



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE UN
GENERADOR DE VAPOR PARA LA INDUSTRIA
PETROQUÍMICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

ARTURO OJEDA CORTÉS.



DIRECTOR DE TESIS:
ING. FRANCISCO JOSÉ RODRÍGUEZ RAMÍREZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DEL 2014

INDICE

I. Introducción.....	8
II. Objetivo.....	9
III. Problema.....	9
1. Calderas.....	11
1.1. Historia de las calderas.....	11
1.2 Principio del funcionamiento de la caldera.....	15
1.2.1 Ciclo de vapor abierto y ciclo de vapor cerrado de Rankine.....	16
1.2.1.1 Ciclo de vapor abierto.....	16
1.2.1.2 Ciclo de vapor cerrado o Rankine.....	19
1.3 Definición y clasificación de las calderas.....	23
1.3.1 Clasificación de las calderas de acuerdo a su aplicación.....	25
1.3.1.1 Sistemas de calderas para calefacción central.....	26
1.3.1.2 Generador de vapor para generación de energía eléctrica.....	27
1.3.1.3 Generación de energía eléctrica por medio de energía nuclear.....	28
1.4 Tipos de calderas.....	29
1.4.1 Calderas tubos de humo (pirotubulares).....	30
1.4.1.1 Caldera económica.....	31
1.4.1.2 Calderas cajas de fuego tipo locomotora.....	31
1.4.1.3 Caldera marina escocesa.....	32
1.4.1.4 Caldera tubular vertical.....	36
1.4.2 Caldera de tubos de agua (acuotubulares).....	38
1.4.2.1 Caldera moderna de tubos curvados.....	39
1.4.2.2 Caldera de combustión mixta (combinada).....	40
1.4.2.3 Caldera central térmica.....	42
1.4.2.4 Caldera de circulación controlada.....	45
1.4.2.5. Caldera de tubos de agua de baterías (serpentín).....	46
1.4.2.6 Componentes de las calderas de tubos de agua grandes.....	47
a) Sobrecalentadores.....	49
b) Economizadores.....	51
c) Recalentadores.....	52
d) Calentadores de aire.....	53
e) Quemador.....	53
2. Requerimientos de las calderas para la industria.....	54

2.1	Diseño de calderas industriales.....	55
2.2	Equipo generador de vapor.....	56
2.2.1	Distribución del vapor.....	58
2.2.2	Válvulas.....	60
2.2.3	Separadores de Vapor.....	61
2.2.4	Recuperación de vapor.....	62
2.2.5	Economizador de agua de alimentación.....	63
2.2.6	Separación vapor-agua.....	64
2.3	Ventajas del uso del vapor.....	65
2.3.1	Tipos de vapor.....	68
2.3.1.1	Vapor saturado.....	68
2.3.1.2	Vapor sobresaturado.....	69
2.3.1.3	Agua supercrítica.....	70
3.	Descripción de la caldera (Caso específico).....	71
3.1	La industria petroquímica.....	71
3.2	Características de la caldera tipo paquete marca Foster Wheeler.....	72
3.3	Equipos auxiliares de la caldera.....	75
3.3.1	Chimenea.....	75
3.3.2	Ductos.....	76
3.3.3	Ventilador de tiro forzado.....	77
3.3.4	Bombas de agua de alimentación.....	78
3.3.5	Calentadores de aire.....	79
3.3.6	Distribución del vapor en el proceso.....	79
3.3.7	Tratamiento de agua de alimentación.....	80
3.3.8	Controles y componentes.....	81
3.3.8.1	Controles de seguridad.....	82
3.3.9	Purga de la caldera.....	83
3.4	Sistema de seguridad (interlocks).....	84
3.4.1	Barrido de disparo.....	85
3.4.1.1	Permisivos.....	85
3.4.2	Disparo de caldera.....	85
3.4.2.1	Permisivos.....	85
3.4.3	Ignitor.....	86
3.4.3.1	Permisivo de encendido.....	86

3.4.3.2 Apagado del ignitor.	86
3.4.4 Quemador.	86
3.4.4.1 Permisivo de encendido.	86
3.4.4.2 Apagado del quemador.	87
4.- Variables de proceso y su medición.	88
4.1 Variables de proceso de una caldera.	88
4.2. Variables de combustible.	90
4.2.1. Variables por controlar.	92
4.2.2 Temperatura del combustible.	93
4.2.3 Flujo del combustible.	94
4.3 Variables de agua de alimentación.	94
4.3.1 Variables por controlar.	96
4.4 Variables de vapor.	97
5. Esquema de control.	98
5.1 Conceptos básicos de control.	99
5.1.1 Controladores.	101
5.1.2 Esquemas de control.	103
5.1.3 Control de lazo cerrado realimentado (Feedback).	104
5.1.4 Control en lazo abierto (open loop).	106
5.1.5 Control realimentado.	108
5.2 Simbología de control.	110
5.2.1 Diagrama de flujo de instrumentos.	111
5.2.2 Etiquetas o identificación del instrumento con norma ISA.	111
5.2.3.1 Líneas de interconexión (señales).	113
5.3 Sistemas de control de la caldera.	114
5.3.1 Sistema de control de combustible y aire.	114
5.3.1.1 Sistema de control serie (cascada).	117
5.3.1.2 Sistema de control paralelo (override).	119
5.3.1.3. Sistema de control de límites cruzados (split range).	122
5.3.2 Control de agua de alimentación.	124
5.3.2.1 Nivel de agua de alimentación dentro del domo.	125
5.3.2.2 Control del nivel del agua de alimentación.	129
5.3.2.3 Disminución y aumento de agua y vapor en el interior de la caldera.	129
5.3.2.4 Sistema de control de nivel de un elemento.	131

5.3.2.5 Esquema de control de nivel con dos elementos.....	132
5.3.2.6. Sistema de control de nivel de tres elementos.....	133
5.3.2.7 Configuración del sistema de control del nivel del domo.	135
5.3.3 Sistema de control de la temperatura del vapor.	135
5.3.3.1. Sistema de control con un solo elemento.	136
5.3.3.2 Sistema de control con dos elementos.	136
5.3.3.3 Sistema de control con tres elementos.	137
5.3.4 Sistema general del quemador.	139
5.3.4.1 Detección de llama.	140
5.3.4.2 Requerimiento de independencia del control (Hardware y Software).	140
5.3.4.3 Control de purga.	142
5.4. Sistema de encendido y protección.	142
5.4.1 Sistema de control de encendido.	143
5.4.1.1 Control Manual.....	143
5.4.1.2 Control manual con Sistema de Comprobación de Flama.	143
5.4.1.3 Control Remoto de Secuencia Manual (Manual-Supervisado).	144
5.4.1.4 Control Automático de Secuencias.	144
5.4.1.5 Control y Operación de Quemadores sin Supervisión del Operador.	144
5.4.2. Detección de flama.	145
5.4.2.1 Detección Ultravioleta.	145
5.4.2.2 Detección Infrarroja.....	145
5.5 Propuesta de control para caldera.....	146
5.5.1 Sistema de control implementado para la caldera.	146
5.5.2 Tipo de Detector para el Quemador de la caldera.	146
5.5.3 Sistema de control del nivel del domo o de agua de alimentación.	146
5.5.4 Sistema de control de temperatura del vapor.	147
5.5.5 Sistema de control de combustión.	147
5.5.5.1 Sistema de control (maestro) de la presión de vapor.....	148
5.5.5.2 Sistema de control del flujo de aire de combustión.....	148
5.5.5.3 Sistema de control de flujo de gas combustible.	149
5.5.6 Diagrama general del control de la caldera.....	149
6. Instrumentación.	150
6.1 Clasificación de los instrumentos.	150
6.1.1 Instrumentos por su función.	150

6.1.1.1	Trasmisores.	151
6.1.1.2	Indicadores locales.	151
6.1.1.3	Interruptores.	151
6.1.1.4	Convertidores.	151
6.1.1.5	Elementos finales de control.	152
6.1.2	Instrumentos por variable de procesos.	152
6.1.2.1	Instrumentos locales de presión.	152
6.1.2.2	Interruptores de presión.	153
6.1.2.3	Trasmisores de presión.	153
6.1.3	Instrumentos de Flujo	153
6.1.3.1	Medidores Deprimógenos.	153
6.1.3.2	Instrumentos de área variable.	154
6.1.4	Instrumentos de temperatura.	154
6.1.4.1	Termistores.	154
6.1.4.2	Termopares.	155
6.1.5	Instrumentos de nivel.	156
6.1.5.1	Columna de nivel.	156
6.1.5.2	Switch de flotador.	156
6.1.5.3	Servodispositivo de nivel.	156
6.1.6	Válvulas reguladoras.	156
6.2	Selección de instrumentos.	157
6.2.1	Instrumentos para el suministro y control del agua de alimentación.	157
6.2.2	Instrumentos para el suministro y control del gas combustible.	158
6.2.3	Instrumentos para el suministro y control del aire.	160
6.2.4	Instrumentos para el control de la flama.	160
6.2.5	Instrumentos para el control del vapor.	161
6.2.6	Instrumentos para el control del nivel de agua del domo.	161
6.2.7	Instrumentos para el control de temperatura y presión de la salida del economizador.	162
6.2.8	Instrumentación para la temperatura y presión de gases a la salida de la caldera.	163
6.2.9	Instrumentos para el agua de atemperación.	164
6.2.10	Instrumentos para el control del cabezal principal.	165
7	Criterios para la implementación de la propuesta.	166
7.1	Confiabilidad en los sistemas de control propuestos.	166
7.1.1	Sistema de control para la alimentación de agua a la caldera.	167

7.1.1.1 Sistema de control de nivel de domo.	167
7.1.2 Sistema de control para la alimentación combustible y aire.	168
7.1.2.1 Sistema de control maestro de presión del vapor.	169
7.1.2.2 Sistema de control de flujo de aire de combustión.	169
7.1.2.3 Sistema de control de flujo de gas combustible.	170
7.1.2.4 Sistema de control de la temperatura del vapor.	170
7.1.2.5 Sistema de control de gases.	171
7.1.2.6 Sistema de control del cabezal gas quemador.	171
7.2 Justificación de instrumentos seleccionados.	176
IV. Conclusiones.	177
V. Índice de figuras, gráficas y tablas.	179
Figuras.	179
Gráficas.	181
Tablas.	181
VI. Bibliografía.	182
VI. Artículos.	182

I. Introducción.

En México, la tercera parte de la energía utilizada a nivel nacional, es consumida por la industria y de esta, cerca del 70 % proviene de combustibles fósiles, distribuidos de la forma siguiente: el gas como principal recurso (50%), seguido por el combustóleo (21%) y el coque (11%). Este requerimiento energético demandado por la industria lo conforman principalmente los sistemas de combustión directa, como los calentadores a fuego directo y calderas, donde estas últimas se utilizan para la generación de vapor, el cual se requiere para suministrar trabajo mecánico y calor a los procesos.

El vapor de agua es un servicio común en la industria, que se utiliza para proporcionar energía térmica a los procesos de transformación de materiales en productos, generación de energía eléctrica, limpieza de equipos, entre otros, por lo que la eficiencia del sistema para generarlo, la seguridad del equipo, la seguridad del personal, la distribución adecuada y el control de su consumo, tendrá un gran impacto en la eficiencia de la planta. Esta situación se refleja en los costos de la producción del vapor y, en consecuencia, en la competitividad y sustentabilidad de la empresa.

El costo de la producción del vapor, está relacionado con el control y la seguridad del equipo generador, debido a que hoy en día el gran impacto que tiene el cuidado del medio ambiente como la protección al personal, está creando conciencia de mejorar la eficiencia del equipo como la de reducir el costo de mantenimiento y los paros ocasionados por un mal manejo.

Para poder contar con una caldera altamente productiva y de bajo riesgo operativo, se han creado sociedades internacionales de control que han desarrollado mecanismos eficientes y con un impacto mundial muy alto, debido a su efectividad en los procesos. México ha adoptado estos sistemas de control para garantizar que todas las calderas utilizadas en la industria cuenten con estos sistemas para proteger a los operadores, al proceso, a la industria y al medio ambiente.

A la par del control, la instrumentación industrial ha crecido y ha aumentado sus desarrollos tecnológicos para poder sustentar las exigencias de la industria, ya que como se ha mencionado, la calidad de los procesos y el aumento en la realización de estos,

requieren de una producción óptima y segura, que sea capaz de reducir los costos y proporcionar una excelente calidad de los productos.

Controlar de forma efectiva las condiciones de operación de una caldera ya es una necesidad obvia si se toma en cuenta que las elevadas temperaturas y la alta presión que maneja son los principales problemas de una posible explosión. También se debe considerar el aspecto económico de su construcción, su instalación, mantenimiento y el ahorro de combustible.

II. Objetivo

Presentar la metodología y procedimientos para controlar e instrumentar una caldera de vapor, cubriendo los siguientes objetivos:

1. Determinar las variables de control más importantes de una caldera.
2. Conocer los mecanismos que intervienen en el control de una caldera.
3. Dar a conocer el tipo de control utilizado para el agua de alimentación, combustible y vapor con el cual se pueda asegurar el funcionamiento constante de la caldera y el suministro del vapor a proceso.
4. Conocer los tipos de instrumentos utilizados en la instrumentación de la caldera.
5. Implementar una propuesta para controlar la caldera en su arranque y paro de la misma.

III. Problema.

El uso constante del vapor en la industria alimenticia, farmacéutica, metalúrgica, química, petrolera, etc., hoy en día es un producto de vital importancia ya sea utilizada como materia prima o como producto para eliminar bacterias en procesos, lo cual su generación debe ser constante y de calidad, para lo cual se debe tener controlado todos los elementos que intervienen en el proceso de generación, agua de alimentación, alimentación de gas combustible, alimentación de aire y entrega de vapor a proceso, con la ayuda de un sistema de control e instrumentos de control, que ayudado de la experiencia del personal se puede obtener los mejores resultados del proceso.

Dicho control ayudaría a invertir menos horas hombre en el manejo de la caldera, realizar un paro oportuno de la caldera en caso de falla, reducir los gases contaminantes al medio ambiente, reducir el consumo de gas combustible teniendo una mejor combustión y proporcionar un vapor de calidad.

1. Calderas

La palabra Caldera viene del latín *Caldaria* (caliente). Recipiente metálico y cerrado dotado de una fuente de calor donde se calienta o hace hervir agua para convertirla en vapor.

1.1. Historia de las calderas.

A lo largo de la historia, la humanidad ha llegado más allá de lo aceptable para perseguir un reto obteniendo importantes logros y el desarrollo de nuevas tecnologías. Este proceso es a la vez científico y creativo. Todas las civilizaciones, organizaciones y más notablemente, las personas, han tenido éxito por el simple hecho de hacer lo que nunca se ha hecho antes. Un buen ejemplo es el uso eficiente del vapor. Una de las series más importantes de la realización de eventos en el mundo de hoy fue la revolución industrial que comenzó en el siglo XVII. El deseo de generar vapor en la revolución desencadenó una demanda y los avances técnicos permitieron continuar con dicha generación. Sin estos avances, la revolución industrial como la conocemos no habría tenido lugar.

En el año 200 antes de Cristo, un griego llamado Herón de Alejandría, diseñó una máquina simple que utilizó el vapor como fuente de energía, como se muestra en la figura 1.1. Comenzó con un caldero de agua, colocado sobre fuego abierto. A medida que el fuego calentaba el caldero, éste transfería calor al agua. Cuando el agua llegaba al punto de ebullición de 373 K^1 (100 C), en forma modificada se convertía en vapor. El vapor pasa a través de una tubería a una esfera hueca que gira a ambos lados. Mientras el vapor se escapa a través de dos tubos conectados a la esfera, cada uno se inclina a cierto ángulo y la esfera se mueva girando sobre su propio eje.

¹ De aquí en adelante se utilizará el Sistema Internacional de Unidades y se pondrá su equivalente para mayor comprensión de las unidades en uso.



Figura 1. 1 Máquina de vapor de Herón de Alejandría.

Herón de Alejandría, matemático y científico, lo nombró “dispositivo Eolípila”, lo que significa “máquina rotatoria de vapor”. Aunque la invención fue solo una novedad, Herón no hizo ninguna sugerencia para su uso, pero la idea de generar vapor para realizar trabajo había nacido. Incluso, hoy en día, la base sigue siendo la misma, “transferir calor al agua y producir vapor”.

Íntimamente relacionado con la generación de vapor es la turbina de vapor, un dispositivo que cambia la energía térmica del vapor en trabajo mecánico. A principios del año de 1600, un italiano llamado Giovanni Branca realizó una invención única. El principio es producir vapor, sobre la base de Herón, el dispositivo Eolípila. Al alcanzar el vapor a una rueda que gira, la presión del vapor origina que la rueda gire. Así comenzó el desarrollo de la turbina de vapor, la cual estaba ligada con la caldera la cual es la productora del vapor sobrecalentada a alta presión.

Los aparatos motores de vapor están habitualmente constituidos por una o varias plantas generadoras de vapor, también llamadas calderas. La máquina de vapor estuvo desde sus inicios definida por los principios de Watt (1769) y tuvo una evolución lenta a causa de la propia evolución de las calderas, la cual duró algo más de un siglo. Como ejemplo tenemos la máquina inventada por Kirk que entró en servicio hasta 1881 cuando había sido inventada hacia 1874. Esto fue a causa de no encontrar calderas capaces de proporcionar vapor a la presión necesaria para su funcionamiento. Las primeras calderas fueron de forma semiesférica y proporcionaban presiones de no más de 50.566 kPa (7.348 psi).

Hacia 1828 el francés Seguin ideó la caldera de tubos de llama, en la que desde una cámara de combustión de techo cilíndrico las llamas pasan a través de unos tubos introducidos en un cilindro cerrado por los extremos y que desemboca en una caja de humos que da a la chimenea, como se muestra en la figura 1.2

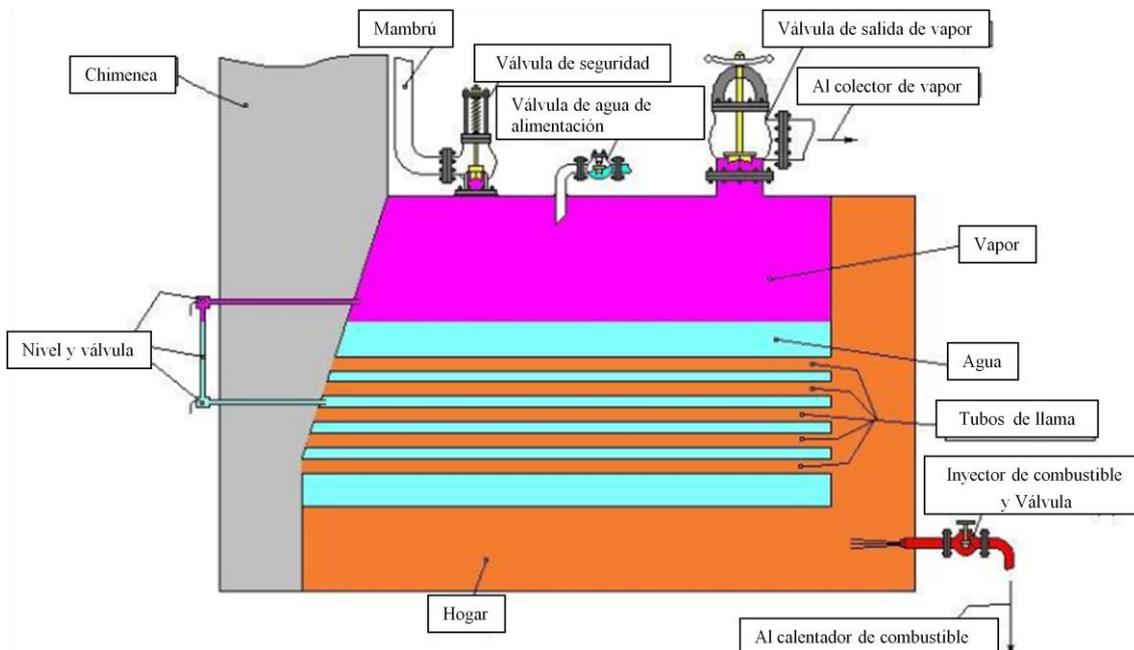


Figura 1. 2 Caldera de tubos de llama.

El siguiente paso fue la caldera de tubos de retorno de llamas, en la que las llamas y los productos de la combustión recorren la parte baja de la caldera, como se muestra en la figura 1.3, y suben por una caja de fuego situada en la parte posterior de la caldera y desde allí atraviesan el cilindro por unos tubos de llama volviendo a la parte frontal donde se encuentra la chimenea. Este tipo de calderas de paredes planas fueron usadas hasta finales del siglo XIX y proporcionaban presiones menores a 253.31 kPa (36.74 psi) llegando a aumentarse las presiones en calderas cilíndricas hasta 911.93 kPa (132.26 psi)

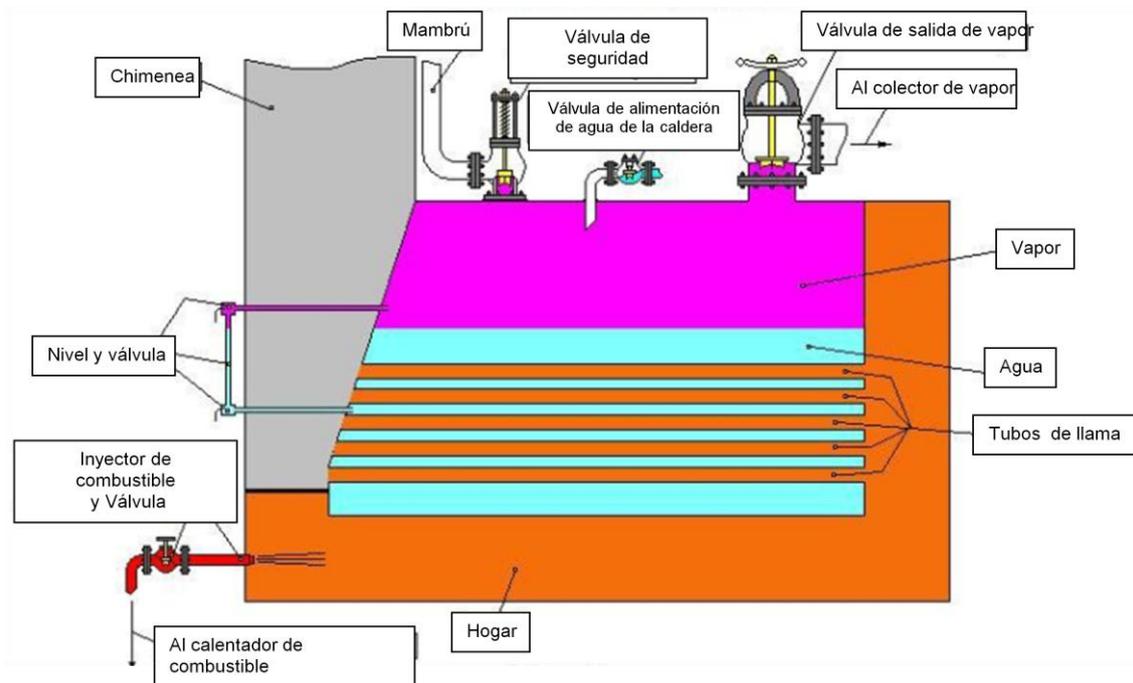


Figura 1. 3 Caldera de tubos de retorno de llama.

Pero la verdadera evolución de las calderas comenzó con la creación de las calderas de tubos de agua creada por Stevens hacia 1804, que empezaron a ser usadas hasta mediados del siglo XIX en los grandes buques de guerra y que además proporcionaban en un primer momento, presiones del orden de 1418.6 kPa (205.74 psi) llegando posteriormente a 2127.8 kPa (308.61 psi). Llamadas tubulares por estar constituidas principalmente por tubos y divididas en dos tipos: calderas de circulación limitada con una serie de serpentines unidos interiormente a un colector de alimentación y por la parte superior a un colector de vapor y; calderas de circulación libre que se caracterizan por colectores verticales o con una ligera inclinación que se comunican entre sí por unos colectores colocados horizontalmente o con una inclinación correspondiente, según el caso, que reciben el calor directamente de los productos de combustión.

Las primeras calderas con tubos de agua, denominadas triangulares, a causa de su aspecto, fueron las inglesas Yarrow y Thornycroft, la francesa Normand y la alemana Schultz.

El progreso decisivo de la evolución de las calderas fue la combustión, con productos derivados del petróleo, que suprimió el aspecto caótico e infernal de las salas de

calderas de carbón con el penoso trabajo de los fogoneros. Posteriormente se paso del tiro natural proporcionado por chimeneas muy largas al tiro forzado obtenido por medio de un soplo de vapor hacia la salida superior de la chimenea, por medio de aire inyectado en los ceniceros.

Las calderas de tubos de agua siguieron evolucionando para conseguir vapor recalentado, es decir a temperaturas superiores a la de saturación, para conseguir presiones superiores, siendo instaladas en las unidades de la marina de guerra. Evolucionaron en la Yarrow, sacando modelo de combustión lateral y la Wanger de dos colectores que alcanzaban las 5876.9 kPa (852.37 psi) y 723 K (450 C). Posteriormente salieron al mercado calderas de vapor con presiones por encima de las 6079.5 kPa (881.76 psi) y una temperatura de unos 783 K (510 C).

1.2 Principio del funcionamiento de la caldera.

El uso del agua y el vapor para proporcionar la fuerza motriz tiene una larga historia. En el siglo primero antes de Cristo, Herón de Alejandría, demostró que el vapor que salía, a través de unos tubos de estrecha abertura, conectado a un recipiente lleno de agua caliente, hacían girar un vaso (recipiente cerrado), pero en esta máquina simple (eolípila), el vapor al abandonar el recipiente se perdía y no se podía realizar una operación continua del proceso por lo que se requería sustituir continuamente el agua. No fue sino hasta 1824 que un ingeniero francés, Sadi Carnot, que propuso una forma de resolver este problema. Usó un ciclo, cuando el medio de transferencia es parte de un circuito cerrado y el medio es devuelto a su punto de partida después que ha realizado el trabajo que de él se requiere.

