápida y como consecuencia menores variaciones de las variables controladas en el proceso, además de producir emisiones contaminantes menos dañinas.

Considerando que aproximadamente un 90% de las industrias manejan vapor como medio de operación, se obtendría un gran ahorro energético al optimizar la generación de vapor en cada industria por muy pequeño que parezca el ahorro para cada una de ellas; resulta importante entonces, revisar los puntos con posible ahorro energético, pues cualquier reducción en su consumo es considerable, tomando en cuenta las grandes cantidades de combustible que normalmente consume cada industria; los recursos energéticos son limitados y se van agotando poco a poco conforme pasa el tiempo. Con una pequeña cantidad de combustible que cada industria ahorre o deje de consumir diariamente, su costo de operación disminuye y grandes cantidades de energía se conservarán para ser consumidas en un futuro.

Dentro de los puntos importantes de ahorro energético, no se debe olvidar tomar en cuenta lo siguiente:

- Efectuar revisiones periódicas de la calidad del combustible, pues no siempre lo surten con el mismo porcentaje de sus componentes y afecta directamente a la calidad de combustión.
  
- Efectuar revisiones periódicas a la relación aire-combustible.
  
- Revisar constantemente nuevas formas de aprovechamiento de los gases calientes.

- Revisar periódicamente los programas de mantenimiento tanto preventivo como correctivo a fin de que sean funcionales y eficientes.
- Efectuar periódicamente pruebas de la calidad de agua de alimentación y hacer los ajustes necesarios en el sistema de tratamiento.
- Revisar periódicamente que los equipos de control estén debidamente calibrados y operando correctamente.

## **BIBLIOGRAFIA**

- MANRIQUE, JOSE A.  
CARDENAS, RAFAEL S.  
"TERMODINAMICA"  
EDITORIAL HARLA.

-VAN WYLEN, GORDON J.  
SONNTAG, RICHARD E.  
"FUNDAMENTOS DE TERMODINAMICA"  
EDITORIAL LIMUSA.

- APUNTES, ESIME  
"GENERADORES DE VAPOR"  
1965.

- APUNTES, UNIVERSIDAD LA SALLE  
"CIRCUITOS DE CONTROL AUTOMATICO"  
1990.

- RECOPIACION DE FOXBORO S.A.  
"ACTUALIZACION SOBRE GENERADORES DE VAPOR Y SUS SISTEMAS DE  
CONTROL"  
1992.

- OGATA, KATSUHIKO  
"INGENIERIA DE CONTROL MODERNA"  
EDITORIAL PRENTICE HALL.

- NACIF NARCHI, JOSE  
"INGENIERIA DE CONTROL AUTOMATICO, INGENIERIA INDUSTRIAL"  
TOMO I  
EDITORIAL COSTA AMIC. EDITORES.

- AGUILAR RODRIGUEZ, MARTINIANO  
"CRITERIOS DE DISEÑO DE PLANTAS TERMoeLECTRICAS"  
EDITORIAL LIMUSA.

- NACIF NARCHI, JOSE  
"CURSO DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO PARA CALDERAS"  
EDITORIAL COSTA AMIC. EDITORES.

**- DOUGLAS M., CONSIDINE Y S. D. ROSS**  
**"MANUAL DE INSTRUMENTACION APLICADA"**  
**TOMO II**  
**EDITORIAL C.E.C.S.A.**

**- E. PULL**  
**"CALDERAS DE VAPOR"**  
**EDITORIAL GUSTAVO GILI, S.A.**

**- NACIF NARCHI, JOSE**  
**"INGENIERIA DE CONTROL AUTOMATICO, INGENIERIA INDUSTRIAL"**  
**TOMO II**  
**EDITORIAL COSTA AMIC. EDITORES.**

**- SEVERNS, DEGLER Y MILES**  
**"LA PRODUCCION DE ENERGIA MEDIANTE EL VAPOR DE AGUA, EL AIRE Y**  
**LOS GASES"**  
**EDITORIAL REVERTE, S.A.**

**- ALVAREZ, PEREZ Y HERRERA**  
**"GENERADORES Y TERMODINAMICA DEL VAPOR DE AGUA"**  
**EDITORIAL DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.**

# ANEXO

## A1

### ACCIONES O MODOS DE CONTROL

Las funciones que realiza un controlador automático es la de comparar el valor medido de la variable controlada con el valor deseado o punto de ajuste y producir una señal de salida hacia el elemento final de control (señal de control) que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. El tratamiento que hace el controlador de la señal de error para producir la señal de control, se denomina acción de control. De acuerdo con su acción de control se pueden clasificar los controles automáticos industriales en:

- 1.- Control de dos posiciones o de sí - no.
- 2.- Controles proporcionales.
- 3.- Controles integrales.
- 4.- Controles proporcionales e integrales.
- 5.- Controles proporcionales y derivativos.
- 6.- Controles proporcionales y derivativos e integrales.