Carnot utilizó una de las dos leyes de la termodinámica. La primera, la ley de Joule, había relacionado la energía mecánica para el trabajo: La ley de Carnot define la relación de temperatura aplicable a la conversión de la energía térmica en energía mecánica. Vio que si este proceso iba a ser reversible, el calor podía convertirse en trabajo y su posterior extracción y reutilización podía realizar el circuito cerrado. Para demostrar su concepto, un pistón se mueve libremente dentro de un cilindro perfecto. El pistón es impulsado por un fluido, generando un trabajo. El cilindro contiene una cabeza en uno de sus extremos que puede cambiar a voluntad, de ser un conductor perfecto o ser un aislante perfecto.

Los principios de Carnot son:

- La eficiencia de una máquina térmica irreversible es siempre menor que la eficiencia de una reversible operando entre los mismos dos reservorios.
- La eficiencia de todas las máquinas térmicas reversibles operando entre los mismos dos reservorios es la misma.

1.2.1 Ciclo de vapor abierto y ciclo de vapor cerrado de Rankine.

Los ciclos de vapor los podemos dividir entre ciclos de vapor abiertos y ciclos de vapor cerrados.

1.2.1.1 Ciclo de vapor abierto.

Este es el primer ciclo de vapor a utilizarse en forma amplia. Corresponde a las típicas máquinas de vapor de ciclo abierto (locomotoras, locomóviles y muchas máquinas estacionarias en los inicios de la revolución industrial).

El ciclo opera de la siguiente manera:

Un depósito contiene agua para la caldera (1). La bomba toma el agua del depósito y la inyecta en la caldera (2), aumentando su presión desde la presión atmosférica hasta la presión de la caldera.

En la caldera (donde se le entrega el calor Q), el agua ebulle, formando vapor. El vapor se extrae de la caldera en la parte superior (3). Por gravedad solo tiende a salir vapor saturado, por lo tanto sale de la caldera. Luego el vapor (a presión) es conducido al motor donde se expande, produciendo el trabajo W , como se muestra en la figura 1.4.

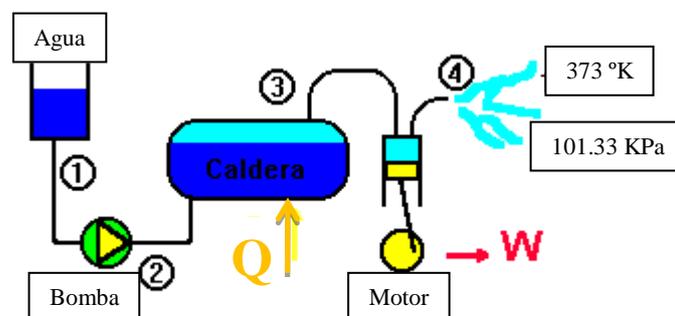


Figura 1. 4 Ciclo de vapor abierto.

El motor descarga el vapor utilizado al ambiente que está a 101.33 kPA (1 atm). Por lo tanto el vapor se condensa a 373 K (100 C).

En diagrama P-V, el ciclo se describe como sigue (los puntos termodinámicos están indicados con pequeñas cruces, cerca del número correspondiente): En (1) el agua del depósito es líquido subsaturado. La bomba aumenta su presión hasta el estado (2). Como lo que se comprime es solo líquido, el volumen de (2) es ligeramente menor al de (1). Luego esta agua se inyecta en la caldera. Allí alcanza primero el estado de saturación (intersección de línea 2-3 con campanas de cambio de fase) y luego comienza la ebullición dentro de la caldera. El vapor sale de la caldera en el estado (3), como vapor saturado. Luego se expande en la máquina (motor) generando trabajo y es expulsado a la atmósfera, como se muestra en la figura 1.5.

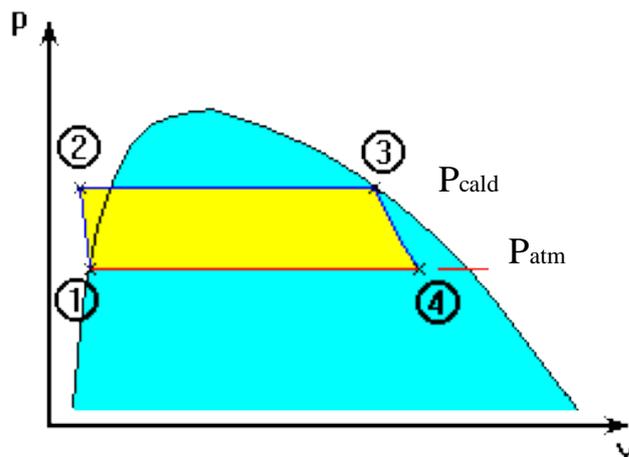


Figura 1. 5 Diagrama P-V de ciclo de vapor abierto.

Por lo tanto, la máquina opera entre la presión P_{cald} y P_{atm} , las que tienen asociadas la temperatura de ebullición del vapor de la caldera y la temperatura de condensación del agua en la atmósfera de 373 °K (100 °C).

En diagrama T-S el ciclo abierto se describe como sigue: El agua está inicialmente a T_{amb} y en estado líquido (1), luego la bomba la comprime hasta el estado (2). En teoría esta compresión es isentrópico², en teoría la entropía aumenta un poco. En todo caso, los estados (1) y (2) están muy cercas (la temperatura apenas sube). Al inyectar el agua

² Isentrópica: Es un proceso en el cual la entropía del sistema permanece constante, no existe cambio de calor en el sistema.

a presión a la caldera, la entropía aumenta fuertemente, pues este es un proceso irreversible. Luego comienza la ebullición del agua en la caldera (desde la intersección con la campana de cambio de fase hasta el estado 3). En (3) el vapor se expande en el motor, generando el trabajo W . El vapor descarga en el estado (4), el que corresponde a la presión ambiente y temperatura de 373 K (100 C). Luego este vapor condensa en la atmósfera a 373 K (100 C) y luego se sigue enfriando hasta el estado inicial, como se muestra en la figura 1.6.

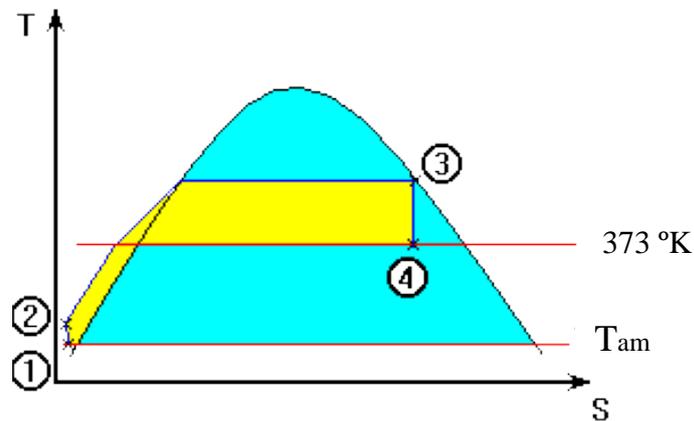


Figura 1. 6 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto.

Para efectos de comparación, el diagrama anterior se inscribe en su ciclo de Carnot correspondiente (las dos isotérmicas y dos isentrópicas que lo inscriben), como se muestra en la Figura 1.7.

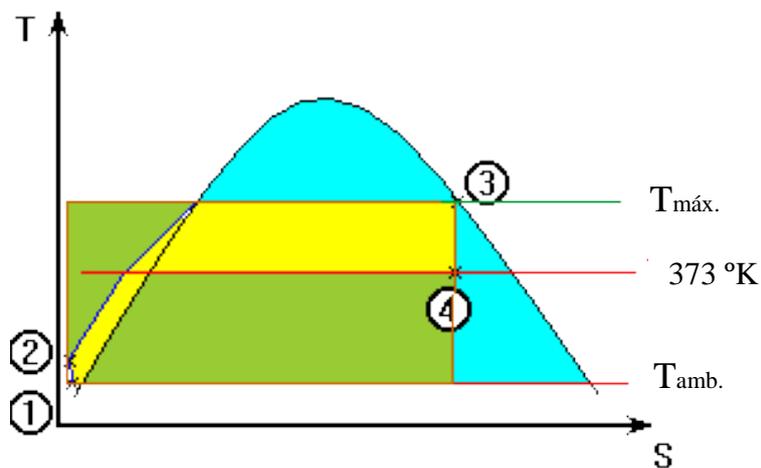


Figura 1. 7 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto, incluyendo ciclo de Carnot.

Este ciclo tiene como temperatura inferior (de fuente fría) la temperatura ambiente y como superior (de fuente caliente) la de la caldera ($T_{m\acute{a}x}$). Las áreas en verde indican la pérdida que hay con respecto al potencial, la cual es muy elevada.

Es por esto que los ciclos abiertos fueron rápidamente reemplazados con ciclos con condensador (o ciclo Rankine), pues el rendimiento es muy superior. Se limitaron a máquinas móviles (locomotoras) donde no es práctico instalar un condensador. Incluso en los barcos a vapor se tenían condensador, pues el agua de mar era excelente medio para enfriarlo.

1.2.1.2 Ciclo de vapor cerrado o Rankine.

El ciclo Rankine es conceptualmente muy parecido al ciclo de vapor abierto. La diferencia es que se introduce el condensador. Este tiene por efecto bajar la temperatura de fuente fría y mejorar la eficiencia del ciclo. El efecto es doble:

- Desde el punto de vista termodinámico, bajamos la temperatura de la fuente fría, mejorando por lo tanto la eficiencia del ciclo.
- Desde el punto de vista mecánico, la presión en el condensador es muy inferior a la atmosférica lo que hace que la máquina opere con un salto de presiones mayor, lo que aumenta la calidad de trabajo recuperable por unidad de masa de vapor.

Por lo tanto, la principal diferencia entre un ciclo de vapor abierto y uno de Rankine es el condensador.

El ciclo de vapor cerrado (Rankine) se describe como sigue:

Es un ciclo muy empleado en máquinas simples y cuando la temperatura de la fuente caliente está limitada. Es mucho más práctico que el ciclo de Carnot con gas, pues la capacidad de transporte de energía de vapor con cambio de fase es mucho más grande que en un gas.

La bomba recolecta condensado a baja presión y temperatura. Típicamente una presión menor a la atmosférica, estado (3) y comprime el agua hasta la presión de la caldera (4). Este condensado a menor temperatura de la temperatura de saturación en la caldera, es

inyectada a la caldera. En la caldera primero se calienta, alcanzando la saturación y luego se inicia la ebullición del líquido. En (1) se extrae el vapor de la caldera y luego se conduce el vapor al expansor, el cual será una turbina. Allí se expande, recuperando trabajo, en la turbina, hasta la presión asociada a la temperatura de condensación (2). El vapor que descarga la máquina entra al condensador donde se convierte en agua al entrar en contacto con las paredes de tubos que están refrigerados en su interior (típicamente por agua). El condensado se recolecta en el fondeo del condensador, donde se extrae (3) prácticamente como líquido saturado, como se muestra en la figura 1.8.

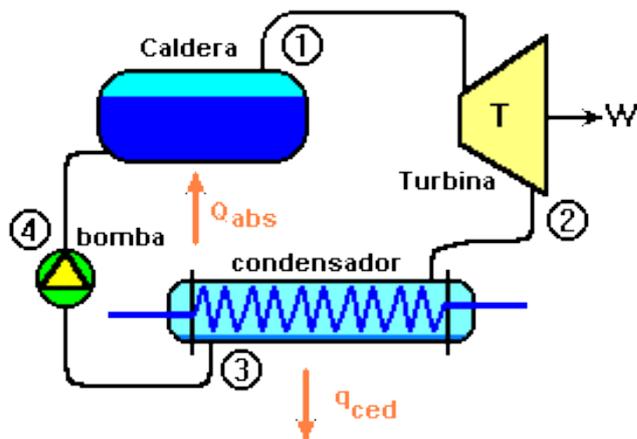


Figura 1. 8 Ciclo de vapor cerrado o Rankine.

Allí la bomba comprime el condensado y se repite el ciclo.

En diagrama P-V, el ciclo se describe como sigue: En (1), la caldera entrega vapor saturado el que se transporta a la turbina. Allí el vapor se expande entre la presión de la caldera y la presión del condensado, produciendo el trabajo W. La turbina descarga el vapor en el estado (2), el vapor es admitido al condensado. Aquí se condensa a presión y temperatura constante, pasos (2)-(3), y del condensador se extrae líquido condensado, en el estado (3). Luego la bomba aumenta la presión del condensado de P_{cond} a P_{cald} , pasos (3)-(4) y reenvía el condensado a la caldera, como se muestra en la figura 1. 9.

Por lo tanto la máquina opera entre la presión P_{cald} y P_{cond} , las que tienen asociadas la temperatura de ebullición del vapor de la caldera y la temperatura de condensación del agua en el condensador. Esta última presión es inferior a la presión atmosférica.

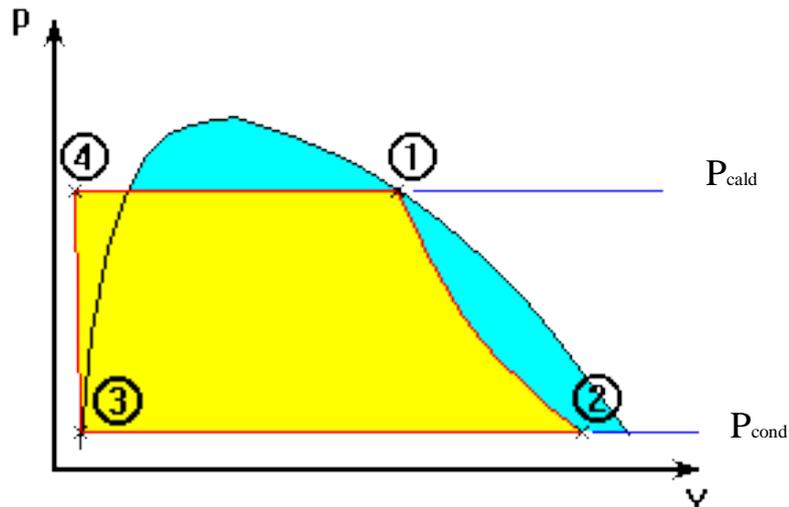


Figura 1. 9 Diagrama P-V de ciclo de vapor cerrado o Rankine.

En diagrama T-S del ciclo de Rankine se describe como sigue: El vapor está inicialmente como vapor saturado (1), luego el vapor se expande en la turbina, generando trabajo, pasos (1)-(2). Este paso se pueden suponer adiabático³. Si además se supone sin roce, se asimilará a una isentropía. Si hubiera roce, la entropía aumentaría. A la salida de la turbina el vapor, como se muestra en la figura 1.10.

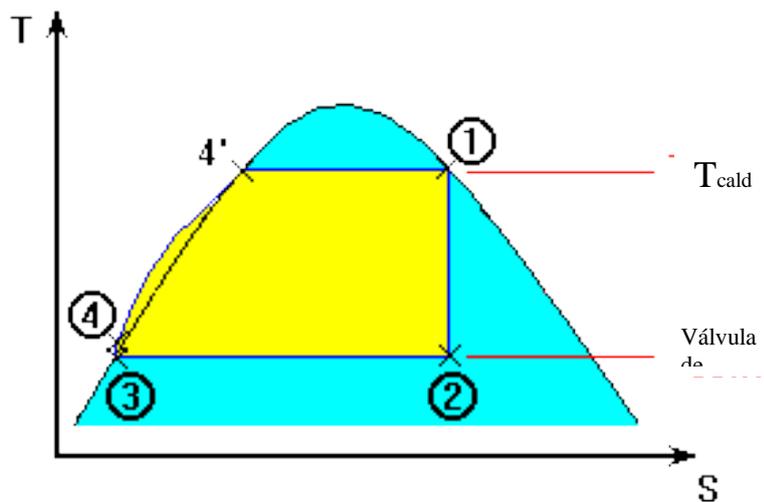


Figura 1. 10 Diagrama T-S ciclo de vapor cerrado o Rankine.

El vapor que descarga la turbina es admitido en el condensador, donde condensa totalmente a temperatura y presión constante, pasos (2)-(3). Sale del condensador en el estado (3) como líquido saturado. Ahora el condensado es comprimido por la bomba,

³ Adiabático: Es un proceso en el cual el sistema no intercambia calor con sus entorno.

pasos (3)-(4), aumenta su presión a la presión de la caldera. Si bien la presión aumenta de forma significativa, la temperatura casi no aumenta. Idealmente esta compresión también es adiabática e isentrópica, aunque realmente la entropía⁴ también aumenta.

En el estado (4) el líquido está como líquido sobresaturado. Este se inyecta a la caldera, con un importante aumento de temperatura y entropía, hasta alcanzar la saturación. Allí comienza la ebullición. Todo el proceso de (4)-(1) ocurre dentro de la caldera. El punto (4') es cuando alcanza la saturación pero únicamente es de manera ilustrativa.

Comparando el ciclo Rankine con el ciclo de Carnot tenemos que: El ciclo de Rankine tendrá como temperatura inferior (de fuente fría) la temperatura del condensador (ligeramente superior a la temperatura ambiente) y como superior (de la fuente caliente) la de la caldera ($T_{máx}$). En este caso vemos que la principal irreversibilidad termodinámica ocurre por la inyección de agua por debajo de la saturación a la caldera.

El ciclo Carnot correspondiente a este ciclo de Rankine, como se muestra en la figura 1.11. Podemos ver que el ciclo Rankine se aproxima mucho al ciclo de Carnot. Solamente se pierde el área fuera de la campana (4)-(4'). Esto corresponde a la irreversibilidad de inyectar y mezclar agua fría con el agua caliente de la caldera.

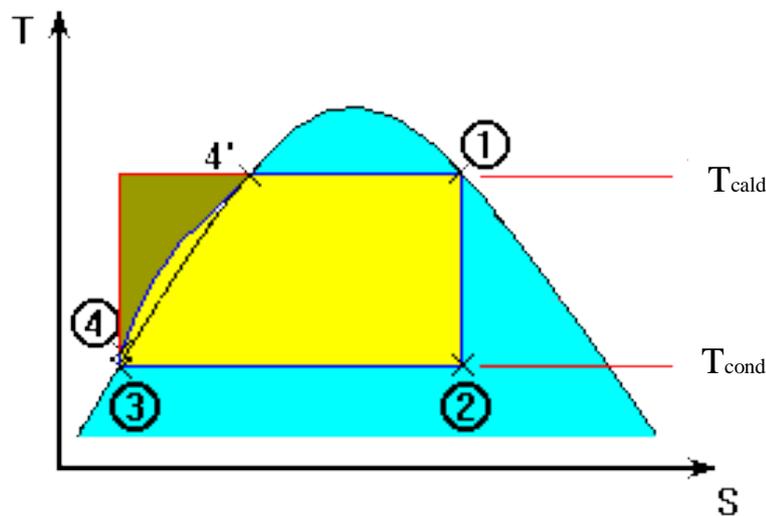


Figura 1. 11 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto, incluyendo ciclo de Carnot.

⁴ Entropía: Es la parte de la energía que no puede utilizarse para generar trabajo.

Esto hace que el ciclo de Rankine se acerca mucho al ciclo de Carnot teórico. Por lo tanto es un ciclo muy conveniente desde el punto de vista termodinámico.

De la comparación de estos dos ciclos (ciclo de vapor abierto y ciclo de vapor cerrado o Rankine), es evidente que es más conveniente utilizar siempre que sea posible el ciclo de vapor cerrado.

1.3 Definición y clasificación de las calderas.

CALDERA: Una *caldera* es un recipiente a presión cerrado, en el que se calienta un fluido para uso externo del mismo por aplicación directa de calor resultante de la combustión de un combustible (sólido, líquido o gaseoso) o por la utilización de la energía nuclear o eléctrica.

Los tipos de calderas se deben al uso para el cual se van a emplear, a sus diferentes presiones y temperaturas, con grandes variaciones de carga y distintos sistemas de combustión. Los diseñadores y fabricantes aplican los principios de transferencia térmica al diseño de sistemas de calderas, pero deben tener también amplia formación técnica en mecánica de fluidos, metalurgia, resistencia de materiales, quemadores, controles y dispositivos de seguridad para el sistema de calderas y todo ello según las estipulaciones y requerimientos normativos y códigos oficiales aplicados.

- Una *caldera de alta presión* es aquella que genera vapor a una presión mayor que 102.97 kPa (15 psi). Por debajo de esta presión se clasifican como *calderas de vapor de baja presión*.
- Una *caldera de potencia*, es una caldera de vapor de agua o de fluido que trabaja por encima de los 102.97 kPa (15 psi), y excede el tamaño de una caldera miniatura. Esto también incluye el calentamiento de agua caliente o calderas de agua caliente que funcionan por encima de 1103 kPa (160 psi). Las calderas de potencia también se llaman *calderas de alta presión*.
- Una *caldera de calefacción por agua caliente*, es una caldera que no genera vapor, pero en la cual el agua caliente circula con propósitos de calefacción y

después retorna a la caldera y trabaja a presiones que no exceden de 1103 KPa (160 psi).

- Una *caldera de suministro de agua caliente* está completamente llena de agua y suministra agua caliente para usarse en el exterior de ella, sin retorno, a una presión que no excede los 1103 kPa (160 psi).
- Una *caldera de calor perdido* utiliza subproductos térmicos como gases de hogar de laminación o siderurgia, gases de escape de una turbina de gas o subproductos de una proceso de fabricación. El calor residual se pasa por unas superficies de intercambio térmico para producir vapor o agua caliente para uso convencional.
- *Caldera de vapor* o en otros términos *generador de vapor*, esto es debido a que el término caldera se refiere al cambio físico del fluido contenido, mientras que generador de vapor cubre la totalidad del aparato en el que el cambio físico está teniendo lugar.
- Una *caldera supercrítica o hipercrítica* funciona por encima de la presión crítica absoluta de 22106 kPa (3206.2 psi). El vapor y el agua tienen una presión crítica de 22009 kPa (3192.1 psi). A esta presión el agua y el vapor tienen la misma densidad, lo que significa que el vapor está comprimido tan intensamente como el agua. Cuando esta mezcla se calienta por encima de la temperatura de saturación correspondiente de 647.1 K (374.1 C), para esta presión, se produce vapor seco sobresaturado capaz de realizar trabajo útil por su presión elevada. Este vapor seco está especialmente indicado para mover turbogeneradores.

Las calderas se clasifican también por la naturaleza de sus servicios prestados. Las clasificaciones tradicionales son: portátiles, de locomotora y marinas, definidas como sigue:

- Una caldera portátil está montada sobre un camión, barco, pequeño bote de río u otro aparato móvil.
- Una caldera de locomotora es una caldera diseñada especialmente para vehículos de tracción autopropulsados sobre raíles (también se usa para servicios estacionarios).
- Una caldera marina es normalmente de tipo especial de cabeza bajo destinada para barcos de carga, pasajeros con una capacidad de vaporización inherente rápida.

El tipo de construcción también diferencia a las calderas como sigue: Las calderas de fundición son unidades de calefacción de baja presión construidas por secciones de fundición a presión de acero, bronce o latón. Hay tres tipos de calderas de fundición:

- Calderas verticales de fundición de secciones colocadas o montadas verticalmente una encima de otra, similar a los pancakes⁵ con accesorios de conexiones que unen las secciones.
- Calderas horizontales de fundición por secciones conectadas o ensambladas horizontalmente de modo que las secciones se mantienen juntas como rebanadas de una hogaza de pan.
- Pequeñas calderas de fundición también construidas en una pieza o molde simple de pieza única.

Las calderas de acero pueden ser también de alta o baja presión. Están divididas en dos clases:

- En las calderas de tubo de fuego o tubos de humo, los productos de la combustión pasan a través del interior de los tubos con el agua rodeándolos por el exterior.
- En las calderas de tubos de agua, el agua pasa o circula por el interior de los tubos y los productos de la combustión rodean a los tubos por su parte exterior.

Las calderas de tubos de humo y de tubos de de agua se definen más adelante.

1.3.1 Clasificación de las calderas de acuerdo a su aplicación.

Las especificaciones del sistema de calderas darán una idea inmediata de la capacidad, presión y temperatura que se requerirán. Otra especificación importante es la del combustible, así como su valor para la planta. Los sistemas pueden agruparse según las aplicaciones siguientes:

- Sistema de calefacción central.
- Sistema de vapor para generación eléctrica.
- Sistema de generación eléctrica nuclear de vapor

⁵ Pancakes, con esto nos referimos a que la caldera vertical sus secciones van montadas unas encima de otras, como si fuera un hotcakes.

1.3.1.1 Sistemas de calderas para calefacción central.

Las calderas de calefacción a vapor, como se muestra en la figura 1.12, son normalmente unidades de baja presión de construcción de acero o fundición, aunque las calderas de acero de alta presión pueden usarse también para grandes edificios o zonas de complejos grandes. El termino calefacción central también implica que generalmente todos los condensados retornan a la caldera en un sistema de circuito cerrado. La presión máxima permitida en una caldera de calefacción central de baja presión es de 105 kPa (15.22 psi).

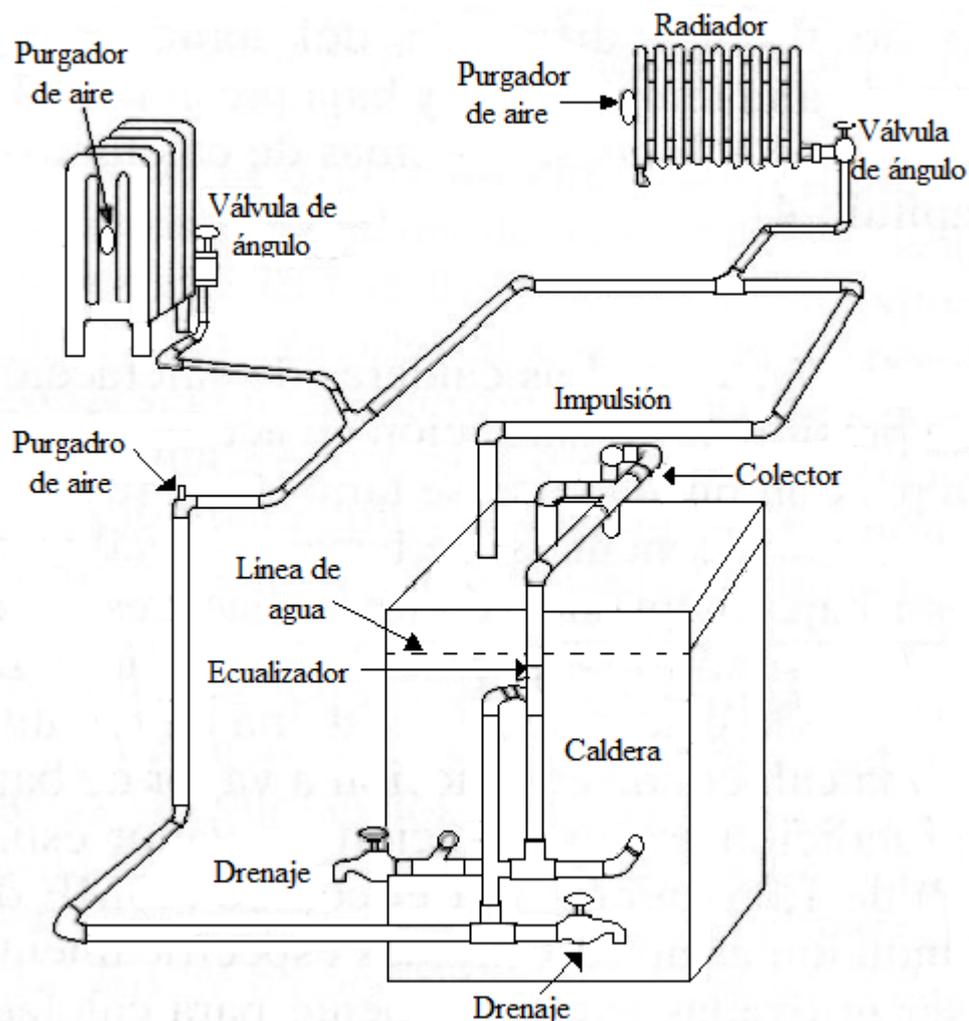


Figura 1. 12 Caldera de calefacción a vapor.

Los sistemas de calefacción a vapor utilizan sistemas de retorno por gravedad o por condensación mecánica. Cuando todos los elementos de calefacción (como radiadores, convectores y baterías de vapor) están colocados por encima de la caldera y no se utilizan bombas, se denomina retorno por gravedad, todos los retornos de condensado a

la caldera son por gravedad. Si hay instalados purgadores o bombas para ayudar al retorno de condensados, el sistema se denomina retorno mecánico. Además de los purgadores, este sistema normalmente comprende un depósito de condensados, una bomba de condensados o un tanque o bomba de vacío.

1.3.1.2 Generador de vapor para generación de energía eléctrica.

La mayor parte de las instalaciones de calderas usadas para generación de energía eléctrica son del tipo supercrítico o subcrítico. El generador de vapor es un elemento importante en la generación de energía eléctrica, como se muestra en la figura 1.13. Los tres componentes más importantes son: el generador de vapor (caldera), el grupo turbina-generator y el condensador. El principal elemento que une las tres partes del equipo es el vapor, a menudo denominado medio de trabajo, producido por una caldera de alta presión. El vapor se desplaza sucesivamente desde la caldera a la turbina y de está al condensador. El ciclo de agua de alimentación completa este circuito haciendo el flujo continuo desde el condensador hasta la caldera. Así, a la elevada temperatura final del ciclo, el generador de vapor transfiere o convierte energía calorífica del combustible a la energía térmica en forma de vapor de agua sobrecalentado. La turbina después transforma el calor del vapor en trabajo mecánico y acciona el generador eléctrico que esta acoplado a ella. El generador a su vez, transforma esa energía mecánica en energía eléctrica.

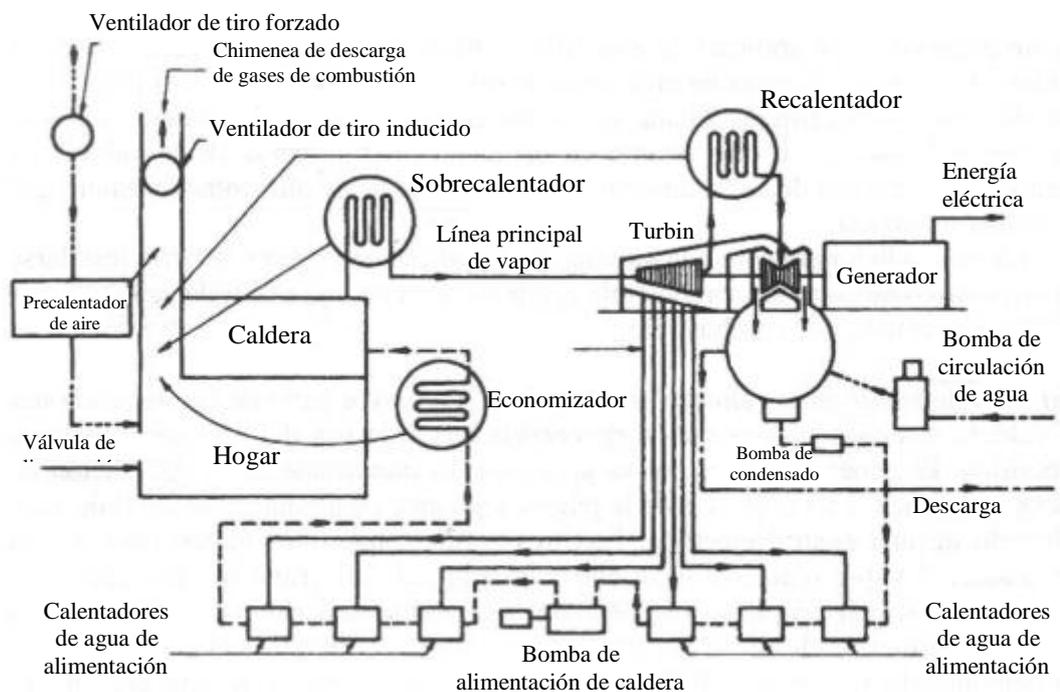


Figura 1. 13 Planta generadora de energía eléctrica con caldera de vapor de alta presión.

1.3.1.3 Generación de energía eléctrica por medio de energía nuclear.

El vapor para la generación de energía eléctrica se produce también por calor producido en un reactor de energía nuclear. El sistema de reactor de agua de ebullición se muestra en la figura 1.14. La vasija del reactor soporta y contiene el núcleo del reactor y proporciona los caminos necesarios para que el fluido entre en el núcleo y el vapor no lo abandone. El agua que pasa sobre el núcleo caliente genera vapor que fluye a través de los separadores de vapor-agua dentro de la vasija del reactor y después a través de los secadores, donde el contenido de humedad del vapor se reduce. El vapor pasa posteriormente a través de la línea de vapor directamente a la turbina-generador como se muestra en la figura 1.14.

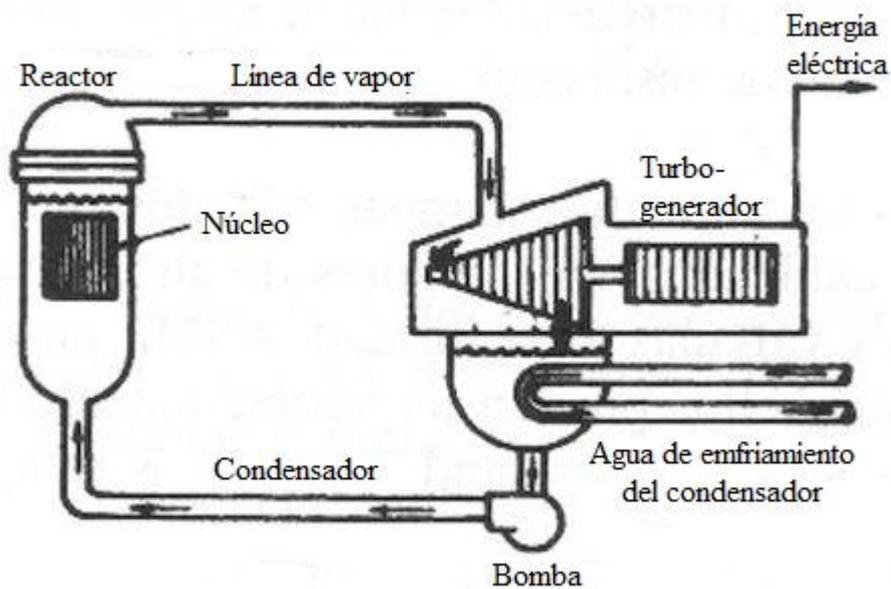


Figura 1. 14 Reactor de energía nuclear de agua en ebullición.

El sistema de reactor de agua presurizada, como se muestra en la figura 1.15, tiene una vasija de reactor y núcleo bastante similar al tipo de agua en ebullición, pero el fluido pasa a través del reactor (bucle primario) y no se mezcla con el que pasa a través de la línea de vapor en el lado turbina. El calor se transfiere desde el sistema del reactor al sistema turbina en el generador de vapor. Realmente, el agua en el reactor y bucle primario no hierve, incluso a 589 K (316 C), porque está mantenida a muy alta presión. En el generador de vapor, sin embargo, esta agua pasa a través de los tubos que están

rodeados por el agua del bucle de la turbina, que está a presión mucho menor. Como ejemplo, una transferencia de 533 K (260 C), al bucle de presión baja de la turbina es adecuada para hervir el agua y producir el vapor necesario para operar la turbina-generador eléctrico. Habiendo cedido la mayoría del calor, el agua en el bucle primario se bombea al reactor para ser recalentada y utilizada de nuevo, en circuito cerrado.

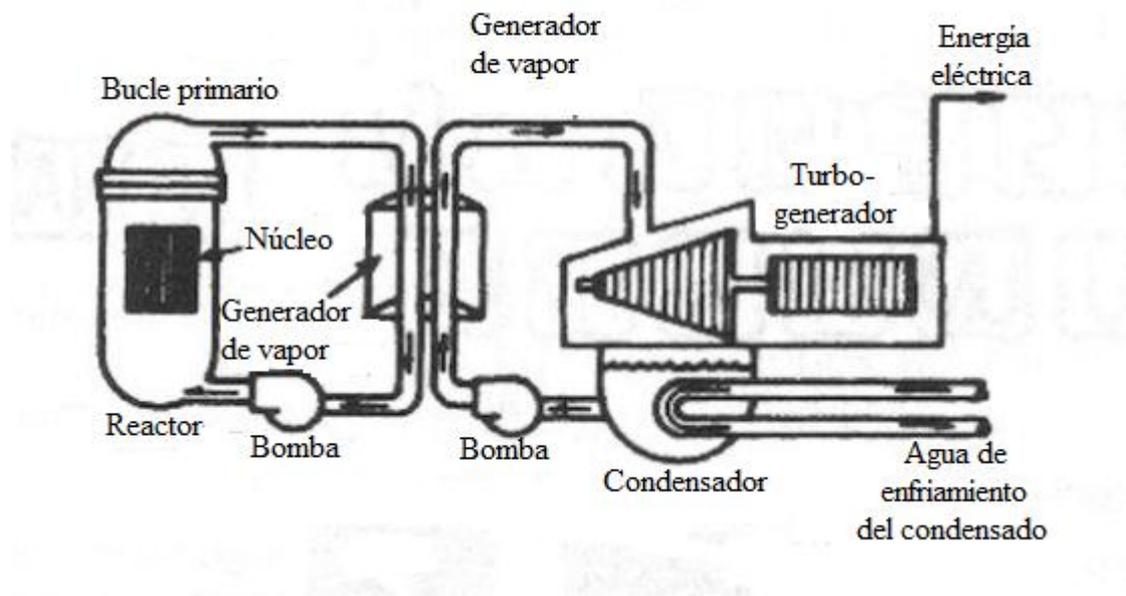


Figura 1. 15 Reactor de energía nuclear de agua presurizada.

1.4 Tipos de calderas.

Aunque se pueden hacer muchas clasificaciones de calderas de acuerdo a diferentes criterios, es posible decir que hay dos tipos generales de calderas: las de tubos de humo (pirotubulares) y las de tubos de agua (acuotubulares) y dentro de éstas últimas se diferenciarán entre calderas con calderín⁶ agua-vapor y calderas de paso único. Adicionalmente, las calderas se pueden clasificar en alta y baja presión, de vapor saturado o sobrecalentado.

Se entenderá por caldera de alta presión aquellas que operan a una presión superior a 100 kPa (14.504 psi). Una ventaja de usar calderas de alta presión es la reducción del tamaño de la caldera y de las tuberías de vapor para la misma capacidad de transporte de

⁶ Es un recipiente cilíndrico de grandes dimensiones, ubicado en la parte alta de la caldera, en el que el vapor saturado se separa de la mezcla vapor-agua que sale de los tubos de la caldera.

calor, debido al aumento de la densidad del vapor con la presión. Esto puede ser particularmente importante si los consumidores del vapor están a alguna distancia de la caldera. Además la energía disponible en el vapor aumenta con la presión, algo esencial cuando el vapor se usa en una turbina.

Otra clasificación habitual de las calderas sería por el tipo de tiro. El aire necesario para la combustión se aporta normalmente a las calderas mediante ventiladores. Según estos ventiladores actúen sobre el suministro del aire, diremos que las calderas son de tiro forzado, inducido o equilibrado. Las segundas son las que teniendo el ventilador en la salida aspiran los gases de la combustión y los envían a la chimenea, siendo por tanto de hogar en depresión. Cuando coexisten ambos ventiladores la caldera se denomina de tiro equilibrado, haciéndose que el hogar trabaje un poco en depresión para evitar escapes de gases.

1.4.1 Calderas tubos de humo (pirotubulares).

Las calderas pirotubulares son aquellas en la que los gases de la combustión circulan a través de los tubos que están rodeados por agua. Muchas de las calderas pequeñas y medianas de la industria son de este tipo. Los gases de la combustión se enfrían a medida que circulan por los tubos, transfiriendo su calor al agua. La transferencia de calor es función de la conductividad del tubo, de la diferencia de temperatura entre el agua y los gases, de la superficie de transferencia, del tiempo de contacto, etc. Una caldera típica pirotubular, como se muestra en la figura 1.16, en la que se aprecia un pequeño hogar sobre el recipiente del agua, que a su vez es traspasado longitudinalmente por los tubos de los gases de la combustión.

Las calderas pirotubulares pueden diseñarse con diferentes pasos de los tubos de humo por el recipiente de agua. El hogar se considera el primer paso y cada conjunto de tubos en el mismo sentido un paso adicional. Estas calderas suelen trabajar hasta unos 2000 kPa (290 psi), para unas producciones máximas de 20×10^3 kg/hr.

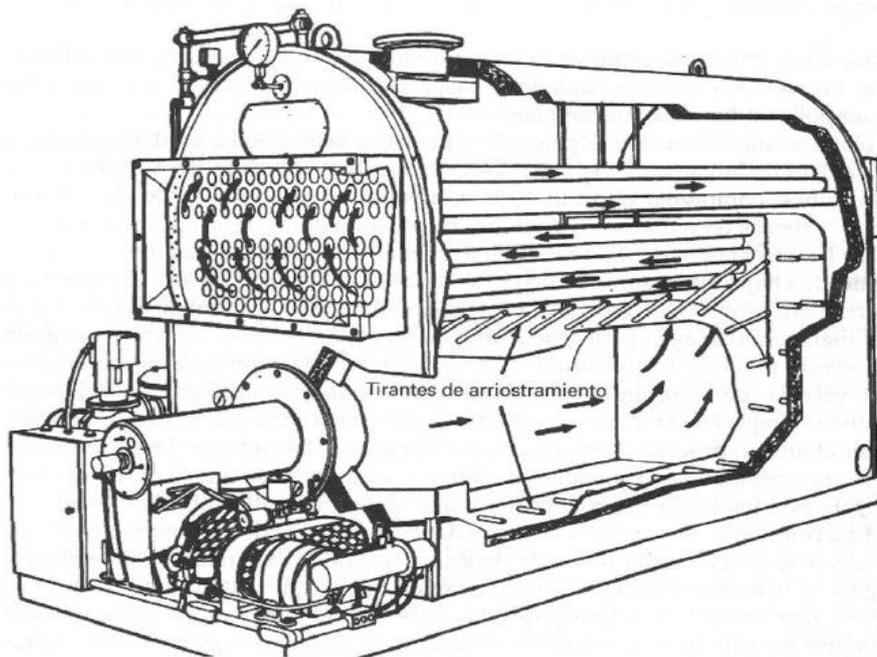


Figura 1. 16 Caldera pirotubular.

Las calderas pirotubulares se clasifican en tubulares horizontales, económicas o de tipo de cajas de humo, de caja de fuego tipo locomotora, tipo marina escocesa, tubular vertical y vertical sin tubo.

1.4.1.1 Caldera económica.

Las calderas de tipo económico fue una adaptación de la caldera de tipo horizontal con retorno, que da algo más de superficie de calefacción por metro cuadrado de espacio ocupado en la planta. Las calderas de este tipo pueden transportarse como una unidad, con las paredes del hogar en su posición encastradas en un armazón de acero.

1.4.1.2 Calderas cajas de fuego tipo locomotora.

Como los tipos de caldera vertical tubular y marina escocesa, la caldera con caja de fuego (hogar) de locomotora, como se muestra en la figura 1.17, es una unidad pirotubular con los gases por el interior de los tubos de humo, pero su virola de chapa es horizontal y el hogar no está contenido dentro de la parte cilíndrica de la caldera. El hogar o caja de fuego es rectangular con una parte superior curvada conocida como bóveda. Esta bóveda de chapa esta soportada por riostras⁷ radiales atornilladas a la bóveda y a la chapa exterior. El espacio entre chapas se llama caja de agua. Los tubos

⁷ Riostras: Pieza que se coloca atravesada en un armazón para que no ceda hacia los lados.

de humo están dentro de la virola y se extienden desde la chapa del hogar hasta la chapa de la caja de humo delantero de la virola.

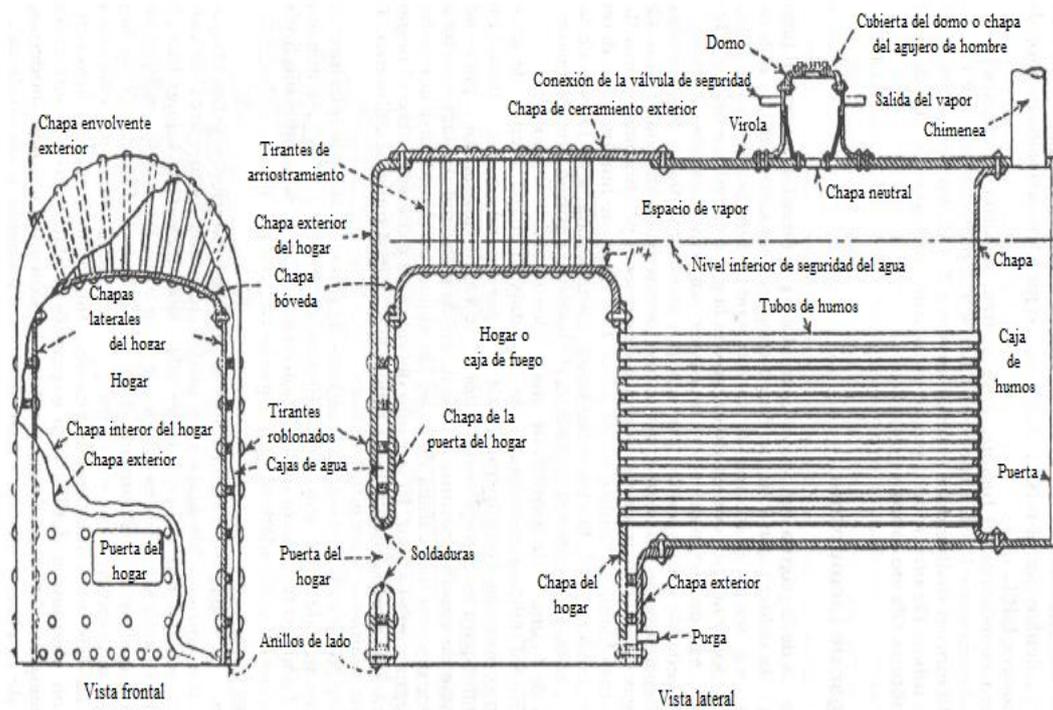


Figura 1. 17 Caldera de locomotora.

El domo de vapor suministra espacio adicional de almacenaje de vapor y permite tomar la salida principal de vapor a una altura considerable por encima de la línea de nivel de agua, reduciendo así la posibilidad de arrastre de agua con el vapor.

1.4.1.3 Caldera marina escocesa

El mayor número de calderas en uso hoy en día en plantas comerciales y pequeñas plantas industriales son las calderas marina escocesa. Esta caldera fue usada originalmente para servicios marinos porque el hogar forma parte integrante del conjunto de la caldera, permitiendo una construcción más compacta que requiere poco espacio para su capacidad de producción. Esta caldera, está soldada como una unidad compacta que consta de una vasija o recipiente de presión con quemador, controles, ventilador de tiro, controles de tiro y otros componentes ensamblados en una unidad completamente probada en fabrica.

La caldera marina escocesa (de hogar de interior y tubos de humo) está construida como un hogar de paredes húmedas, como se muestra en la figura 1.18, o de pared trasera de fondo seco, como se muestra en la figura 1.19. Esta caldera es una adaptación a la práctica estacionaria de la bien conocida caldera escocesa de fondo húmedo. Consta de una virola o chapa cilíndrica exterior, un hogar, chapas frontal y trasera de haz tubular y chapa bóveda. Los gases calientes del hogar pasan desde la cámara de combustión con revestimiento refractario hacia la parte trasera y entonces retornan a través de los tubos de humo hasta el frontal de la caldera y después a la chimenea. Esta caldera es adecuada para combustión de carbón, gas y combustibles líquidos derivados del petróleo.

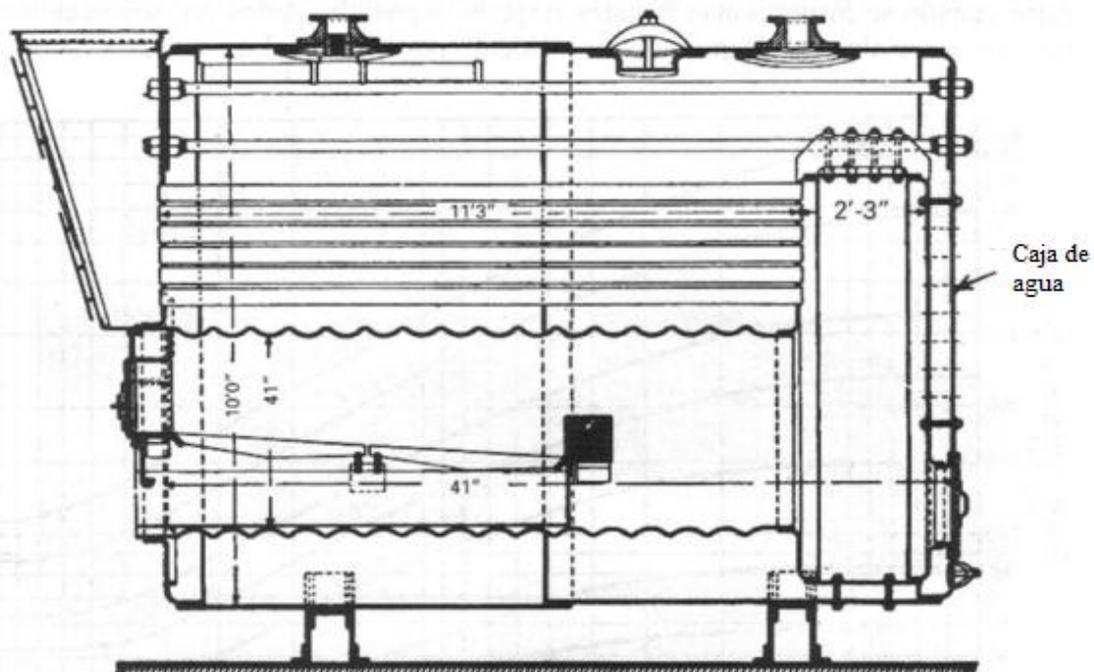


Figura 1. 18 Caldera marina escocesa tipo trasero húmedo.

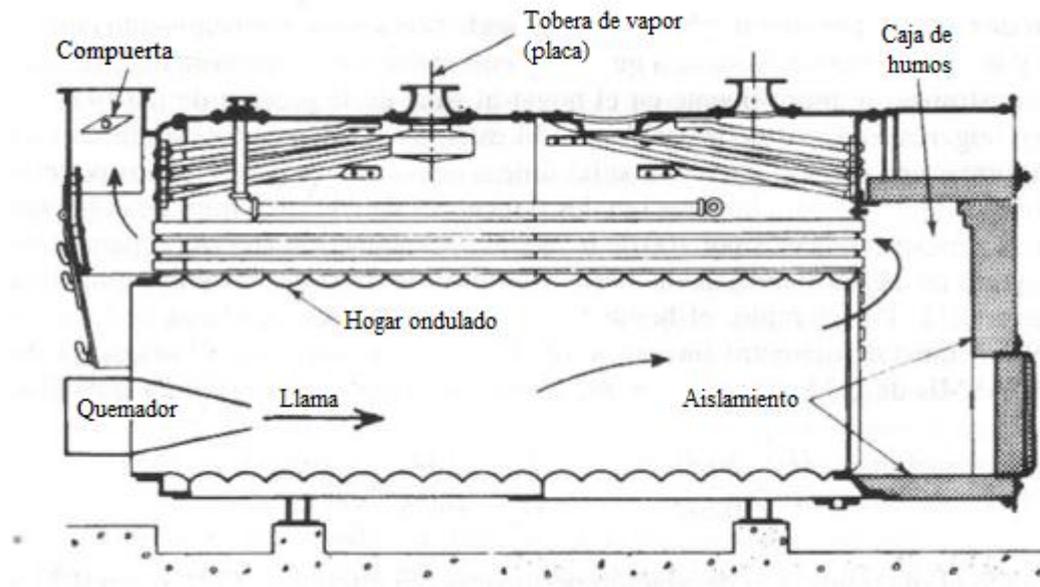


Figura 1. 19 Caldera marina escocesa tipo trasera seca.