La mayoría de los controles automáticos industriales usan como fuentes de potencia la electricidad o un fluido a presión que puede ser aceite o aire. También se pueden calificar los controles automáticos según el tipo de fuente de energía utilizada en su funcionamiento, en controles neumáticos, hidráulicos o electrónicos. Para conocer que tipo de control se debe utilizar, depende de la naturaleza de la planta y sus condiciones de funcionamiento, inclusive condiciones de seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad,

precisión, peso y tamaño.

Es importante comprender las características básicas de las diversas acciones, para que el ingeniero de control pueda elegir la más adecuada para determinada aplicación.

Acción de dos posiciones o de si-no.- En un controlador con esta acción, el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente conectado y desconectado. Este control es relativamente simple y económico y por esta razón, ampliamente utilizado en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Si la señal de salida de control es  $m(t)$  y la señal de error actuante es  $e(t)$ , en un control de dos posiciones, la señal  $m(t)$  permanece en un valor máximo o mínimo, según que la señal de error actuante sea positiva o negativa, de modo que:

$$\begin{aligned} m(t) &= M_1 && \text{para } e(t) > 0 \\ &= M_2 && \text{para } e(t) < 0 \end{aligned}$$

donde  $M_1$  y  $M_2$  son constantes. Generalmente el valor mínimo  $M_2$  es o bien cero o  $-M_1$ . Los controles de dos posiciones son generalmente dispositivos eléctricos, donde habitualmente hay una válvula accionada por un solenoide eléctrico.

Acción de control proporcional.- En un controlador con acción proporcional, la relación entre la salida del controlador  $m(t)$  y la señal de error actuante  $e(t)$  es:

$$m(t) = K_p e(t)$$

ó, en magnitudes de transformada de Laplace,

$$M(s) / E(s) = K_p$$

donde  $K_p$  se denomina sensibilidad proporcional o ganancia proporcional.

La acción proporcional es básicamente un amplificador con ganancia ajustable. La acción proporcional se utiliza cuando:

- La oscilación de control de dos posiciones es inaceptable.
- Los cambios de carga son pequeños o poco frecuentes.
- La desviación permanente puede ser tolerada.

Acción de control integral.- En un controlador con acción integral el valor de la salida del controlador  $m(t)$  varía proporcionalmente a la señal de error actuante  $e(t)$ , es decir:

$$\begin{aligned} dm(t)/dt &= K_i e(t), \text{ ó} \\ m(t) &= K_i \int_0^t e(t) dt \end{aligned}$$

donde  $K_i$  es la constante ajustable. La función de transferencia del control integral es:

$$M(s) / E(s) = K_i/s$$

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $m(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error actuante igual a cero, el valor de  $m(t)$  se mantiene estacionario. La acción de control integral recibe a veces el nombre de control de reajuste o reposición. Se debe aplicar este tipo de acción cuando la desviación permanente deba ser eliminada y si hay cambios frecuentes y pequeños en el punto de ajuste o en la carga.

Acción proporcional e integral (PI).- Esta acción queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p/T_i \int_0^t e(t) dt$$

o la función de transferencia del control es:

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + (1/T_i s))$$

donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_i$  el tiempo integral. Tanto  $K_p$  como  $T_i$  son ajustables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras una modificación en  $K_p$  afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control; el tiempo integral o de reajuste, está dado en minutos y es el tiempo necesario para que la salida del controlador repita una vez la respuesta inicial proporcional; su inversa se llama frecuencia de reposición o velocidad de reajuste y es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La frecuencia de reposición se mide en términos de repeticiones por minuto.

Acción de control proporcional y derivativo (PD).- Esta acción queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d (de(t)/dt)$$

y la función de transferencia es:

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + T_d s)$$

donde  $K_p$  es la sensibilidad proporcional y  $T_d$  es el tiempo derivativo. Tanto  $K_p$  como  $T_d$  son ajustables. La acción de control derivativa, a veces denominada control de velocidad, es cuando el valor de salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la

señal de error actuante. El tiempo derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional. Generalmente se combina la acción derivativa con la proporcional. La acción derivativa cesa cuando la señal de error permanece constante.

La acción derivativa tiene la ventaja de ser anticipativa, sin embargo, la desventaja de que amplifica las señales de ruido y puede producir efecto de saturación en el actuador del elemento final de control. No se puede tener acción derivativa sola, ya que ésta es efectiva sólo durante periodos transitorios. Se recomienda no usar esta acción si existe ruido, a menos que la amplitud del ruido sea menor que en los cambios de la señal de procesos.

**Acción de control proporcional y derivativo e integral (PID).** - Esta acción está dada por la combinación de las tres acciones y presenta las ventajas de cada una de las acciones individuales. La ecuación que define esta acción de control es:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d (de(t)/dt) + K_p/T_i \int_0^t e(t) dt.$$

o la función de transferencia es:

$$M(s) / E(s) = K_p (1 + T_d s + 1/T_i s)$$

donde  $K_p$  representa la ganancia proporcional,  $T_d$  el tiempo derivativo y  $T_i$  el tiempo integral.

Se utiliza el modo proporcional más integral PI en los sistemas de control propuestos porque no se desea que se amplifique alguna posible señal de ruido, lo que deja fuera de opción a la acción PID que sería la más completa, por su acción derivativa.