En calderas de diámetros grandes, es práctico utilizar más de un hogar. Dos, tres o incluso cuatro hogares se utilizan en las grandes calderas de este tipo. En la figura 1.20, se muestra una vista en corte seccional de un modelo de cuatro pasos. Esta unidad mantiene una velocidad de gases alta de manera continua. Como los gases calientes atraviesan los cuatro pasos, como se muestra en la figura 1.21, transfieren calor al agua de la caldera y así se enfrían y ocupan menos volumen a medida que progresan por los diferentes pasos de tubos. El número de tubos se reduce proporcionalmente para mantener la velocidad elevada de los gases y así mantener la producción lo más constante posible en función de la transferencia térmica. Mejora cuantos más pasos de gases puedan utilizarse; hoy en día 4 es el límite práctico.

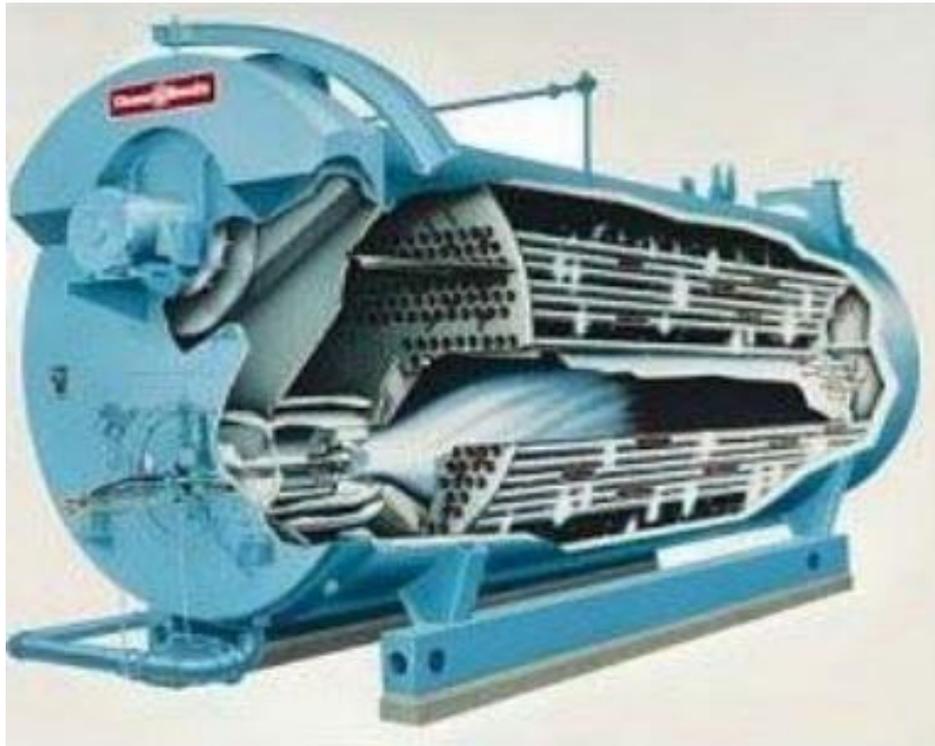


Figura 1. 20 Caldera de cuatro pasos.

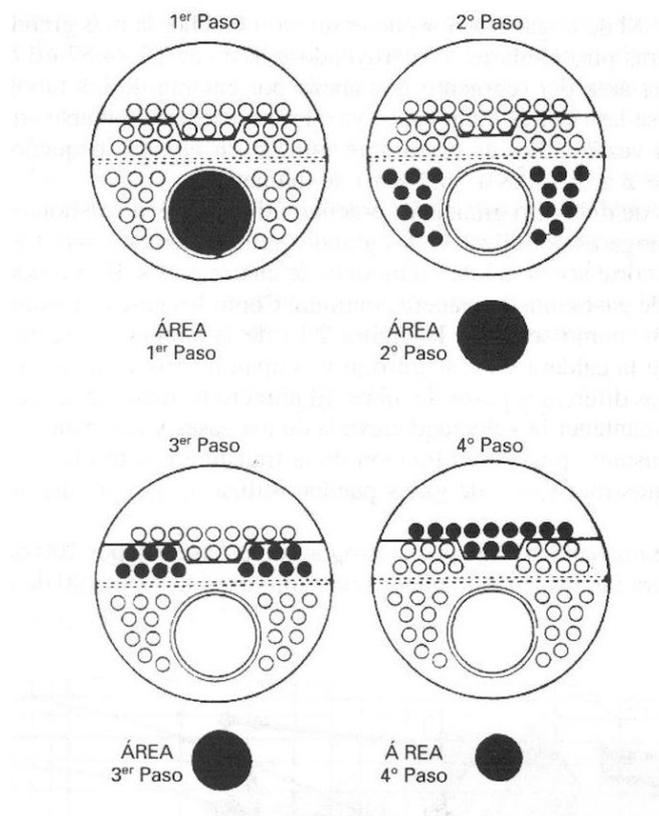


Figura 1. 21 Calderas de hogar interior MS de varios pasos de tubos.

El hogar de una caldera marina escocesa puede proporcionar hasta 65 % de la producción de la caldera incluso cuando puede tener sólo del 7 al 8 % de la superficie calefactora total. En el hogar, la mayoría del calor se transmite por radiación. El hogar debería tener volumen suficiente para permitir la combustión completa de la mezcla de combustible-aire antes de que los gases alcancen los pasos de humo. Un buen tratamiento de agua de alimentación es esencial para las calderas de hogar interior con elevadas tasas de desprendimiento térmico en el hogar.

Los diseños compactos también tienden a hacer menos accesibles las superficies para la inspección y limpieza. Así, las tasas elevadas de transferencia térmicas pueden fácilmente producir recalentamiento, especialmente si la transferencia esta forzada.

1.4.1.4 Caldera tubular vertical.

Las calderas verticales de tubos de humos se utilizan cuando apremia y es precaria la superficie en planta y los requisitos de presión y capacidad entran dentro del alcance de este tipo de caldera. La caldera tubular vertical, como se muestra en la figura 1.22, es una unidad caldeada interiormente por tubos de gases. Es una unidad auto-contenida que precisa poco o ninguna obra de refractario.

La caldera de tubos de agua de tipo serpentín es un competidor de toda caldera vertical en pequeñas capacidades y presiones bajas de hasta 1029.7 kPa (149.35 psi). Pero la caldera tubular vertical está limitada en capacidad y presión incluso más que la caldera de hogar interior horizontal vertical.

Las ventajas de las calderas piro-tubulares verticales son:

1. Capacidad y manejabilidad.
2. Bajo costo inicial.
3. Muy poca superficie requerida por caballos de fuerza (HP) de caldera.
4. No se precisa un asentamiento especial.
5. Instalación rápida y sencilla.

Las desventajas son:

1. El interior no es fácilmente accesible para limpieza, inspección o reparación.
2. La capacidad en agua es pequeña, haciéndose difícil mantener una correcta presión de vapor bajo variaciones de carga.
3. La caldera es propensa a los arrastres (llevados por el vapor) cuando se trabaja a plena carga a causa del pequeño espacio del vapor.
4. La eficiencia o rendimiento es bajo en los tamaños pequeños porque los gases o humos tienen un corto recorrido y directo, a la chimenea, de forma que se desperdicia mucho calor.

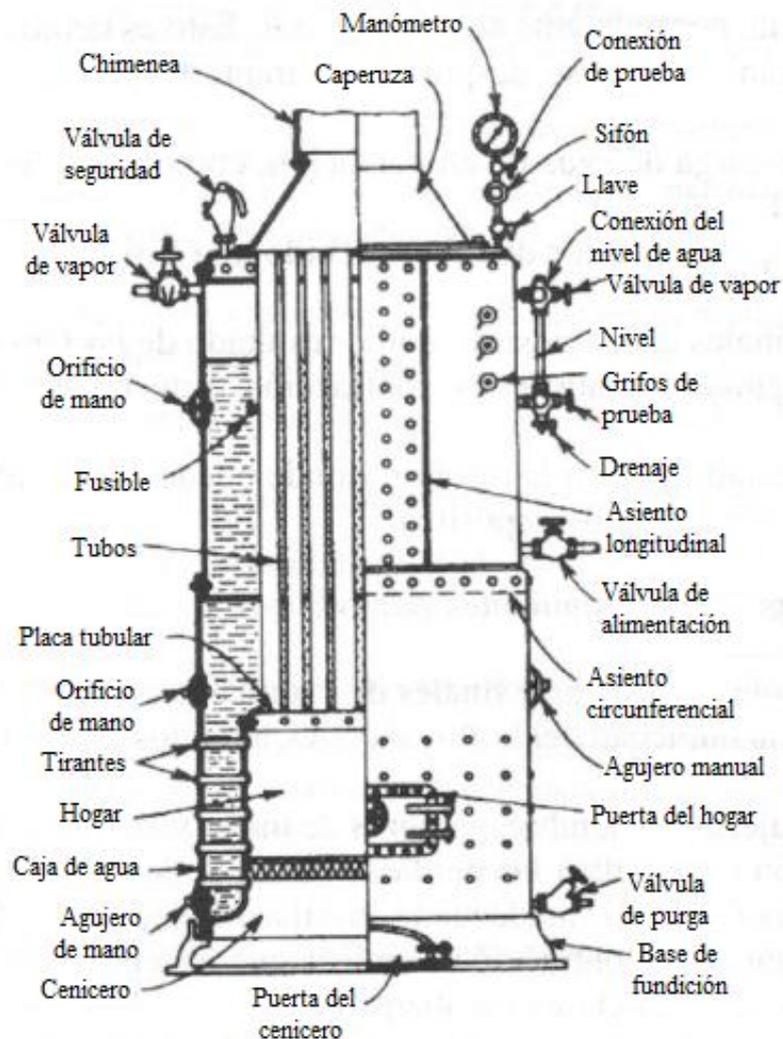


Figura 1. 22 Caldera tubular vertical.

1.4.2 Caldera de tubos de agua (acuotubulares).

La diferencia fundamental de la acuotubular y la caldera pirotubular es que en la primera el agua circula dentro de los tubos en vez de alrededor de ellos (caldera pirotubular). Los gases calientes pasan alrededor de los tubos de la caldera acuotubular.

La caldera acuotubular se diseña con los tubos contenidos dentro de la envolvente o cáscara de la caldera. Los tubos de la mayor parte de las calderas de tubos están situados en el interior del calderín o calderines de vapor. Las dos ventajas de la modalidad de la caldera acuotubular son:

1. Puede obtenerse mayor capacidad aumentando el número de tubos, independientemente del diámetro del calderín de vapor.
2. El calderín no está expuesto al calor radiante de las llamas.

La mayor ventaja de la caldera acuotubular sobre la caldera pirotubular es la libertad para incrementar las capacidades y presiones. Las elevadas capacidades y presiones de la caldera acuotubular han hecho posible los modernos generadores de vapor dentro de las centrales térmicas.

La construcción modular de grandes calderas acuotubulares permite el montaje en fábrica de los paneles de tubos de agua del hogar y de los paneles del sobrecalentador y recalentadores que se sitúan en obra y después se conectan a los calderines o cabezales. Esto facilita el montaje, da mayor control de calidad en fabricación y es más económico. Sin embargo, las pequeñas calderas compactas acuotubulares también se diseñan y se desarrollan para competir con las calderas pirotubulares y para cubrir el gran mercado existente para las calderas más pequeñas. Las ventajas son las siguientes:

1. Al instalar múltiples unidades en lugar de una sola caldera grande, el calentamiento se basa en la carga por caldera, suministrando una gran elasticidad durante los periodos de demanda baja de vapor. Las calderas producen vapor rápidamente, por otra parte, es posible el corte el fin de semana sin verse afectados por los elevados costos de una caldera grande.

2. Los pequeños generadores de vapor pueden colocarse cerca de la carga de vapor, evitando así las pérdidas de las líneas de vapor y condensado y reduciendo el tamaño de la sala de calderas y el espacio necesario.
3. La capacidad de reserva o punta puede suministrarse con un sistema de calderas múltiples.

1.4.2.1 Caldera moderna de tubos curvados.

Las calderas compactas modernas han crecido con popularidad y tamaño para las aplicaciones industriales. Hoy en día, la mayoría de las calderas acuotubulares siguen los diseños mostrados en la figura 1.23. Estos se conocen como tipos A, D y O.

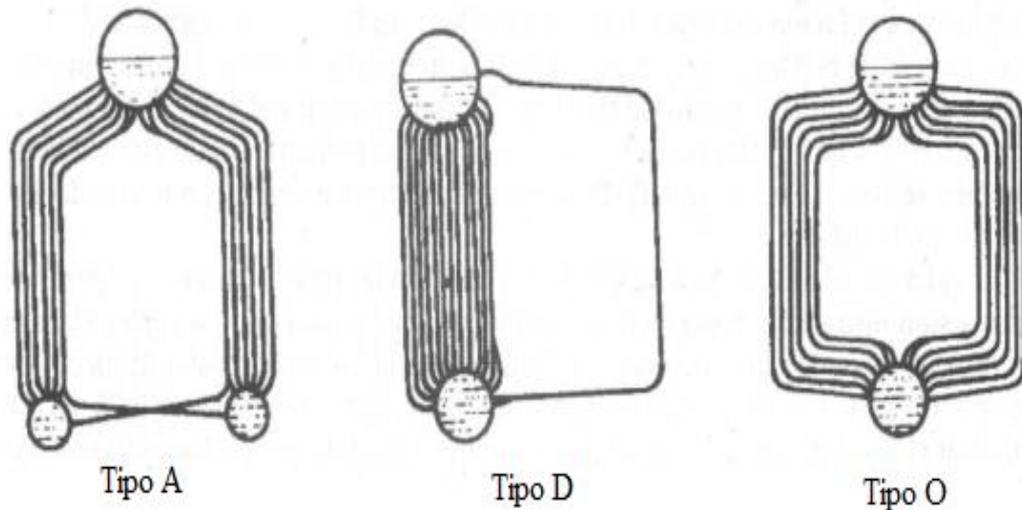


Figura 1. 23 Diseño de calderas de tubos de agua modelos A, D y O.

Una caldera de acuotubular del tipo D montada en fábrica consta de dos calderines y viene equipada con quemador de atomización por aire a baja presión. Las paredes del hogar están refrigeradas por agua en las partes frontal y traseras y, las paredes exteriores, suelo y techo están refrigeradas por tubos tangentes, como se muestra en la figura 1.24.

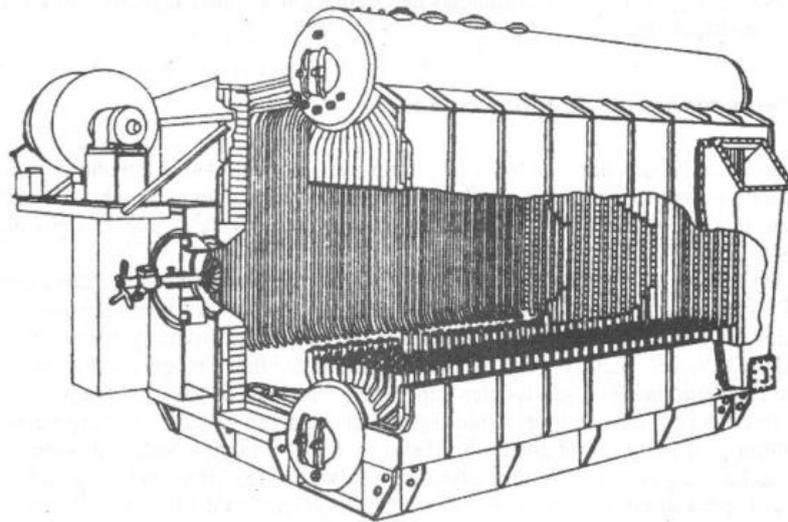


Figura 1. 24 Caldera tipo D de dos calderines y tubos curvados.

Las calderas compactas acuatubular normalmente están equipadas con equipos de encendido y seguridad de combustión y equipos de falla de llama y encendido. Ambos, el quemador piloto y el principal, están monitoreados por un detector de llamas sensible a la radiación de la llama. Las características de corte por seguridad, interconexión de seguridad y llama de operación principal se suministran por la mayoría de los fabricantes. Las alarmas y conexiones eléctricas se incluyen por bajo nivel de agua, alta presión de vapor, fallo del ventilador, temperatura baja y presión de combustible para unidades que queman combustible líquido y alta y baja presión de gas para las que queman gas natural y dispositivos de falla de llama para ambos combustibles.

1.4.2.2 Caldera de combustión mixta (combinada).

Las calderas que queman una combinación de combustibles, como se muestra en la figura 1.25, requieren unas condiciones especiales. Por ejemplo, cuando se añade combustible líquido y/o gaseoso a una caldera de combustible sólido, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Utilizar calentador y atemperador.
2. Necesidades de exceso de aire.
3. Normativa de emisión de Oxido Nitroso (NO⁸).

⁸ NO, gas incoloro y poco soluble en agua.

4. El espacio que los tubos necesitan para evitar el ensuciamiento y restricción en el tiro.
5. Temperaturas esperadas del metal del precalentador del aire.
6. Temperaturas finales de los gases que deben obtenerse.

Cuando se quema un combustible sólido sobre una parrilla, el aire refrigerador debe suministrarse para las piezas del quemador de combustible sólido o gaseoso para disipar o transportar el calor desprendido por radiación desde el interior del hogar.

Algunos de los factores que deben tenerse en cuenta son la cantidad de aire de combustión necesario, tamaño de los ventiladores, volumen de la cámara de combustión para obtener una combustión completa en los hogares y que no tenga lugar en las zonas de paso de gases, dimensiones y tamaños de los equipos extractores de gases y, en todo caso, que estos equipos puedan tratar los diversos productos de la combustión sin corrosión, erosión y cumpliendo las normas ambientales, como las de Dióxido de Azufre (SO₂⁹), Dióxido de Nitrógeno (NO₂¹⁰) y descargas tóxicas.

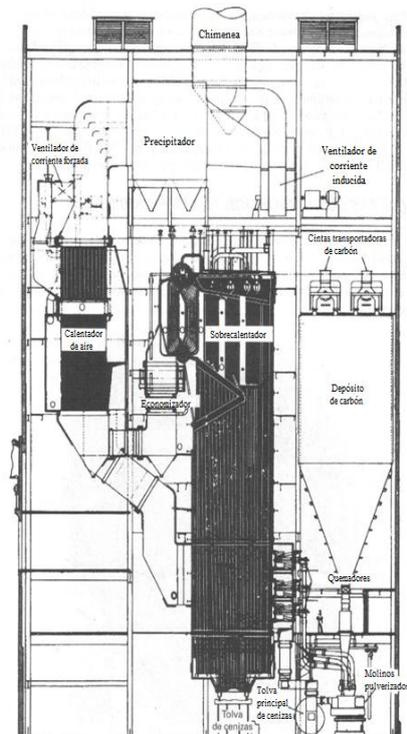


Figura 1. 25 Caldera de combustión mixta.

⁹SO₂, es un óxido. Es un gas incoloro con un característico olor asfixiante.

¹⁰ NO₂, compuesto químico formado por los elementos nitrógeno y oxígeno. Se forma como subproducto en los procesos de combustión a altas temperaturas como en las plantas eléctricas.

1.4.2.3 Caldera central térmica.

Las calderas de centrales térmicas de gran capacidad se clasifican según trabajen a presión subcrítica o supercrítica. Otra clasificación suele hacerse según se utilice circulación de agua natural o forzada.

Las calderas supercríticas, como se muestra en la figura 1.26, son las que trabajan por encima de la presión crítica del diagrama agua-vapor, esto es, 22500 kPa (3263 psi), y a una temperatura de trabajo por encima de la temperatura crítica del agua de 647.2 K (374,2 C). La presión crítica es la presión a la cual el agua y el vapor tienen la misma densidad, mientras la temperatura crítica es la temperatura por encima de la cual el agua no puede existir como líquido, no importa cuál sea su presión. Esto significa que el agua a la temperatura de 674.2 K tendrá también la presión crítica de 22500 kPa absolutos. No hay calor latente de vaporización por encima de la presión crítica, ya que el agua y el vapor tienen la misma densidad. No hay calderín para separar el agua del vapor. Las calderas hiper-críticas o supercríticas trabajan mediante y a través de los tubos de agua en contraste con las unidades convencionales donde el líquido puede circular a través de los tubos, más que en ellos, antes de convertirse en vapor. Esto se consigue mediante la circulación forzada y a través de las bombas de alimentación de caldera o bomba auxiliar, en contraste con las unidades de circulación natural de las calderas subcríticas.

La alimentación de agua en una caldera supercrítica se bombea a la entrada de la caldera y pasa en un camino o circulación continua a la salida de la caldera. El agua de alimentación se introduce a una presión superior a la presión crítica, mientras que la temperatura del agua está por debajo de la temperatura crítica, pero aumenta a medida que pasa a través de la caldera. Hay una zona de transición donde el agua se convierte en vapor. Es necesario que la zona de transición esté en un lugar suficientemente caliente para llevar el agua por encima de la temperatura crítica y suficientemente fría para evitar el calentamiento excesivo de los tubos.

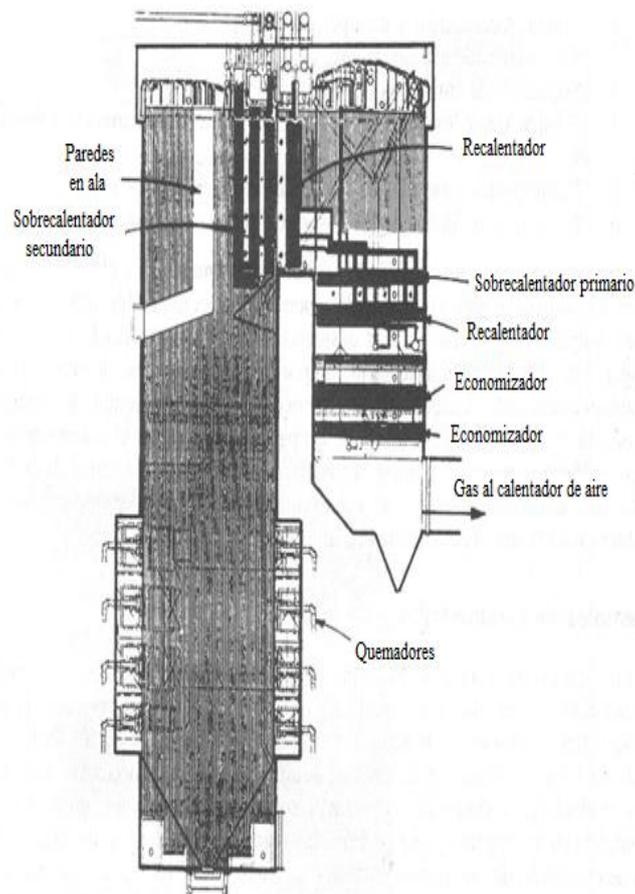


Figura 1. 26 Caldera supercrítica.

Además, las calderas supercríticas deben tener un control restrictivo de las condiciones químicas del agua de alimentación para evitar rupturas de tubos a causa de impurezas y depósitos de agua. La producción máxima continua es de **4,434 toneladas/horas** a 26900 kPa (901.5 psi) y 816 K (543 C), a la salida del recalentador secundario. El recalentamiento es a 811 K (538 C). Esta caldera suministra vapor a un turbogenerador de 1,300 MW.

El flujo del fluido a través de la unidad empieza en el economizador, a través de sus haces y va hacia los dos cabezales de salida. Dos bajantes llevan el fluido al hogar y pasan por los circuitos de convección yendo hacia los sobrecalentadores primario y secundario. Cuatro líneas de paso (crossover), o de unión entre los recalentadores

primario y secundario, contienen los atemperadores¹¹ del recalentador y las tuberías de conexión al bypass. Hay dos salidas del sobrecalentador secundario y dos salidas del precalentador. Una unidad supercrítica a 24500 kPa (3553.4 psi) y a 631 K (358 C), como se muestra en la figura 1.27, suministra vapor a un turbogenerador de 600 Watts y utiliza válvulas de bypass para pasar vapor a un tanque, de vaporización instantánea (flash) en el arranque. El depósito o tanque flash actúa como un calderín de caldera separando las partículas de humedad del flujo “flasheado” de modo análogo a un scrubber¹². El vapor despojado de la humedad se retorna al generador de vapor vía válvula de retorno de vapor y suministrado por la bandeja del sobrecalentador de vapor primario. Este método de operación del bypass se dirige a través de los calentadores de agua de alimentación antes de ir al condensador, reduciendo así las pérdidas térmicas.

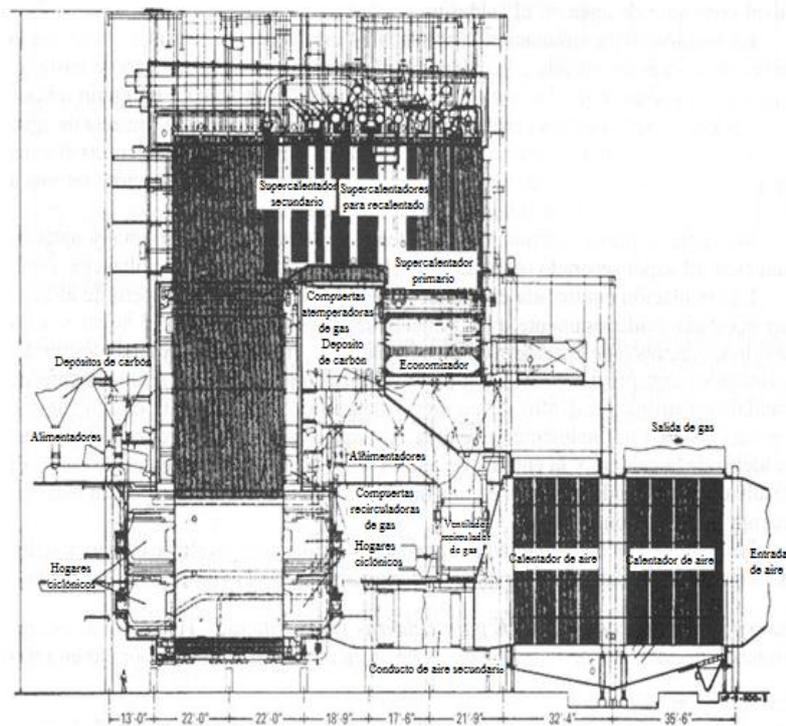


Figura 1. 27 Caldera supercrítica ciclónica de hogar a carbón.

¹¹ Equipo que permite optimizar la eficiencia del vapor sobrecalentado.

¹² Término utilizado en el lenguaje técnico coloquial de calderas para indicar “vaporización instantáneo”.

1.4.2.4 Caldera de circulación controlada.

La caldera tipo “LaMont”, como se muestra en la figura 1.28, se conoce como caldera de circulación controlada, porque la cantidad de agua que pasa por la caldera es de tres a veinte veces la cantidad de agua evaporada. Así que se requieren de dos bombas, una para el elevado flujo a través de los tubos (que no son de circulación natural) y la otra como bomba de circulación convencional.

La función de la circulación controlada es establecer un flujo a través de la primera sección de la entrada a la caldera para evitar que el agua se evapore hasta un grado de sequedad total. En vez de ello, la evaporización es sólo en un grado tal que los sólidos y sales disueltas permanezcan en solución. Está solución (mezcla de agua y vapor) pasa al calderín de agua y vapor, donde el vapor se separa mientras el agua en exceso se elimina. El agua separada, junto con el agua de alimentación, retorna a las bombas a través de los tubos bajantes o descendentes.

Mediante la purga continua o intermitente, se retiran algunos sólidos y agua en solución. El vapor separado pasa a través del sobrecalentador para su uso final.

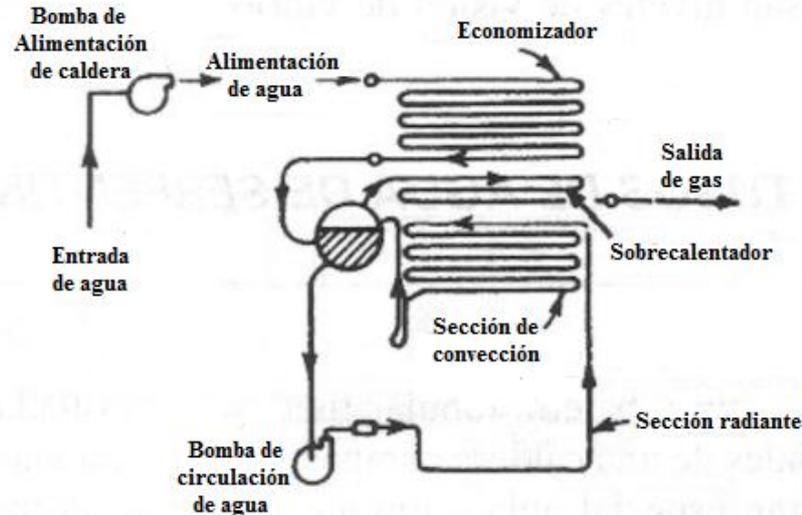


Figura 1. 28 Caldera tipo LaMont.

En la figura 1.29, se muestra un diagrama esquemático de una disposición de calderas y turbinas supercríticas utilizando recirculación forzada y equipada con dos recalentadores.

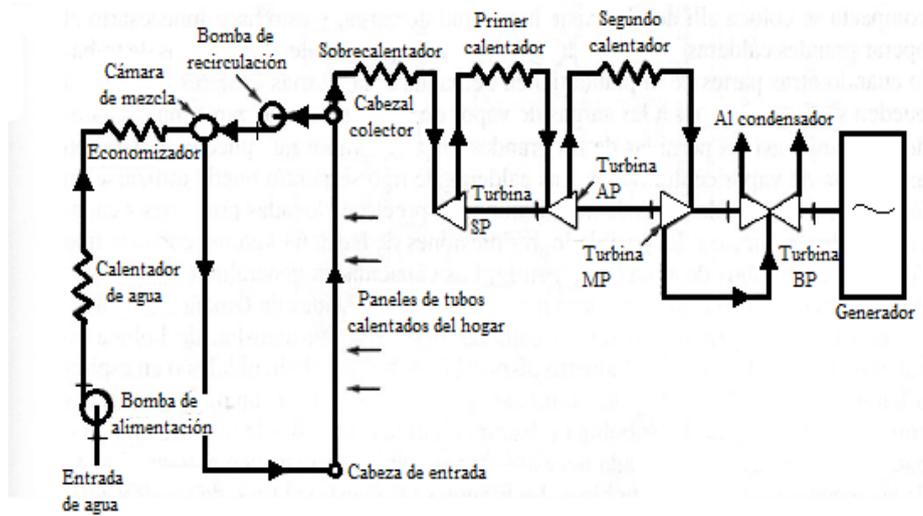


Figura 1. 29 Dispositivo caldera-turbina usando recirculación forzada.

1.4.2.5. Caldera de tubos de agua de baterías (serpentín).

Las calderas de serpentín tubular fueron desarrolladas para satisfacer las necesidades industriales de una caldera completa, de rápida vaporización y montada en fábrica. Encuentran especial aplicación allí donde un proceso requiere vapor a alta presión en alguna parte y las capacidades necesarias son moderadas. Una unidad de carga se coloca allí donde existe necesidad de carga y esto hace innecesario el operar grandes calderas centralizadas a reducida carga durante los períodos de trabajo cuando otras partes de la planta tienen demanda baja. Es posible lograr presiones de hasta 6276 kPa (910 psi), con este tipo de calderas. Las capacidades generalmente están por debajo de la **5 Ton/h.**

Los tubos de generación de las calderas tipo serpentín constan de bobinas o baterías de tubos de pequeño diámetro dispuestas en bobinas helicoidales o en espiral o en baterías horizontales. En la figura 1.30, se muestra el flujo de vapor de agua de una unidad tipo serpentín.

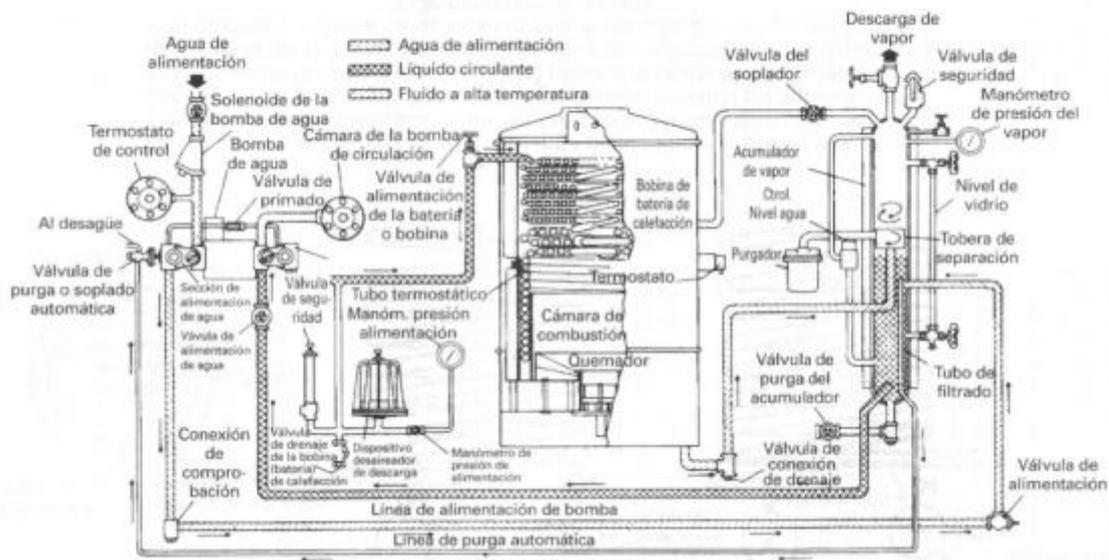


Figura 1. 30 Caldera de serpentín de tubos de agua mostrando el flujo de agua y vapor.

El flujo de agua y vapor, como se muestra en la figura 1.30, parte de la entrada de agua de la bomba de alimentación con el agua bombeada directamente al acumulador de vapor. La tasa de agua de alimentación está controlada por el nivel de agua que a su vez responde al control de nivel líquido del acumulador. El líquido circulante desde el acumulador se bombea a los paneles calentadores de la caldera. El flujo de líquido de los paneles o las baterías arrolladas en espiral se dirige hacia abajo en contra corriente con los gases calientes de combustión. Cuando abandona la sección espiral de generación, el fluido pasa a través del anillo termostático y la sección del arrollamiento helicoidal de tubo de agua y después a la boquilla separadora del acumulador. La acción centrífuga de la tobera o boquilla separa el vapor seco del líquido y permite al exceso del líquido retornar a la sección inferior. El vapor seco del acumulador se descarga sobre la parte superior a través de la válvula de descarga.

1.4.2.6 Componentes de las calderas de tubos de agua grandes.

El término *generador de vapor* se utiliza para indicar una gran caldera con muchos componentes de la superficie de calefacción, como se muestra en la figura 1.31. Esto comprende paredes tapizadas de tubos de agua, economizadores, supercalentadores, recalentadores y calentadores de aire; incluye también equipo de combustión (carbón,

aceite o gas natural), sistemas de ventilación de tiro forzado, de descarga de gases o eliminación de cenizas, lo mismo que bucles de tratamiento de agua de alimentación en el circuito de suministro de agua. Las grandes calderas de acuotubulares tienen mucho más componentes absorbentes de calor que las calderas pirotubulares.

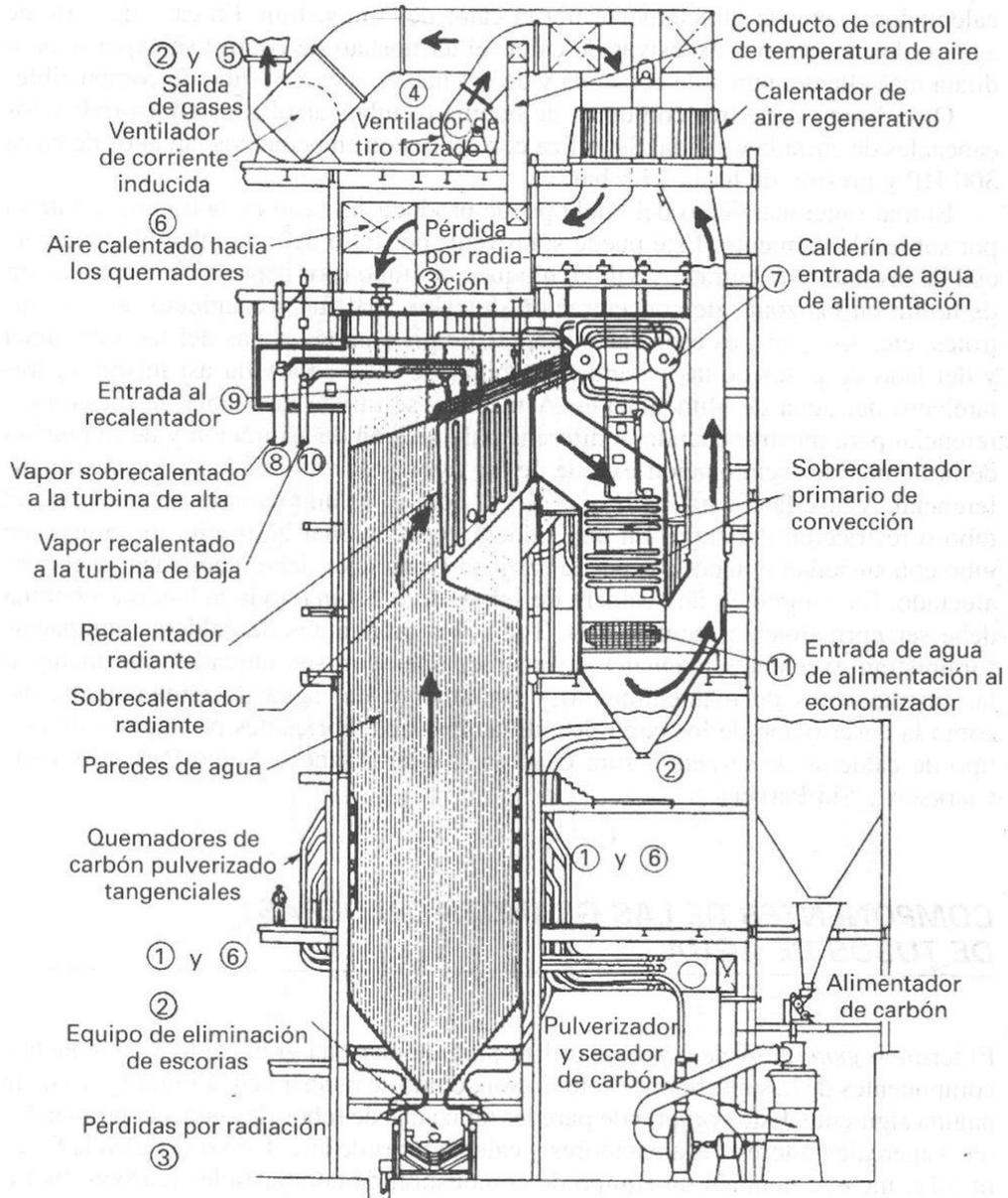


Figura 1. 31 Componentes de un gran generador de vapor.

Las viejas calderas, especialmente las del tipo de tubos curvados, se usaban para colocarse en parejas con una pared de separación común entre ellas que cubría los dos colectores próximos a cada recubrimiento o pared.

Dependiendo del tipo de caldera, la superficie calefactora de tubos de agua puede suponer sólo el 10% de la superficie total de calefacción de la caldera, incluso representa el 50% de la superficie total de absorción térmica. Las paredes de tubos de agua cumplen tres funciones básicas:

1. Proteger el aislamiento de las paredes de hogar.
2. Absorber calor del hogar para incrementar la capacidad de la unidad generadora.
3. Hacer estanco¹³ el hogar (en los hogares presurizados con tubos soldados tangentes).

El calor se transfiere a las paredes de humos como calor radiante desde la zona de mayor temperatura del hogar. A consecuencia de la gran cantidad de calor absorbido por esta parte de la caldera, el agua de alimentación debe de ser de la mejor calidad. También la circulación del agua debe ser rápida y plena para asegurar un flujo positivo a través de cada tubo en todo momento.

Se necesitan válvulas de purga en cada cabezal o calderín en la parte superior de los colectores de los tubos de agua por la misma razón que la caldera misma las necesita.

Otros componentes de las grandes calderas son:

- a) Los sobrecalentadores.
- b) Los economizadores.
- c) Los recalentadores.
- d) Los calentadores de aire

- a) Sobrecalentadores.

El sobrecalentador, como se muestra en la figura 1.32, es un elemento en donde, por intercambio calorífico, se eleva la temperatura del vapor saturado proveniente de la caldera.

¹³ Estanco: que está completamente cerrado y no tiene comunicación con otra cosa.

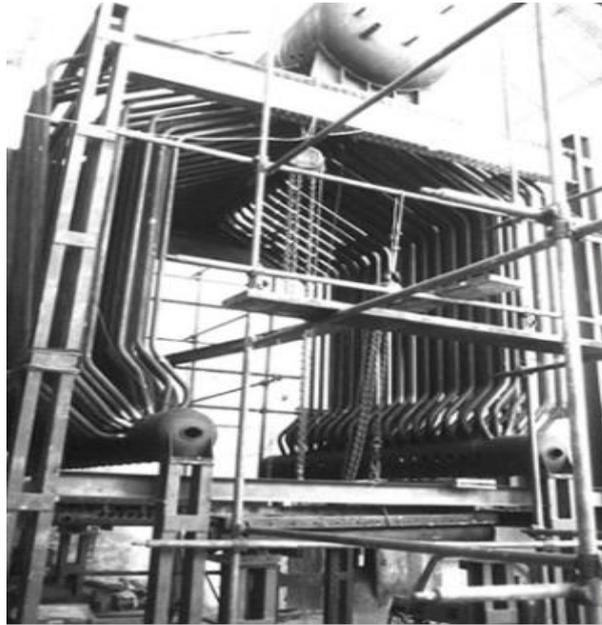


Figura 1. 32 Sobrecalentador de un generador de vapor.

Cada presión del vapor saturado tiene su temperatura. El calor añadido al vapor seco se conoce como de sobrecalentamiento y da como resultado una mayor temperatura que la indicada en la curva, para la presión correspondiente. La ventaja del vapor sobrecalentado en los motores primarios es doble:

1. El trabajo puede realizarse a través de la forma de sobrecalentamiento antes de que tenga lugar la condensación. Esto representa un incremento en el rendimiento del uso del vapor.
2. Este período de trabajo realizado con vapor seco elimina los efectos corrosivos y agresivos del condensado. El deterioro de los álabes de alta velocidad de la turbina causado por el choque de las gotitas del condensado puede ser considerable y comparable a la erosión producida por un tiro de perdigones.

El sobrecalentamiento se produce al pasar el flujo de vapor saturado proveniente de una caldera por un sobrecalentador de uno u otro tipo, radiante o convectivo.

En la figura 1.33 se muestra un sobrecalentador y su situación en la caldera. La clasificación general incluye los tipos radiantes y convectivo, dependiendo de que absorban calor radiante o por convección.

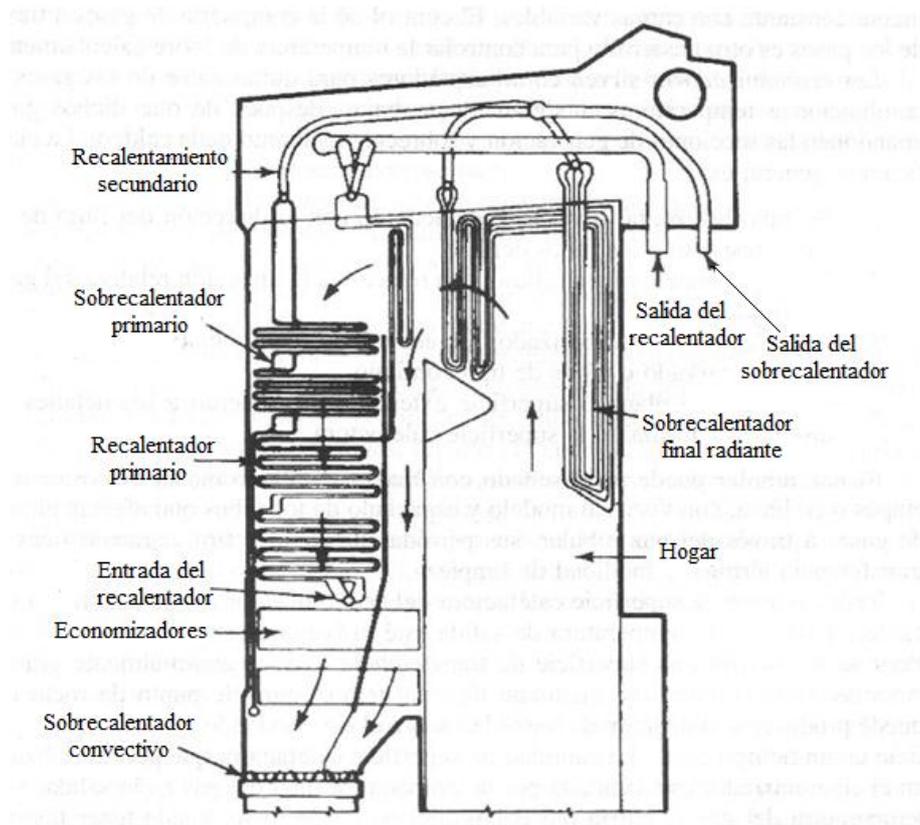


Figura 1. 33 Sobrecalentador.

Una temperatura constante de vapor sobrecalentado se desea por la mayoría de los diseñadores, ya que una turbina de vapor está diseñada para una temperatura particular del vapor con la cual operará con la mayor eficiencia. Las características del sobrecalentador del tipo convectivo pueden producir una curva de caída de temperatura con tasas de combustión crecientes, mientras la inversa puede ser real con los tipos radiantes. Así pues, se emplea una combinación de los dos tipos, en ciertas instalaciones, para conseguir una temperatura del vapor sobrecalentado prácticamente constante con cargas variables.

b) Economizadores.

Los economizadores, como se muestra en la figura 1.34, sirven como captadores para quitar calor de los gases de combustión a temperaturas moderadamente bajas, después de que dichos gases abandonen las secciones de generación y sobrecalentamiento de la caldera. Esto es, son serpentines en donde se calienta el agua que va a ingresar a la caldera, utilizando como elemento calefactor a los mismos gases de combustión.



Figura 1. 34 Economizador.

Al ser mayor la temperatura del agua que ingresa a la caldera, menos será la cantidad de calor necesaria para producir su vaporización. Además, al darle una mayor utilización a los gases de combustión, se consigue aumentar el rendimiento de la caldera.

La clasificación general de los economizadores es:

1. De tubo horizontal o vertical de acuerdo con la dirección del flujo de los gases respecto a los tubos del haz.
2. De flujo paralelo o contraflujo, con relación a la dirección relativa del gas y del flujo del agua.
3. Vaporizador o no vaporizador, de acuerdo al rendimiento térmico.
4. Retorno curvado o tubos de tipo continuo.
5. Tipo de tubo plano o superficie extendida, de acuerdo a los detalles del diseño y la forma de la superficie calefactora.

c) Recalentadores.

El recalentador es básicamente otro sobrecalentador usado en la caldera de las centrales modernas para incrementar el rendimiento de la planta. Mientras que el sobrecalentador toma vapor del calderín de la caldera, el recalentador obtiene vapor utilizado de la turbina de alta presión a una presión por debajo de la caldera. Este vapor a menor presión que pasa a través del recalentador, se calienta a 810 K (537 C), y después se

introduce en la turbina de media o de baja presión. Los recalentadores, como los sobrecalentadores, se clasifican también de acuerdo a su situación en la caldera como convectivos o radiantes, de tipo horizontal o suspendidos.

d) Calentadores de aire.

Los calentadores de aire hacen la recuperación térmica final de los gases o humos de caldera con los que se precalienta el aire de entrada al hogar para su combustión con el diesel o gas natural o combustible correspondiente. Así algo de combustible se ahorra, ya que de otro modo se utilizaría para precalentar la mezcla aire-combustible hasta su punto de ignición. Pero la temperatura de los gases no debe reducirse por debajo de su punto de rocío, ya que la humedad de los gases los condensaría. Esto podría producir agua que combinada con el azufre y posiblemente con dióxido de carbono y también con monóxido de carbono, formaría los ácidos sulfuroso y carbónico, altamente corrosivos.

e) Quemador.

Los quemadores son los accesorios principales de las calderas. Su objetivo es mezclar el aire con el combustible o viceversa, para luego introducirlos a presión en forma de llama incandescente al interior de la caldera.

De acuerdo con la forma que se alimenta el aire, se puede clasificar los quemadores en dos formas:

➤ Quemadores de alimentación separada de aire y gas.

En este tipo de quemador, los dos fluidos ambos a presión, llegan separadamente a la punta o nariz del quemador; la mezcla se realiza en la cámara de combustión o en la proximidad de ésta. Estos quemadores son aplicables a calderas de todas las capacidades.

➤ Quemadores de mezcla previa.

En este tipo de quemador, a veces llamado de llama azul, la mezcla de los dos fluidos se realiza antes de su introducción a la cámara de combustión.

2. Requerimientos de las calderas para la industria.

La energía generada por medio del vapor es muy importante y fundamental para la mayoría de la industria eléctrica, alimenticia, farmacéutica, cosmética entre otras, ya que sin ella el rostro de la sociedad contemporánea cambiaría radicalmente de su situación actual. Nos veríamos obligados a contar con plantas de energía hidroeléctrica, molinos de viento, baterías, pilas de combustibles, los cuales son capaces de producir solo una fracción de electricidad, movimiento rotatorio de máquinas, limpieza de loop¹⁴ de agua, esterilización de equipo y material, entre otros.

Hoy en día, si andamos en cualquier fábrica de productos químicos, refinerías, plantas de congelación, centrales eléctricas convencionales, etc., podemos ver generadores de vapor y calderas de recuperación de calor; el vapor se necesita en todas partes del proceso y de generación de energía

Las calderas y sus diseños están mejorando continuamente para satisfacer los desafíos de una mayor eficiencia y reducción de las emisiones de gases y para manejar los requerimientos especiales, si las hubiera. Por ejemplo, unos de los requisitos para las calderas auxiliares en las grandes centrales de ciclo combinado es tener una puesta en marcha rápida; calderas generadoras de vapor saturado o sobrecalentado se necesitan estar calientes al 100 % de su capacidad en pocos minutos si es requerido para una turbina de gas de disparo.

Calderas en paquete se completan con hogares refrigerados por agua, como se muestra en la figura 2.1, son más adecuados para esta aplicación que las calderas forradas con refractarios. Además de tener una generación de energía o vapor de manera eficiente, las plantas de hoy también deben contener estrictas regulaciones ambientales relacionadas con las emisiones de CO¹⁵, CO₂¹⁶, entre otros, que se suma a la complejidad de sus diseños.

¹⁴ Circuito de agua utilizado en las diferentes industrias para la alimentación de los procesos de fabricación.

¹⁵ Monóxido de carbono: gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico. Las calderas lo producen si no está funcionando correctamente.

¹⁶ Dióxido de carbono: es un gas carbónico que es también responsable del efecto invernadero.



Figura 2. 1 Caldera de paquete con hogar refrigerado con agua.

2.1 Diseño de calderas industriales

Las calderas industriales tienen, en general, características de diseño distintas de las calderas energéticas; se construyen en un amplio campo de tamaños, presiones y temperaturas, desde las de vapor saturado a 13.79 kPa (2 psi) y 376 K (103 C), que se utilizan para caldeo de todo tipo, hasta las de 12411 kPa, (1800 psi), y 811 K (538 C) para plantas generadoras de electricidad.

Las calderas industriales suministran vapor para más de una aplicación; en determinadas circunstancias la demanda de vapor puede ser cíclica o fluctuante, de modo que el funcionamiento de la unidad generadora de vapor y su equipo de control se puede complicar.

En las calderas industriales, el flujo de la mezcla agua-vapor suele ser en circulación natural, con excepción de las viejas unidades remodeladas con lechos fluidificados burbujeantes y las grandes calderas con gran capacidad de generación de vapor.

Las grandes calderas para generación de electricidad, se diseñan para quemar carbón pulverizado o troceado, aceite, gas o una combinación de aceite o gas con un combustible sólido determinado.

Muchos procesos industriales generan subproductos que pueden servir como combustibles, contribuyendo significativamente al rendimiento operativo de la planta y reduciendo el costo del producto como:

- Gases derivados de la industria del acero, como el gas de hogar alto y el gas de batería de coque.
- Productos clásicos de la industria del petróleo como CO, gas de refinería y coque de petróleo.
- Productos de la agricultura como el bagazo de los molinos de azúcar, cascaras de cacahuete, pozos de café, etc.
- Residuos de la industria de la pulpa y papeleras, como madera, productos químicos de proceso, sedimentos, etc.
- Vapor a alta presión, derivado de la salida de un reactor en la industria petroquímica.

Los parámetros que especifican las calderas industriales son:

- Presión de vapor.
- Temperatura e intervalo de control.
- Flujo de vapor: punta, mínimo, curva de carga.
- Temperatura y calidad de agua de alimentación.
- Capacidad de reserva y número de unidades.
- Combustibles y sus propiedades.
- Características de las cenizas.
- Preferencias en métodos de combustión.
- Límites de emisión medioambientales SO₂, NO_x, partículas sólidas, etc.
- Espacio de emplazamientos y limitaciones de accesos.
- Auxiliares, requisitos de operadores y bases de evaluación.

2.2 Equipo generador de vapor.

La mayoría de las aplicaciones de la generación de vapor se destina a los sectores de:

- Producción eléctrica.
- Suministro de vapor a procesos.

A veces se emplean, al mismo tiempo, combinaciones de estas dos aplicaciones y se habla entonces de la cogeneración. En toda aplicación de vapor, el generador constituye el componente más importante del sistema, estando integrado por otros subsistemas y componentes. En la figura 2.2 se indican los subsistemas principales de una planta de generación de energía que quema carbón, que comprenden:

- La recepción y preparación del combustible.
- El generador de vapor.
- El equipo de combustión.
- La protección medio ambiental.
- El grupo turbina-alternador.
- El equipo de calor residual, incluyendo la torre de refrigeración.

El generador de vapor vaporiza el agua y suministra vapor a alta temperatura y presión, en condiciones controladas. A continuación, el vapor se lleva a la turbina conectada a un alternador que se encarga de generar la electricidad. Una vez expandido el vapor en la turbina, pasa al condensador, en el que se evacúa su calor residual, condensado.

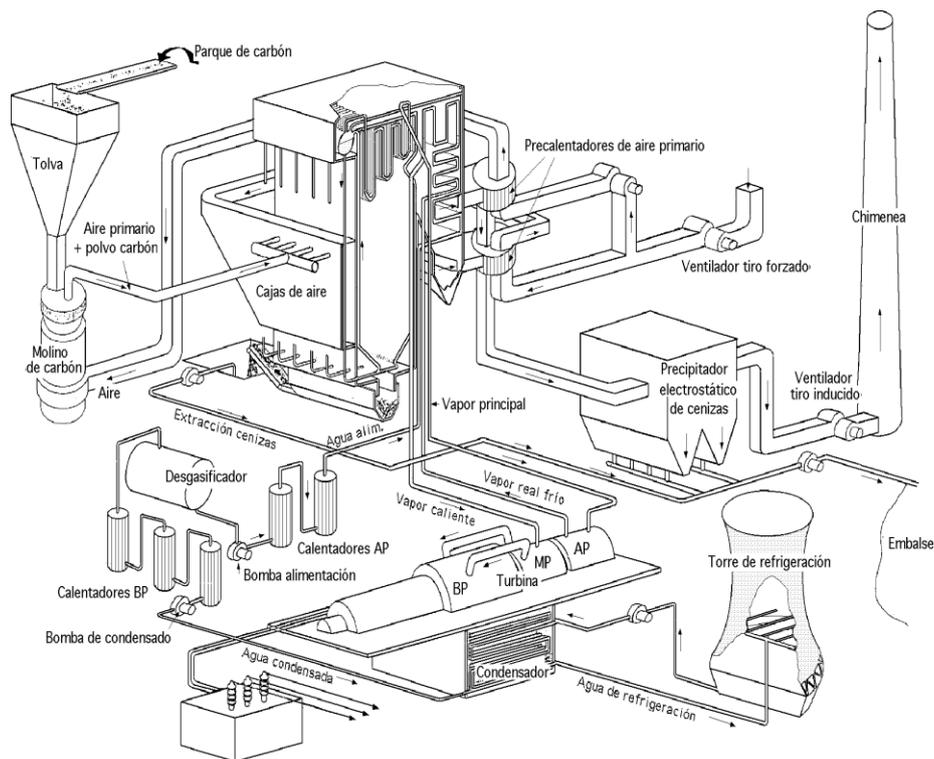


Figura 2. 2 Planta generadora de energía que quema carbón.

Antes que el condensado retorne a la caldera, el agua procedente del condensador pasa a través de varias bombas y calentadores de agua, para incrementar su presión y temperatura. El calor absorbido en el condensador se evacua a la atmósfera por medio de torres de refrigeración, que son los componentes más visibles de toda la instalación de producción de energía. La torre de refrigeración de tiro natural es una estructura casi cilíndrica hueca, por cuyo interior circula aire ascendente y agua pulverizada descendente, que cede el calor evacuado por el condensador al aire que circula; estas torres, de distintas versiones, existen en la mayoría de los emplazamientos de las modernas plantas generadoras de energía eléctrica.

De una manera general y esquemática, el vapor de agua se produce llevando al punto de ebullición el agua contenida en el recipiente. El agua de alimentación introducida en el generador de vapor proviene de la fuente fría (red colectora del producto saturado más agua adicional).

Cuando el vapor está destinado a poner en movimiento una máquina de vapor, el circuito de producción incluye un condensador que se convierte en la fuente fría.

A fin de mejorar el rendimiento termodinámico del ciclo, se sobrecalienta el vapor; a la salida del generador, después de la ebullición, el vapor pasa a un sobrecalentador, donde su temperatura se eleva a presión constante. Además del mejoramiento del rendimiento del ciclo, el sobrecalentamiento implica una ventaja por el hecho de que al alejarse de la saturación, se suprime la condensación en las paredes y, por consiguiente, el intercambio de calor entre las paredes y vapor.

Se puede utilizar también un economizador o un calentador de aire comburente, aguas abajo del banco de caldera, para reducir aún más la temperatura de los humos a la salida de la unidad.

2.2.1 Distribución del vapor

La distribución del vapor es un sistema de transporte de vapor de la salida de la caldera hasta el final de sus diversos usos, como se muestra en la figura 2.3, en realidad estos sistemas regulan la entrega de vapor de la caldera a los diferentes usos finales. Aunque

un sistema de distribución puede ser pasivo responden a cambios de temperatura y a los requisitos de presión. Por lo tanto, un funcionamiento adecuado del sistema de distribución requiere de un diseño adecuado y un mantenimiento eficaz.

El primer punto de cualquier sistema de distribución es la sala de calderas, donde, a menudo, conviene que las líneas de vapor de la caldera converjan en un manifold, que normalmente se le llama colector distribuidor. El tamaño del colector distribuidor dependerá del número y tamaño de las calderas y el diseño del sistema de distribución. Es preferible la distribución a alta presión ya que requiere tamaños de tuberías reducidos para las altas capacidades y velocidades. La distribución de esta manera permite conectar los suministros de vapor de la línea principal a los puntos convenientes, directo a los usuarios de alta presión o por una estación reductora de presión a colector que proporcionan vapor a los usuarios locales a presión reducida.

Las tuberías deben de ser del tamaño adecuado, con el apoyo de aisladores y se configura con la flexibilidad adecuada, dispositivos de regulación de presión como válvulas y turbinas de contrapresión las cuales deben ser configuradas para proporcionar el equilibrio adecuado del vapor entre las diferentes cabeceras de vapor. Además, el sistema de distribución debe estar configurado para favorecer un adecuado drenaje del condensado, que requiere de una capacidad adecuada y correcta sección de la trampa de vapor.



Figura 2. 3 Sistema de distribución de vapor.

El sistema de distribución de vapor se puede dividir en tres categorías: tubería enterrada, por encima del suelo y la sección de construcción que comprende la selección de los componentes de distribución (tubería, aislamiento, etc.) que puede variar dependiendo de la categoría.

2.2.2 Válvulas

En los sistemas de vapor, las funciones principales de las válvulas, como se muestra en la figura 2.4, son para aislar el equipo o los sistemas, al regular el flujo de vapor y para evitar sobrepresión. Los principales tipos de válvulas que se utilizan en los sistemas de vapor son: de compuerta, de globo, retención de charnela, de reducción y las válvulas de alivio de presión.

Las válvulas de compuerta, globo y charnela generalmente aíslan el vapor de una rama del sistema o componente. Las válvulas reductoras de presión (PRV) suelen mantener algunas corrientes de vapor bajo control, limitando la cantidad de vapor que pasa por ella. La válvula de alivio libera el vapor para evitar sobrepresiones en un cabezal del sistema o del equipo.

Las válvulas de reducción están a menudo controladas por los transmisores que monitorean las condiciones de agua y vapor.

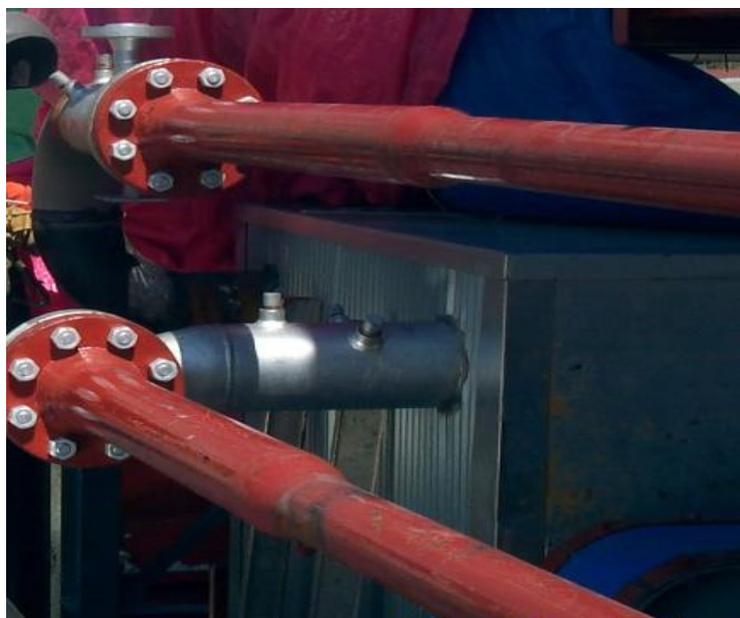


Figura 2. 4 Tipos de válvulas

2.2.3 Separadores de Vapor.

En algunos sistemas de vapor, se genera vapor húmedo. Este vapor húmedo contiene gotas de agua que pueden reducir la eficacia del sistema de vapor. Las gotas de agua erosionan los álabes de las turbinas y el pasaje en las válvulas reductoras de presión, reduciendo así la eficacia y la vida útil. Además, el agua líquida puede reducir las tasas de transferencia de calor en los componentes de los cambiadores de calor. Es por eso que eliminar las gotas de agua del vapor es necesario antes que éste llegue a su uso en los equipos finales.

Los separadores de vapor, como se muestra en la figura 2.5, quitan las gotas de agua, por lo general se realiza por medio del flujo centrífugo controlado. Esta acción, utiliza la fuerza centrífuga para arrastrar la humedad a una pared externa, donde se extrae el agua. El medio por el cual se puede eliminar la humedad es por una trampa o desagüe. Algunos fabricantes incluyen la trampa como parte integrante de la unidad.

Los separadores de humedad se pueden colocar en cualquier parte horizontal y son capaces de eliminar el 99 % de las partículas de arrastre.



Figura 2. 5 Separador de vapor.

2.2.4 Recuperación de vapor.

Cuando el vapor cede su calor en un proceso de fabricación, un intercambio de calor en un serpentín de calefacción vuelve al vapor a una fase líquida llamada condensado. Un método atractivo de mejorar la eficiencia de la planta de energía es aumentar el regreso del condensado a la caldera.

Regresar condensado caliente a la caldera tiene sentido por varias razones. A medida que más condensado se devuelve al sistema, menos agua desmineralizada se requiere, hay ahorro de combustible, se reduce el costo de productos químicos y los costos de tratamiento. Menos condensado se verterá en el sistema de alcantarillado reduciendo los costos de eliminación. Retornar condensado de alta pureza también reduce las pérdidas de energía debido a la purga de la caldera. Importante ahorro de combustible se producirá debido a que el retorno del condensado es relativamente caliente, reduciendo la cantidad de agua desmineralizada que debe ser calentada.

Los componentes de recuperación en un sistema de vapor, colectan y regresan condensado para iniciar nuevamente la generación de vapor. La recuperación de condensado proporciona beneficios en el tratamiento de agua y efectos termales. El condensado que no es recuperado debe ser compensado con la adición de agua, que generalmente es mucho más fresca que el condensado. La temperatura de condensación generalmente excede los 367 K (94 C), mientras que la temperatura del agua es entre 283 K (10 C), y 300 K (27 C). Como resultado la entalpia que diferencia entre el condensado y el agua es generalmente de 120 Kcal/Kg, una cantidad de energía que es a menudo más del 10 % de la energía generada en la caldera de vapor.

Adicionalmente, como ya se mencionó, la impureza del agua es tratada con productos químicos que eliminan los minerales y establecen ciertos niveles de PH en el agua utilizada en la caldera. Reducir la cantidad de impurezas en el agua que se adiciona al sistema nos sirve para reducir la utilización de los químicos. Esto conlleva a que algunos de los productos químicos de tratamiento del agua ya están contenidos en el condensado y genera ciertos problemas en las instalaciones de la planta de tratamiento de las aguas residuales.

Aunque la recuperación del condensado en un sistema de vapor requiere de tuberías, tanques de recolección, equipos de bombeos y en muchos casos separadores de vapor, el

ahorro que se puede conseguir en la compra de los productos químicos para el tratamiento del agua suelen reflejarse en la recuperación del condensado que resulta altamente factible.

2.2.5 Economizador de agua de alimentación.

Un economizador, como se muestra en la figura 2.6, es un dispositivo que está diseñado para aumentar la eficiencia operativa de una caldera, reduciendo los costos operativos durante la vida útil de la caldera. Si bien, los ahorros en un día cualquiera pueden ser relativamente pequeños, el impacto a lo largo de la vida útil de la caldera puede ser significativo, especialmente con un sistema de calderas de gran tamaño. Algunas calderas se diseñan con economizadores integrados, mientras que en otros casos, un economizador se puede integrar posteriormente a la caldera.

Un economizador en una caldera actúa como un dispositivo de recuperación del calor residual, asegurando que este calor no se vaya sin ser utilizado, dicho calor se utiliza para precalentar el agua de alimentación para la caldera de modo que se requiera menos calor (combustible) para traer el agua a una temperatura lo suficientemente alta para producir vapor.



Figura 2. 6 Economizador.

Se puede pensar que el economizador es simplemente un calentador de agua de alimentación para la caldera que evita pérdidas de calor, sino también puede extender la vida útil de la caldera. Los cambios de temperatura causados por el uso de agua fresca de alimentación con el tiempo puede causar el desgaste de la caldera ya que se enfriarían y calentarían los accesorios en función del ciclo. Cuando el agua de alimentación se calienta, la diferencia de temperatura es menos extrema, poniendo menos presión en la caldera y le da una vida útil más larga. Puesto que el sistema de calderas de gran tamaño puede ser costoso para reparar o remplazar, este economizador se puede sumar a los ahorros totales en el sistema de generación de vapor.

2.2.6 Separación vapor-agua

Las calderas y generadores de vapor que operan a presiones subcríticas y con recirculación, están equipados con calderines. El objetivo de un calderín es facilitar la separación del vapor saturado, a partir de la mezcla agua-vapor que sale de las superficies termo-intercambiadoras encargadas de la vaporización.

El agua libre de vapor, se recircula con el agua que alimenta las superficies intercambiadoras para la posterior generación de vapor. El vapor saturado se descarga a través de una serie de conexiones de salida, para su utilización directa o posterior sobrecalentamiento.

La mayoría de las aplicaciones de las calderas, la alta eficiencia en la separación del vapor y del agua resulta crítica con el fin de:

- Impedir el arrastre de gotitas de agua hacia el sobrecalentador, al que podría producir daños térmicos importantes.
- Minimizar la succión de vapor por el agua separada, ya que el vapor residual en el agua puede reducir la altura de bombeo hidráulico.
- Prevenir el arrastre de sólidos disueltos en las gotitas que pueden transportar el vapor hacia el sobrecalentador y turbina, que pueden formar incrustaciones peligrosas, lo que es de importancia por el agua de la caldera que contiene siempre contaminantes en disolución.

Con niveles bajos de sólidos en el vapor, menos de 0.6 ppm¹⁷, se pueden producir daños en el sobrecalentador o en una turbina de vapor.

La solubilidad de estos sólidos en el vapor, es una pequeña fracción de la que corresponde al agua, por lo que una pequeña cantidad de gotitas de agua (< 0.25% en peso) arrastradas por el vapor, puede dar lugar a un importante arrastre de sólidos y a incrustaciones inadmisibles en el sobrecalentador y turbina, que puede causar daños ya que al aumentar la temperatura del metal, este se puede deformar y quemar.

2.3 Ventajas del uso del vapor.

Hay tres formas principales de energía utilizada en los procesos industriales: electricidad, calor de fuego directo y vapor. La electricidad se utiliza en muchas maneras diferentes, incluyendo accionamiento mecánico, calefacción y reacciones electroquímicas. El calor de fuego directo en centrales termoeléctricas transfiere el calor de la combustión de un proceso en combustible. El vapor ofrece procesos de calefacción, tracción mecánica y separación de componentes y es una fuente de agua para muchas reacciones en proceso.

El vapor tiene muchas ventajas de rendimiento que lo convierten en un medio indispensable para la entrega de energía. Estas ventajas incluyen una baja toxicidad, facilidad de transportación y bajo costo con respecto a otras alternativas. El vapor tiene una cantidad significativa de energía sobre una unidad de masa 2322.12 kJ/g (555 cal/g) y 2902.65 kJ/g (693.75 cal/g), que se pueden extraer como trabajo mecánico a través de una turbina o en forma de calor para usarse en procesos.

El vapor se utiliza también en muchas aplicaciones de contacto directo. Por ejemplo; el vapor se utiliza como una fuente de hidrógeno en el metano reformado con vapor, que es un proceso muy importante para muchos productos químicos y aplicaciones de refinado de petróleo. El vapor también se utiliza para controlar las presiones y temperaturas de muchos procesos químicos. Otras aplicaciones importantes del vapor son para quitar los contaminantes de un fluido de proceso, para facilitar los fraccionamientos de los componentes de hidrocarburos y para secar todo tipo de productos de papel.

¹⁷ Partes por millón. Es una unidad de medida de concentración. Se refiere a la cantidad de unidades de una sustancia (agente, etc.) que hay por cada millón de unidades del conjunto.

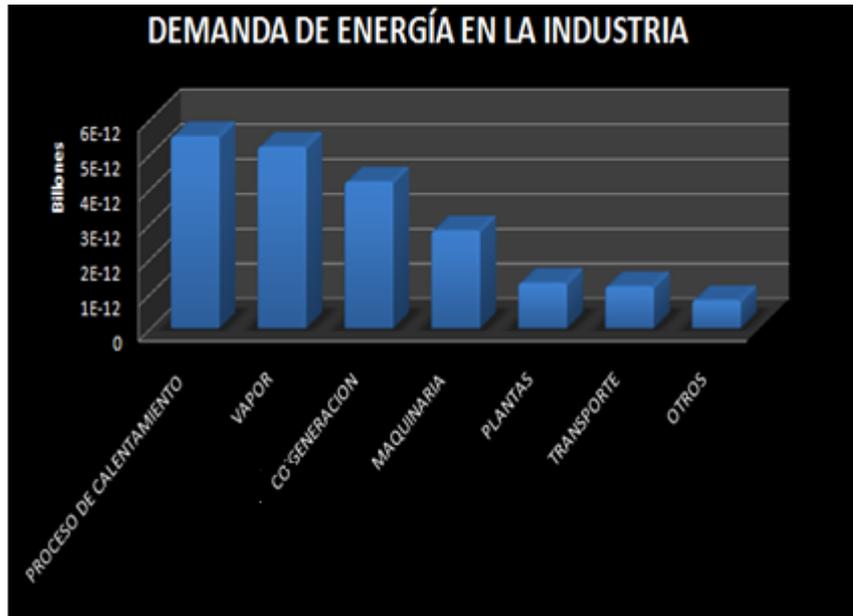
El uso del vapor en las industrias del futuro¹⁸ es especialmente significativo. Por ejemplo la industria de pulpa y papel utilizaron aproximadamente 2317 billones de joule, (2.197 billones de BTU) de energía para generar vapor, que representa alrededor del 83% de la energía total utilizada en esta industria. La industria de productos químicos utilizó aproximadamente 1957 billones de Joule, (1.855 billones de BTU) de energía para generar vapor, que representa alrededor del 57% de la energía total utilizada en esta industria. La industria petrolera utilizó sobre 1448 billones de Joule, (1.373 billones de BTU) de energía para generar vapor lo que representa alrededor del 42% de la energía utilizada en esta industria¹⁹.

La industria química depende en gran medida de vapor para aplicaciones de procesos. El vapor es una fuente de energía principal para los procesos químicos industriales. Proporcionan energía para el proceso de calefacción, control de presión, unidades mecánicas y la separación de componentes y, es también una fuente de agua para muchas actividades industriales y las reacciones químicas. La popularidad de vapor como fuente de energía se debe a sus muchas ventajas, que incluyen baja toxicidad, facilidad de transporte, alta eficiencia, alta capacidad calorífica y los costos de producción bajos en relación con otros medios de transporte de energía.

Un estudio realizado en 1997 por el Instituto de Investigación del Gas, indica que la producción de vapor en la industria ha sido el segundo más intenso de consumo de energía de todas las aplicaciones de los procesos de la industria manufacturera, como se muestra en la gráfica 2.1.

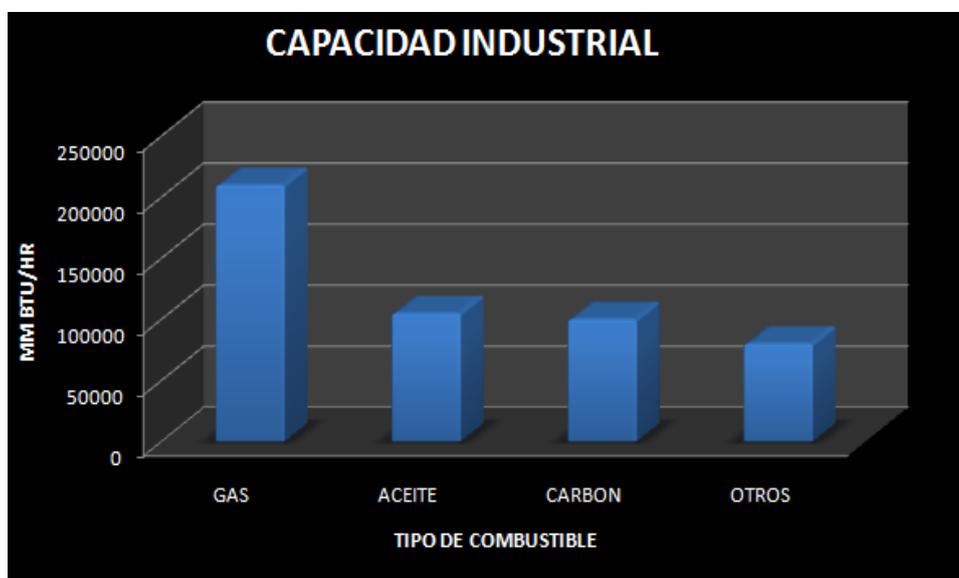
¹⁸ Departamento de la Industria de Energía del Futuro (IOF) son: productos químicos, aluminio, forestales, vidrio, fundición de metales, minería, refinado del petróleo y el acero.

¹⁹ Corporación Dinámica de Recursos.



Grafica 2. 1 Consumo de energía.

De acuerdo a la gráfica 2.1, la producción de vapor y los procesos que utilizan vapor son responsables del consumo de más de 5275 billones de J, (5 billones de BTU) de la energía en la industria manufacturera. De esta cantidad, la industria química consume alrededor de 1624 billones de J, (1.54 billones de BTU) o casi el 30% de la energía del vapor utilizada por la industria. El gas natural es la fuente de combustible dominante de los sistemas de proceso del vapor, como se muestra en la gráfica 2.2.



Grafica 2. 2 Consumo de combustibles.

Debido al aumento de la volatilidad del mercado de combustibles fósiles, medidas de eficiencia energética deben ser adoptadas para garantizar que el vapor siga siendo una fuente de energía económicamente favorable en el futuro.

Muchas industrias han instalado equipos muy eficientes. Para ello, han aplicado la eficiencia de la energía y es la medida mejor conocida como la práctica de ahorrar energía. Con el uso simultáneo de la avanzada tecnología, las nuevas prácticas de operación e implementación han reducido de un 20% a un 30% en costos de energía.

Otros procesos en los que está involucrado el vapor es para la generación de energía eléctrica, producción de aire para procesos, limpieza de loops de agua, entre otros, en el cual se utiliza turbinas de vapor.

2.3.1 Tipos de vapor.

Las propiedades del vapor varían enormemente dependiendo de la combinación de las condiciones de presión y temperatura de las cuales se generó.

El vapor se divide en diferentes categorías, dependiendo de las aplicaciones de las cuales se desea usar, basadas en su estado son:

- Vapor saturado Vapor húmedo
- Vapor sobresaturado Vapor saturado seco
- Agua supercrítica Vapor recalentado

2.3.1.1 Vapor saturado.

Este es el tipo de vapor más común. El vapor en el estado de saturación está compuesto tanto de agua en fase líquida como en fase gaseosa. En otras palabras, la tasa de evaporación es igual a la de condensación. El vapor generado en una caldera es fundamentalmente vapor saturado. Este tiene muchas características que lo hacen una excelente fuente de calor y por lo tanto es muy utilizado ampliamente como fuente de calor entre los 373 K, (100 C) y 473 K, (200 C).

El vapor saturado es ampliamente utilizado como fuente de calor por las siguientes razones:

- Mejora la calidad del producto y la productividad.
- La presión y temperatura pueden ser establecidas con precisión.
- Alta eficiencias de transferencia de calor.
- Es seguro y de bajo costo.

Dicho lo anterior, es necesario tener en cuenta lo siguiente cuando se calienta con vapor saturado:

- Las pérdidas de calor por radiación provocan que parte del vapor se condense, formando condensado, lo cual debe ser retirado por medio de las instalaciones de trampas de vapor en las líneas que lo transportan.
- La eficiencia del calentamiento se ve afectada si se uso otro vapor en lugar del vapor extremadamente seco.
- Si la presión cae, provocadas por fricción en las tuberías, etc., es posible que la temperatura también caiga.

2.3.1.2 Vapor sobresaturado.

Si el vapor producido en una caldera se expone a una superficie con una temperatura más alta, su temperatura aumenta por encima de la temperatura de evaporación. El vapor es luego descrito como sobresaturado por el número de grados de temperatura del cual ha sido calentado a más temperatura de saturación.

El calentamiento no puede impartirse al vapor, mientras que todavía este en presencia de agua, ya que cualquier calor adicional simplemente se evapora más agua. El vapor saturado se debe pasar a través de un intercambiador de calor adicional.

El vapor sobresaturado tiene sus aplicaciones en las turbinas de donde se dirige el vapor por las boquillas en un rotor, haciendo que el rotor gire.

2.3.1.3 Agua supercrítica.

Para obtener agua supercrítica, se emplea el mismo principio que se aplica a una olla de presión en la cocina: cuando aumenta la presión normal del agua en un recipiente cerrado, esta se calienta. A medida que el agua líquida se expande, muchas de sus moléculas se convierten en vapor y se eleva por encima del líquido. La densidad de vapor por consiguiente aumenta, mientras que la densidad del líquido disminuye. Finalmente, cuando la presión alcanza 220 veces o más de la presión atmosférica normal, el líquido y las densidades del vapor son idénticos. El líquido y el vapor se han convertido en agua supercrítica.

En otras palabras, al aumentar considerablemente la presión y temperatura del agua se alcanza el punto crítico. En este punto la presión es incapaz de impedir la ebullición. Si la temperatura es superior a los 647 K (374 C) el agua hierve y en este punto la presión es superior a la presión atmosférica habitual. Estos valores son la presión crítica y la temperatura crítica del agua, por encima de éstos tenemos agua supercrítica. Por encima de la presión y la temperatura crítica 22392.82 kPa (3247.8 psi) y 647 K (374 C) el agua no se comporta ni como líquido ni como gas, comparte propiedades de ambos: como el vapor, el agua supercrítica ocupa todo el volumen de un recipiente que la contenga y disolverá sustancias, al igual que lo hace el agua líquida.

El agua supercrítica tiene algunas propiedades muy inusuales, tanto las propiedades de los gases de ser capaz de penetrar cualquier cosa y la propiedad de ser líquido capaz de disolver los materiales en sus componentes. Por ejemplo, el petróleo no puede ser disuelto en agua normal, pero el agua supercrítica se comporta como un disolvente orgánico. Los componentes orgánicos pueden ser disueltos en ella.

Por lo tanto, un incinerador de agua supercrítica se podría utilizar para destruir las dioxinas y otros materiales ambientales hostiles. Este tipo de incinerador sería del tipo cerrado, sin emisiones a la atmósfera. Los productos únicamente serían agua, dióxido de carbono y ácidos inorgánicos, los cuales pueden ser eliminados de forma sencilla y fácil.

3. Descripción de la caldera (Caso específico)

En éste capítulo se presenta una descripción detallada de la caldera, sus partes principales y los interlocks de seguridad para su buen funcionamiento y la seguridad de los operadores, haciendo mención del código A.S.M.E la cual controla y regula los recipientes a presión y comúnmente a los intercambiadores de calor.

3.1 La industria petroquímica

La industria petroquímica es una plataforma fundamental para el crecimiento y el desarrollo de importantes cadenas industriales como son la textil y del vestido, la automotriz y del transporte, la electrónica, la de construcción, la de plásticos, farmacéutica, la química, entre otra.

La industria petroquímica es una unidad de procesamiento para la obtención de acrilonitrilo y ácido cianhídrico usando el proceso catalítico de la Estándar Oil Company (SOHIO), mediante propileno, amoníaco y aire, como materias primas, el cual está dividido en las secciones de reacción, recuperación, purificación, almacenamiento y tratamiento de desechos. Así mismo, la planta de servicios auxiliares cuenta con una unidad desmineralizadora de agua, caldera de vapor con flujo de masa de 35×10^3 Kg/hr., con una presión de 4118 kPa (597.38 psi) y una torre de enfriamiento.

La caldera, que es utilizada en servicios generales, produce el vapor para hacer funcionar las turbinas de vapor, para calentamiento de equipos para los procesos, limpieza de tuberías de circuitos de agua y productos, entre otros.

Las dos turbinas de vapor GT-101 y GT-140, utilizado en los procesos, su única finalidad es la de generar aire el cual interviene como materia prima en el proceso de reacción para la obtención del acrilonitrilo. Las turbinas, tienen las siguientes características:

Turbina GT-101

- Presión de vapor de entrada: 42 kg/cm^2 (4118 kPa,)
- Temperatura de vapor de entrada: 616.16 K, (343 C).
- Potencia: 3420 kw.

- Velocidad: 5775 rpm.

Turbina GT-140

- Presión de vapor de entrada: 42 kg/cm^2 (4118 kPa,)
- Temperatura de vapor de entrada: 616.16 K, (343 C).
- Potencia: 910 kw.
- Velocidad: 11856 rpm.

Hay otras turbinas de vapor, que no son razón de estudio, son utilizadas también para generar trabajo mecánico utilizado en el movimiento de bombas para el movimiento de fluidos como agua, producto, entre otros, pero ya son con vapor de mediana y baja, esto es, el vapor de alta ha pasado por condensadores de vapor para reducir su temperatura y su presión.

La razón por la cual es utilizado el vapor como medio de movimiento de turbinas de vapor es por su fiabilidad, disponibilidad y viabilidad económica, favorable en virtud de determinadas condiciones. Importantes factores son el bajo costo de la generación del vapor y el precio neto de la electricidad.

3.2 Características de la caldera tipo paquete marca Foster Wheeler.

Las calderas de tipo paquete, corresponde a una caldera completa con todos sus accesorios, quemador para la combustión de gas, bomba de agua y controladores automáticos, todos montados como una unidad en una base compacta para transporte y ensamblada en fábrica.

Los controladores automáticos, se refieren a las válvulas y componentes más importantes que integran a la caldera por mencionar algunos: motor del ventilador del tiro forzado, transformador de ignición, detector de llama, etc., incluyendo sin restricción, los controles eléctricos o aquellos monitoreados por el relevador de programación.

La caldera de tipo paquete marca Foster Wheeler, modelo 5060, como se muestra en la figura 3.1, está constituida por un quemador delta nox30, ventilador de alta eficiencia a prueba de explosión, un economizador kentube y combustible de gas natural.



Figura 3. 1 Caldera tipo paquete.

Las características principales de la caldera tipo paquete izquierda son:

- Capacidad: 35×10^3 kg/hr
- Máxima presión de vapor: 52 kg/cm^2 (739.61 psi, 5049 kPa)
- Presión de operación: 42 kg/cm^2 (597.24 psi, 4117 kPa)
- Temperatura de operación: 616.16 K, (343 C)
- Temperatura de agua de alimentación: 376 K, (102.78 C)
- Temperatura ambiente máx.: 308 K, (35 C)
- Temperatura de aire de combustión: 300 K, (27 C).
- Banco generador: 47.7 kg/cm^2 (4677 kPa)
- Economizador: 56.33 kg/cm^2 (5524 kPa)

La caldera tipo paquete es del tipo acuotubular, se caracteriza porque la llama de los quemadores se forma dentro de un recinto formado por paredes tubulares en todo su entorno, que configuran la cámara de combustión, pasando los humos generados por el interior de los pasos siguientes, cuyos sucesivos recintos están también formados por paredes tubulares, en su mayoría.

Una de las características de esta caldera es que todos los tubos que integran su cuerpo, están llenos de agua, al menos, llenos de mezcla agua-vapor en los tubos hervidores, en los que se transforma parte del agua en vapor cuando genera vapor como fluido final de consumo.

La caldera cuenta con dos calderines uno superior y otro inferior. El calderín superior trabaja como separador del vapor generado y el inferior como distribuidor del agua a través de los tubos hervidores.

También dispone de un paquete tubular de precalentamiento del agua de alimentación, llamado economizador, que se encuentra integrado en la caldera, en la parte de afuera de la misma, instalado por las siguientes razones fundamentales:

- Disminuir la temperatura de los gases de chimenea.
- Mejorar al reducir el exceso de aire.
- Ahorro de dinero en el combustible.
- Incrementar la capacidad de evaporación de la caldera.
- Reducir el costo de la energía en el punto en que se usa.

Para llevarse a cabo la combustión, la caldera cuenta con un ventilador de tiro forzado de alta eficiencia a prueba de explosión, que regula la entrada de oxígeno, dependiendo de la demanda, a través de una cámara de aire en la estructura de la caldera para iniciar la combustión plena de una mezcla de gas y oxígeno.

Se utiliza un ventilador de tiro forzado de alta eficiencia para reducir el consumo de energía eléctrica, resultando con esto una economía máxima de operación.

El flujo de aire se divide, a través de un difusor o impulsor, creando dos corrientes de aire una primaria y una secundaria:

- El aire primario se mezcla con el combustible creando un medio rico en combustible para la combustión inicial y,
- El aire secundario fluye alrededor del difusor y se mezcla con el aire primario y el combustible para completar la combustión.

En lo que se refiere a la quema de los gases que se producen por medio de la combustión, cuenta con un quemador Delta Nox30, que tiene la función de disminuir los gases contaminantes que desecha al medio ambiente, reduciendo estos hasta en un 80 %.

Una representación gráfica de la caldera de tipo paquete, acuotubular, se representa en la figura 3.2.

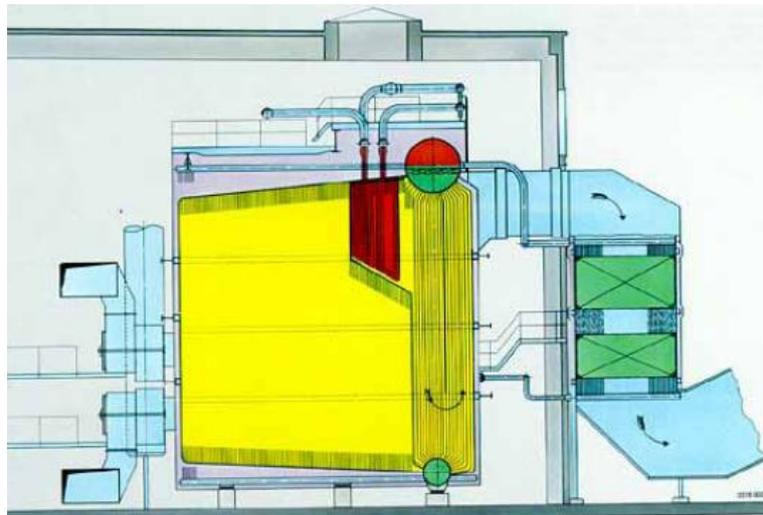


Figura 3. 2 Caldera tipo paquete acuotubular.

3.3 Equipos auxiliares de la caldera.

Entre los equipos auxiliares esenciales para la operación de la caldera se encuentran los destinados al suministro de aire a la cámara de combustión (hogar) y la evacuación de los gases productos de la combustión. Estos equipos están representados por chimenea, ductos y ventilador de tiro forzado, bombas de alimentación, instrumentos de medición y control.

3.3.1 Chimenea.

Las chimeneas, como se muestra en la figura 3.3, tienen por objetivo desechar los gases de la combustión a una altura suficiente a fin de evitar, en lo posible, las molestias inherentes. Mientras más alta sea la chimenea más efecto de tiro dispondrá para la extracción de los gases del hogar. El tiro debe ser el suficiente para mantener una ligera succión en el hogar cuando la caldera opera a pleno régimen, a no ser que este diseñada para operar bajo presión.

La mayoría de los gases de combustión forman depósitos que al enfriarse son corrosivos a los metales, por esta razón, en caso de usar una chimenea metálica será indispensable dotarla con un revestimiento que evite la corrosión a la parte superior de la chimenea y el sobrecalentamiento en la porción inferior.

La acción corrosiva de los gases dependen de la cantidad de vapor de agua y bióxido de azufre; así como de la temperatura a la cual los gases son enfriados a su paso por la caldera, economizador, calentador de aire, así como por la radiación de los ductos y la chimenea.



Figura 3. 3 Chimeneas.

3.3.2 Ductos.

Los ductos de conexión entre la chimenea y la caldera, como se muestra en la figura 3.4, deben inspeccionarse asegurándose de su estanqueidad, adecuados soportes, juntas de expansión y especialmente la correcta unión de la chimenea y en la caldera; las rejillas mariposa de los tiros deben operar sin dificultades asegurándose de que cierren por completo y que las tolerancias indicadas para la dilatación a las altas temperaturas se consideraron.

Cuando la caldera se ponga fuera de servicio los ductos se limpiarán, desde luego, para prevenir la corrosión del metal por el azufre contenido en las cenizas.



Figura 3. 4 Ductos para vapor.

3.3.3 Ventilador de tiro forzado.

Se llama ventilador de tiro forzado al ventilador que se encarga de suministrar una corriente de aire a la caldera, necesaria para realizar la combustión.

Existen tres tipos de tiros forzados los cuales son:

- Tiro forzado: Este sistema es que hace entrar aire a la caldera mediante ventiladores.
- Tiro inducido: Extrae los gases de la cámara de combustión y los expulsa hacia la chimenea, pero el inconveniente que tiene es que el ventilador que extrae el aire de la cámara se encuentra trabajando en una zona conflictiva por la elevada temperatura, trabaja en una zona donde hay gases corrosivos y hay sólidos como cenizas, que pueden llegar a estropear las paletas de los ventiladores.
- Tiro equilibrado: Se utilizan los dos tiros anteriores, el tiro forzado y el tiro inducido, con esta combinación se consigue no presurizar la cámara de combustión. Este tiro es utilizado en calderas muy largas, ya que hay pérdidas de carga muy considerables (pérdidas de presión), si solo colocásemos tiro forzado aumentaríamos la presión de la cámara de combustión y si solo colocásemos tiro inducido crearíamos mucho vacío, que provocaría deformaciones en la cámara de combustión.

La eficiencia de los ventiladores de tiro forzado deben ser de un 83 % y más recientemente se ha incrementado la eficiencia, con la caja de diseño adecuada, de entrada con aspas que dan vueltas y con esto pueden alcanzar el 90% de su eficiencia total. Los impulsores del ventilador se construyen con aspas rectas, inclinadas hacia atrás, para facilitar la liberación de las partículas de polvo de ceniza que reducen la erosión del impulsor.

El ventilador utilizado en nuestra caldera es de Tiro Forzado de la marca Flakt Woods, como se muestra en la figura 3.5, con las siguientes características:

- Manejo de volumen: 13.52 m³/seg.
- Temperatura de operación: 300 K, (27 C).
- Velocidad de operación: 1780 rpm.
- Consumo de potencia: 125 HP.

➤ Rotación: CCW²⁰.



Figura 3. 5 Ventilador de tiro forzado.

3.3.4 Bombas de agua de alimentación.

La bomba de agua de alimentación, como se muestra en la figura 3.6, es quizá el equipo auxiliar más importante en lo que se refiere a la seguridad de la operación de la caldera. Las bombas controlan la cantidad de agua que alimenta a la caldera. Las bombas utilizadas para este fin, es del tipo centrífuga.

Las unidades de tamaño mayor para altas presiones del tipo de doble cuerda y construcción de barril, operan por lo general, a altas velocidades con tolerancias muy exactas y deben ser cuidadosamente armadas y operadas a fin de que funcionen en forma satisfactorias.



Figura 3. 6 Bomba de agua de alimentación.

²⁰ CCW Rotación de sentido opuesto a las manecillas del reloj, por sus siglas en ingles (Counter-Clockwise).

3.3.5 Calentadores de aire.

Los calentadores de aire, como se muestra en la figura 3.7, son usados para recuperar el calor de los gases de la combustión de la caldera e incrementar la eficiencia de la misma. Este calor absorbido por el calentador de aire se transfiere al aire de combustión antes que el aire entre a los quemadores y a la caldera. Estos calentadores de aire, además de mejorar la eficiencia mediante la recuperación del calor perdido, también pueden mejorar la combustión de algunos combustibles mediante la generación de altas temperaturas de la cámara de combustión.

Los calentadores de aire o pre-calentadores de aire en una caldera grande justifican su uso hasta en un 10% de la eficiencia de la caldera. Su funcionamiento es tan crítico que apenas un cambio mínimo en la temperatura de los gases de salida puede alterar la eficiencia de la caldera, representando millones de pesos al año en consumo de combustible.



Figura 3. 7 Calentador de aire.

3.3.6 Distribución del vapor en el proceso.

El sistema de distribución de vapor es fundamental, como se muestra en la figura 3.8, ya que lleva el vapor a presión, producido en la caldera, a los diferentes destinos. Los sistemas, a menudo, tienen numerosos despegues de líneas que operan a diferentes presiones de vapor, que se alcanzan mediante el uso de válvulas de aislamiento, válvulas de presión, entre otros.

El objetivo de cualquier sistema de distribución es entregar a los usuarios finales una cantidad suficiente de vapor, a una determinada presión y temperatura. Un sistema eficiente requiere equilibrar la presión, un buen drenaje de condensado y un adecuado aislamiento.



Figura 3. 8 Tipo de distribución de vapor a proceso.

3.3.7 Tratamiento de agua de alimentación.

Otro punto importante que no se debe perder de vista, es el tratamiento del agua de alimentación a la caldera, teniendo con esto calidad en el agua, la cual es casi tan importante como la cantidad. Aunque las dificultades causadas por depósito en las superficies de calefacción de la caldera o por arrastre de agua, pueden evidenciarse más lentamente que las averías causadas por niveles excesivamente altos o bajos y ser tan graves como éstas. Por lo tanto, el agua para alimentar una caldera debe encontrarse limpia, suave y libre de sílice.

La vida útil de una caldera está asociada con la calidad del agua con la que se alimenta. Una caldera que opera sin apropiado control de las propiedades del agua de alimentación pone en riesgo a la caldera.

Adicionalmente, un tratamiento de agua deficiente puede resultar en un mayor consumo de combustible, agua y de productos químicos; debido a incrustaciones y purgas excesivas. Por lo tanto, un buen tratamiento de agua es necesario para que una caldera opere en forma segura y confiable.

El estudio del tratamiento de agua de alimentación para la caldera no será realizado en está trabajo, únicamente se hace mención por la importancia que desempeña para la seguridad y buen funcionamiento de la misma.

3.3.8 Controles y componentes.

Los controles de la caldera se refieren a las válvulas y componentes más importantes, incluyendo sin restricción, los controles eléctricos o aquellos monitoreados por el relevador de programación. Como se muestra en la figura 3.9, el cuarto de control de la caldera y su tablero de control son los básicos proporcionados por el proveedor.



Figura 3. 9 Tablero de control.

Los controles con los que cuenta la caldera son, básicamente, los controles con los cuentan todas las calderas, estos son:

- Control del ventilador de tiro forzado.
- Arranque del ventilador de tiro forzado.
- Transformador de ignición.
- Control de la llama.
- Luces indicadoras, que proveen indicación visual de la operación de la caldera (falla de la llama, demanda de la carga, válvula de combustible, bajo nivel de agua).
- Controles de vapor
 - Control de la presión máxima de operación.
 - Control modulador de la presión.
 - Control de la bomba y cierre de bajo nivel de agua.

- Control de agua de alimentación
 - Control de temperatura
 - Control del nivel del agua.
- Control del combustible.
 - Válvula de gas piloto.
 - Válvula reguladora de presión de gas.
 - Válvula de gas principal.
 - Interruptor de baja presión de gas.
 - Interruptor de alta presión de gas.

3.3.8.1 Controles de seguridad.

Estos controles son los más básicos y más importantes que deben tener la caldera, ya que limitan la entrada de energía y cierran los equipos ante cualquier situación de inseguridad. Entre estos controles, tenemos:

- Limitadores de presión o temperatura.
- Controles de corte de combustión por bajo nivel de agua.
- Sistema de control por fallo de llama.
- Control de encendido automático.
- Control de corte de combustible.
- Control interconectado de presión de aire y combustible.
- Control regulador de agua de alimentación.

Un dispositivo enormemente importante, son las válvulas de seguridad (o de sobrepresión), puesto que a no ser que se considere otro sistema de control, será la última medida de seguridad contra una explosión.

Los controles de seguridad nos previenen contra:

- Sobrepresión.
- Sobre calentamiento.
- Explosiones.

Estos accidentes se consideran mayores puesto que pueden causar grandes pérdidas materiales y lo que es más grave pérdidas de vidas.

3.3.9 Purga de la caldera.

La purga del agua de la caldera es la eliminación de agua concentrada en el domo inferior y su remplazo con agua de alimentación, a fin de disminuir la concentración de sólidos en el agua de la caldera.

Los sólidos penetran con el agua de alimentación, aunque ésta haya sido tratada antes del uso, por medio de procesos externos diseñados para remover sustancias indeseables que contribuyen a la formación de incrustaciones y sedimentos.

Las incrustaciones tienen un bajo coeficiente de transferencia de calor y actúan como barreras aisladoras. Esto retrasa el paso de calor, que no sólo resulta en menor eficiencia de operación y consecuentemente mayor consumo de combustible pero, de manera más importante, puede causar el recalentamiento del metal de la caldera. Esto puede producir fallas en la tubería o en otros metales del recipiente de presión, causando reparaciones y paralizaciones costosas.

Los sólidos tales como las sales de sodio y el polvo disperso no forman incrustaciones fácilmente pero, tan pronto se evapora el agua de la caldera, el agua sobrante es más condensada con los sólidos. Si se permite que esta concentración se acumule, producirá espuma y arrastre de agua y el sedimento puede causar depósitos perjudiciales originando el recalentamiento del metal.

La disminución o eliminación de esta concentración requiere que el agua de la caldera sea purgada. Hay dos tipos principales de purgas: purga manual y purga continua.

- Purga manual: La purga manual o de sedimento es necesaria para la operación de la caldera sin considerar si se usa purga continua o no.

Los orificios de la purga están localizados en la parte más baja de la caldera, de forma que, además de bajar la concentración de sólidos disueltos en el agua del recipiente de presión, también remueven una parte del sedimento acumulado en la parte más baja del domo.

Los componentes generalmente consisten en una válvula de acción rápida y una válvula de cierre.

- Purga continua: La purga continua sirve para la eliminación continua de agua concentrada. Una válvula de orificio regulada se usa para permitir el flujo continuo, pero controlado, del agua concentrada. El ajuste de la válvula se realiza periódicamente para aumentar o disminuir la cantidad de purga de acuerdo con los resultados del análisis del agua.

Desde el punto de vista de control, economía y resultados se recomienda las purgas frecuentes y cortas a purgas ocasionales prolongadas, especialmente cuando el contenido de sólidos suspendidos en el agua es elevado. Con purgas frecuentes y cortas se mantiene una concentración más uniforme del agua.

3.4 Sistema de seguridad (interlocks).

Los sistemas de seguridad de la caldera, están diseñados de forma que un fallo individual en el sistema no impida la ejecución de un disparo. Esto genera las alarmas necesarias para indicar mal funcionamiento del equipo, condiciones de riesgo o mala operación. Además de la vigilancia continua del estado general de la caldera, se tienen los permisivos para la secuencia de encendido y apagado de los quemadores e ignitores.

El sistema de seguridad de la caldera, en forma general, es la siguiente:

- Disparo de la caldera: Cualquier situación de riesgo para la caldera o el proceso provocará un disparo de la misma. Dicho disparo provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustión, así como la desenergización del relé maestro de corte de combustible, del equipo de fuego móvil.
- Barrido o purga de caldera: Después de cualquier disparo o arranque de caldera se debe realizar un barrido del hogar y de todos los conductos asociados, con el propósito de evitar una atmósfera rica en combustible, que pueda provocar una explosión al arranque de la caldera.
- Encendido y apagado de los quemadores: Esta secuencia se encargará de la puesta en servicio de los quemadores, asegurando que todos los permisivos necesarios para ello se van cumpliendo adecuadamente. Así mismo, se encargará de la vigilancia permanente del estado de los quemadores, de forma que provocará el disparo de los mismos ante una anomalía en las señales de proceso (perdida de llama, alta/baja presión de combustible, etc.) cortando inmediatamente la aportación de combustible al hogar.

3.4.1 Barrido de disparo.

Después de cada disparo de la caldera se debe realizar el barrido con el ventilador de tiro forzado (VTF), para remover cualquier resto de combustible gaseoso o suspendido y remplazarlo por aire.

3.4.1.1 Permisivos.

Primero se debe comprobar que se satisfacen todos los permisivos del arranque del VTF, después se pone en marcha. Para poder realizar el barrido de la caldera se deberán cumplir las siguientes condiciones:

- Caldera disparada.
- Flujo de aire combustión no bajo.
- Todas las válvulas de corte de combustión cerradas.
- VTF en marcha.
- Presión hogar no alta.
- No hay disparo de emergencia.
- Alabes del VTF no forzados a posición completamente abierta (tiro natural).
- No bloqueo de alabes del VTF. Situación que se produce ante un disparo de la caldera debido a un muy bajo flujo de aire de combustión o a una muy baja relación combustible-aire.
- No hay llama detectada.

Una vez cumplidas las condiciones anteriores, se iniciará entonces la secuencia de barrido.

3.4.2 Disparo de caldera.

Cualquier disparo de la caldera provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustible así como la des-energización del relé (MFT).

3.4.2.1 Permisivos.

Cualquiera de las siguientes causas provocará un disparo de la caldera:

- Relación aire-combustible muy bajo.
- Nivel del calderín bajo.
- Presión del hogar alta.
- Fallo del sistema de alimentación.
- VTF no está en marcha.

- Flujo de aire-combustible bajo.
- Disparo de emergencia.
- Perdida de todas las llamas.
- Última válvula de combustible cerrada.
- Presión del vapor del calderín alta.

3.4.3 Ignitor.

El ignitor se pondrá en servicio cuando sea requerido para el encendido del quemador al actuar sobre el pulsador del encendido del quemador.

3.4.3.1 Permisivo de encendido.

El ignitor podrá ser puesto en servicio si las siguientes condiciones están presentes:

- No existen condiciones de disparo de emergencia del ignitor.
- Todas las válvulas de combustible están cerradas y no hay llama en caldera o algún quemador está en servicio.
- No hay llama de ignitor detectada o algún quemador está en servicio.
- No existe condiciones de disparo de caldera.

3.4.3.2 Apagado del ignitor.

El ignitor se apagará cuando este no sea requerido por el quemador o cuando ocurra cualquiera de las siguientes condiciones de disparo de emergencia del ignitor:

- Disparo de la caldera.
- Fallo de llama del ignitor.

3.4.4 Quemador.

El quemador es el último paso que se sigue para poner en marcha la caldera, con éste se inicia el proceso de generación de vapor.

3.4.4.1 Permisivo de encendido.

Para iniciar el proceso de encendido del quemador, se deben satisfacer los siguientes permisos de encendido:

- Llama de quemador no detectada e ignitor listo para encender.
- No hay disparo de caldera.
- Presión de suministro de gas no está baja.

- Válvula de corte del quemador de gas cerrada.
- Condiciones de disparo del quemador de gas no presentes.
- Ningún quemador se encuentra en secuencia de encendido.
- Válvula de control de gas en posición de encendido.

3.4.4.2 Apagado del quemador.

El apagado del quemador de gas se provocará cuando el operador actúe sobre el correspondiente pulsador de apagado o por cualquiera de las siguientes condiciones de disparo, haciendo que sus válvulas de corte se cierren:

- Disparo de la caldera.
- Baja presión de gas (3 seg, después de la apertura de las válvulas de corte de gas).
- Alta presión de gas.
- Condición de disparo de gas (input excedido).
- Fallo llama quemador de gas.
- Fallo de encendido de ignitor al ser requerido por la secuencia del quemador.
- Fallo de válvula de corte de gas.

4.- Variables de proceso y su medición.

Un proceso es cualquier operación o serie de operaciones que provocan un cambio físico o químico en un material o mezcla de materiales. El material que entra al proceso se conoce como entrada o alimentación al proceso; mientras que aquel que lo abandona se la llama salida o producto. Una unidad de proceso es un aparato o equipo en el cual se lleva a cabo una de las operaciones que forman parte del proceso. Cada unidad de proceso lleva asociada una serie de entradas y salidas de las corrientes de proceso, que consisten en los materiales que entran y salen de la unidad.

Las variables de procesos son magnitudes tales como: presión, temperatura, flujo, densidad, etc., que van a ser controladas o supervisadas en una unidad de proceso las cuales nos ayudarán a tener bajo control las entradas y las salidas de los materiales. El entendimiento del comportamiento de las variables de proceso involucradas en una medición permite una adecuada selección de la instrumentación a ser implementada en un proceso industrial.

También son necesarios otros términos que se utilizan en el campo de control de procesos. El primero es variable controlada, está es la variable que se debe mantener o controlar dentro de un valor deseado. El segundo término es punto de ajuste (set point), que es el valor que se desea que tenga la variable controlada. El tercer término es la variable manipulada, que es la variable que se utiliza para tener a la variable controlada en el set point. Finalmente, cualquier variable que ocasione que la variable de control se desvíe del set point se define como perturbación o trastorno; en la mayoría de los procesos existe una cantidad diferente de perturbaciones, por ejemplo: temperatura de entrada en el proceso, el flujo en el proceso, cantidad de energía del vapor, etc.

4.1 Variables de proceso de una caldera.

El sistema de control de una caldera es la herramienta mediante la cual se consiguen los equilibrios de masa y de energía ante las variaciones de la demanda de los consumidores. La energía y la masa introducidas en la caldera deben ser reguladas para conseguir las condiciones de salida deseadas. Las medidas en las variables de procesos darán al sistema la información necesaria para ello.

Desde el punto de vista del equilibrio energético se debe generar una demanda de carga (fuego), de la cual se genera a su vez las demandas de combustible y aire, que proporcionan el aporte de energía necesario para mantener el equilibrio respecto a la demanda del vapor. El control del nivel será el encargado de mantener el equilibrio entre la masa saliente en forma de vapor y la entrada en forma de agua. La temperatura del vapor será mantenida mediante el control de temperatura de éste, con su influencia, tanto en el equilibrio de energía como de masa.

En el sistema de control de una caldera, las diferentes variables interaccionan sobre los diferentes subsistemas. Así, la demanda de carga influirá sobre la temperatura de vapor, el flujo de agua sobre la presión de vapor que a su vez es el causante de la demanda de carga. Por lo tanto, todo el sistema debe ser coordinado e implementado de forma que minimice los efectos de dichas interacciones, puesto que el propio diseño del sistema las puede aumentar o disminuir.

Los sistemas de encendido y protección de la Caldera Tipo Paquete están constituidos básicamente por la lógica de Operación y Detectores de Flama, lo que implica el manejo de temperatura, presión y flujo y tienen por objeto prevenir, en alguna situación riesgosa, a la operación continua de las calderas y asistir al operador durante el arranque y paro de quemadores y equipo asociado.

Para el buen funcionamiento de la caldera y para la protección de la misma se requiere de algunas variables dentro de las cuales están las siguientes:

- Variable flujo: Estas variables nos permitirán controlar el flujo del combustible que entra al quemador, dependiendo de la demanda. Controlaremos el flujo de agua de alimentación que entra a la caldera también dependiendo de la demanda de vapor.
- Variable presión: Esta variable nos permitirá controlar la presión dentro del hogar de la caldera, la presión del agua, del aire y del vapor, la presión en el domo, la presión de los gases emitidos por la quema del combustible y la presión del combustible.

- Variable temperatura: Esta variable nos permitirá controlar la temperatura del agua de alimentación, del agua de alimentación al economizador (tanto en la entrada como en la salida), de los gases a la salida del economizador, del vapor sobrecalentado y gases a la salida de la caldera.
- Variable nivel: Estas variables no permitirán controlar el nivel del domo vapor.

Existen otras variables asociadas a la calidad del producto detectada por medio de analizadores. Cada variable tiene su propia característica, independiente a la aplicación particular. El conocimiento de estas características es muy útil a la hora de diseñar o ajustar el lazo de control. El flujo es la variable con mayor velocidad de respuesta mientras que la calidad es la variable con mayor retardo.

Hay otras variables que se deben controlar en las calderas, que no entrarían en las variables básicas de control, pero se deben manejar por seguridad de la caldera y del entorno las cuales son:

- Variables del quemador: Estas variables nos permitirán controlar la señal flama piloto-quemador, detección de la flama y encendido del piloto.

Con el fin de llevar a cabo un eficiente sistema de medición y control, requerimos conocer conceptos básicos que nos lleven al mejor entendimiento de los sistemas de control y su aplicación así como a la selección de los instrumentos que se requerirán para nuestra caldera.

4.2. Variables de combustible.

La combustión se puede definir como la rápida oxidación del combustible. Durante el proceso de combustión se producen muchas transformaciones y reacciones químicas, dependiendo de la composición del tipo de combustible utilizado y de las condiciones en que se realiza la combustión. Básicamente, cuando se quema un hidrocarburo, el hidrógeno contenido en éste se combina con el oxígeno del aire para producir agua, el carbón se combinará con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono y, además, se liberará energía en forma de calor.

El combustible, el oxígeno, el fuego y una reacción química son necesarios para que la combustión tenga lugar. Si alguno de los elementos mencionados es eliminado, la combustión se detendrá. Durante la combustión en la caldera es importante el control del combustible, oxígeno y fuego así como también que el combustible sea quemado completamente y con esto tenga un rendimiento máximo de su energía.

Para conseguir el control y una combustión eficiente se requieren tres factores que deben ser considerados:

- El tiempo: Aunque la oxidación es rápida, varios segundos pueden ser requeridos para iniciar y completar el proceso de combustión.
- La temperatura: La temperatura varía durante el proceso de combustión con temperaturas mínimas ocurridas en el inicio y el fin.
- La turbulencia: La turbulencia es necesario para permitir al combustible se mezcle con el oxígeno.

Otro punto importante para obtener una buena eficiencia de la caldera y es necesario controlar, con bastante precisión, la cantidad de aire que se suministra al proceso de combustión:

- Demasiado aire reduciría la temperatura del hogar y arrastrará una buena cantidad de calor útil.
- Poco aire produciría una combustión incompleta, se escapará por la chimenea mucho combustible sin quemar y producirá humo.

De acuerdo con los requerimientos de NFPA²¹ 8502, un sistema de control de combustible para calderas debe cumplir, entre otros, con los siguientes requisitos de diseño:

²¹ Asociación Nacional de Protección del Fuego (National Fire Protection Association): Es la fuente autoritativa principal de conocimientos técnicos, datos y consejos para el consumidor sobre la problemática de fuego la protección y prevención.

- El control de combustión debe mantener la relación aire-combustible en un rango que asegure una combustión continua y una llama estable en todas las condiciones de operación.
- La demanda de combustión no debe incrementar nunca el flujo de combustible por encima del aire.
- La demanda de combustible no debe nunca exceder la capacidad de los ventiladores en servicios.

Bajo estas premisas, los objetivos principales del control del combustible son los siguientes:

- Mantener los flujos de aire y combustible de acuerdo con la demanda de carga de la caldera, para entregar al sistema la energía requerida para el suministro del flujo de vapor deseado, manteniendo el equilibrio energético.
- Mantener una relación entre los flujos de aire y combustible que asegure que existe oxígeno suficiente para que la combustión se produzca en forma completa y segura.
- Mantener la demanda del quemador dentro de los límites de la capacidad de operación, asegurando con ello el correcto funcionamiento de éstos.

El sistema de control del combustible para la caldera utilizará el método de límites cruzados aire-combustible (que se explicará más adelante) y tiene el propósito de mantener en operación automática la relación del aire y el combustible dentro de los parámetros fijados en la operación manual de la caldera.

4.2.1. Variables por controlar.

El sistema de alimentación del combustible hacia el quemador y el piloto debe ser controlado a fin de que el flujo sea el suficiente para transformar el agua en vapor, según las necesidades requeridas por el usuario final.

Las variables que se desean controlar para mantener el flujo de combustible adecuado a la carga de la caldera existente en cada momento, serán los siguientes:

- Para poder modular correctamente la aportación del gas, de acuerdo con la carga de la caldera, se requiere de: la medida de flujo de gas, transmisor de flujo (FT) y una válvula de control (válvula de flujo FV), con objeto de poder modificar la cantidad de flujo.
- Si las condiciones de presión y temperatura del gas pueden variar sensiblemente, es aconsejable la medición de dichas variables para la corrección del flujo del gas, si la medida de éste se obtiene de una lectura de presión diferencial.
- También se suele instalar, en paralelo con la de control principal, una válvula de control (válvula de presión PV) para asegurar la mínima expresión a quemadores (transmisor de presión PT), especialmente durante las secuencias de encendido y apagado de éstos.

Por otra parte, las variables que hay que vigilar en el sistema de la quema del combustible, desde el punto de vista de seguridad son:

- Presión de gas a piloto, (transmisor de presión PT): Ésta presión debe de asegurarnos que el gas no tiene una presión ni alta ni baja que asegure la correcta combustión.
- Presión de gas a quemador (PT): También esta presión nos debe de asegurar que la presión del gas que se entrega al quemador no debe ser ni alta ni baja, solo que asegure la correcta combustión y el no sobrepasar la aportación máxima del combustible.
- Existencia de llama (BE): Que asegure que el combustible que se está introduciendo al hogar este siendo quemado.

4.2.2 Temperatura del combustible.

La medición de la temperatura del combustible puede ser utilizada para realizar las correcciones necesarias en la medición del flujo del combustible y lograr una buena combustión, realizando la medida en la parte baja del regulador de presión del combustible.

El mantener una temperatura adecuada en el suministro del combustible nos permite mantener la viscosidad de éste dentro de un rango de trabajo imprescindible para su correcta atomización y proporcione una combustión óptima.

La temperatura es medida, generalmente, usando un termopar, sistemas térmicos de llenado o bulbos de resistencia. En las condiciones de trabajo (cuando se usan quemadores tipo C u otros combustibles pesados), también la baja temperatura del combustible puede causar una flama baja o sucia. Pero también una alta temperatura del combustible puede causar carbonización en la extremidad del quemador.

4.2.3 Flujo del combustible.

El combustible lo suministra una bomba de abastecimiento la cual proporciona parte de su descarga al quemador. El combustible excesivo se devuelve al tanque de almacenamiento a través de la válvula de escape y línea de retorno. La bomba del combustible está acoplada mecánicamente al ventilador, este dispositivo se asegura que la bomba opere solo cuando el quemador este operando.

El flujo al inyector del quemador se realiza a través de las válvulas solenoides a las cuales el control de programación energiza para abrir las válvulas o dejar sin energía para cerrarlas.

Las válvulas medidoras de combustibles y registros rotatorios de aire están siempre controlados, simultáneamente, para mantener la adecuada proporción de aire-combustible correspondientes al cambio en la demandas de la carga, por medio de un sistema de levas.

4.3 Variables de agua de alimentación.

El agua debe ser suministrada constantemente a la caldera a fin de remplazar el vapor que se está generando. Las calderas modernas tienen una reserva de agua en los domos que es relativamente pequeña, a menudo equivale a sólo uno o dos minutos de operación a pleno régimen, antes que el nivel descienda a tal punto que la circulación en los tubos de las paredes o de la caldera se vea afectada. El suministro del agua debe, por lo tanto, estar libre de la posibilidad de interrumpir y seguir con exactitud los cambios en el régimen de generación de vapor.

La presión de alimentación del agua debe ser tal que pueda forzar el paso del agua dentro de la caldera en contra de la presión del vapor, considerando la fricción en la tubería, válvulas y economizador.

El nivel del agua debe mantenerse a muy pocas pulgadas de lo normal ya que un nivel alto podría originar un arrastre de agua y dañar el sobrecalentador o la turbina; o un nivel bajo causará daños a la caldera.

En las plantas que utilizan turbinas, la energía del vapor generado por la caldera se convierte primero en energía cinética, a continuación, a la rotación mecánica y finalmente en energía eléctrica. A la salida de la turbina se alimenta el fluido (vapor) a un condensador que completa la conversión de nuevo al agua, que se pasa a continuación a las bombas de alimentación de la caldera.

En el momento que el vapor sale de la fase final de la turbina, tiende a salir casi sin toda la energía de vapor de alta con la cual salió de la caldera, por lo que pasa a un condensador donde es finalmente enfriado para convertirse nuevamente en agua la cual puede ser reutilizable para un nuevo ciclo. El condensador consta de un intercambiador de calor a través del cual se distribuye el agua fría. Una representación simplificada del circuito completo se muestra en la figura 4.1.

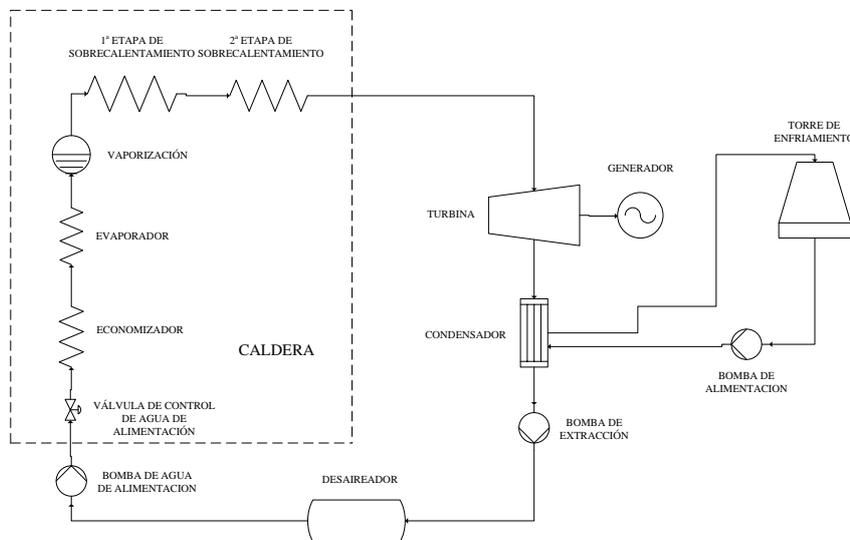


Figura 4. 1 Circuito de agua de alimentación.

El circuito mostrado en la figura 4.1, representa un sistema de control abierto, ya que el control que se tiene en este sistema es independiente de la salida del condensado, esto es, que el agua que se sale del condensador únicamente se devuelve al inicio del proceso que es la entrada a la caldera.

4.3.1 Variables por controlar.

Las medidas de flujo tienen una gran importancia dentro de los procesos ya que se utilizan habitualmente para controlar el proceso y para medir la cantidad de líquidos o gas que deben entrar o salir de un equipo o sistema, por lo que la selección de la mejor tecnología tiene una gran implicación.

En los procesos de control, la medición del flujo es imprescindible para poder realizar control automático, así como para optimizar rendimientos en las unidades de producción aplicando balances de materia.

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel de la caldera depende de múltiples factores, del tipo de caldera, de la carga, del tipo de bomba y del control de presión del agua de alimentación.

Cuando el flujo del vapor aumenta bruscamente, la presión baja, con lo que se produce una vaporización rápida que fuerza la producción de burbujas y agua, lo que da lugar al aumento aparente del nivel de la caldera. La oscilación es opuesta a la demanda y el fenómeno es importante en calderas de cierta potencia y volumen reducido, sujetas a variaciones de flujos frecuentes y rápidas.

Las tres variables que intervienen en el sistema son:

- Flujo del vapor.
- Flujo de agua de alimentación.
- Nivel del agua.

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el flujo del vapor y del agua deben ser iguales y de forma secundaria, el nivel del agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de los límites determinados.

El nivel del agua en el domo (inferior) proporciona inmediatamente un nivel de agua contenido en la caldera. Si el flujo de masa de agua en el sistema es mayor que el flujo de masa de vapor que sale de la caldera, el nivel del agua en el domo subirá. Por el contrario, si la salida del vapor es mayor que la alimentación de entrada de agua a la caldera, el nivel del agua disminuirá.

Por lo tanto, el objetivo del sistema de control de agua de alimentación es el de mantener el nivel del agua dentro del domo, aproximadamente la mitad del domo. Teniendo en cuenta este objetivo, la solución más simple es la de medir el nivel del agua en el domo y ajustar la entrega de agua para mantener el valor deseado, esto es, aumentar el flujo de agua si el nivel está bajando y disminuirlo si el nivel está aumentando.

4.4 Variables de vapor.

En la generación del vapor vemos como las plantas que lo generan, están formadas por dos o tres niveles de presión, presión de alta, presión media y presión de baja, las cuales son distribuidos según su uso o según la magnitud de la presión del vapor, de esta forma:

- Para los bloques de generación eléctrica, turbinas para accionar bombas y compresores de planta de proceso se utiliza vapor de alta.
- Para turbogeneradores eléctricos y grandes turbocompresores , se usa por lo general vapor de media y,
- Para las turbinas de menor capacidad, limpieza de tuberías, calentamiento de sistemas o equipos, etc., normalmente se utiliza vapor de baja.

El control de la presión y temperatura en las redes de distribución y aun más en la caldera de vapor, es sumamente importante, ya que exceso de estas presiones puede ocasionar un desgaste más acelerado de la tubería y aparte de esto se puede generar mucha pérdida de energía, lo cual no es conveniente para un proceso en el cual se está tratando de aprovechar la energía al máximo.

Por lo tanto, el vapor que se produce debe de mantenerse en unas condiciones óptimas de su presión y temperatura, por lo cual se deberá medir la presión al final del vapor sobrecalentado (trasmisor de presión PT) y también de su temperatura (trasmisor de temperatura TT).

5. Esquema de control.

El sistema de control de una caldera es la herramienta mediante la cual se consiguen los equilibrios de masa y de energía de la misma ante las variaciones de los consumidores. La energía y la masa introducidas en la caldera deben ser reguladas para conseguir las condiciones de salidas deseadas. Las medidas de las variables de proceso darán al sistema la información necesaria para ello. Como se muestra en la figura 5.1, es un diagrama de bloques el esquema general del control de una caldera.

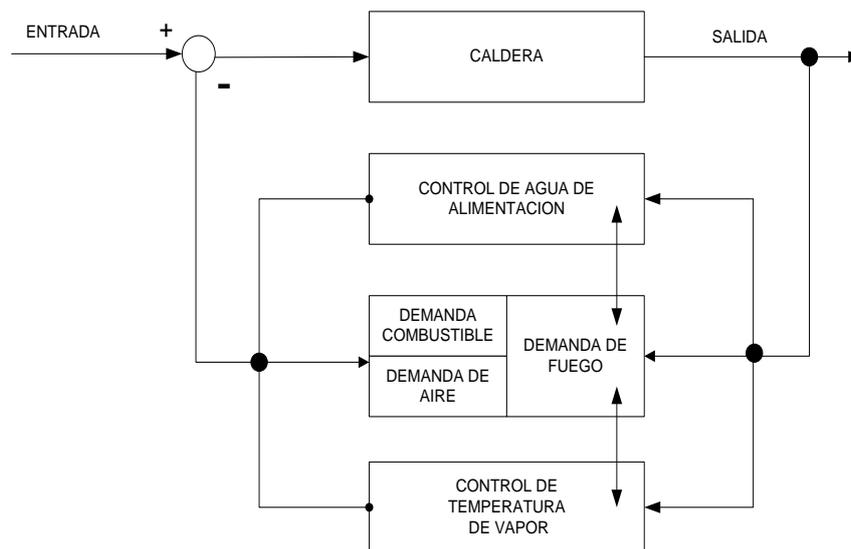


Figura 5. 1 Diagrama de bloques del control básico de una caldera.

Desde el punto de vista del equilibrio energético se debe generar una demanda de carga (de fuego), de la cual se genera a su vez las demandas de combustible y aire, que proporcionarán el aporte de energía necesario para mantener el equilibrio respecto a la extracción del vapor. Por lo tanto, de las necesidades de vapor que requiera el usuario final será la demanda del fuego que el quemador debe proporcionar a la caldera para la generación del vapor.

El control del nivel será el encargado de mantener el equilibrio entre la masa saliente en forma de vapor y la entrada en forma de agua. La temperatura del vapor será mantenida mediante el control de temperatura de éste, con su influencia, tanto en el equilibrio de energía como de masa.

En el sistema de control de la caldera, las diferentes variables interactúan sobre los diferentes subsistemas. Así, la demanda de carga influirá sobre la temperatura de vapor, el flujo de agua sobre la presión del vapor que a su vez es la causante de la demanda de carga. Por lo tanto, todo el sistema debe ser coordinado e implementado de forma que minimice los efectos de dichas interacciones, puesto que el propio diseño del sistema las puede aumentar.

5.1 Conceptos básicos de control.

Los requerimientos crecientes de seguridad en la operación de los equipos, de mayores eficiencias energéticas, la preservación del medio ambiente y un control de calidad de los productos más estrictos, hacen necesario contar en las industrias con sistemas de supervisión y control de los procesos cada vez más sofisticados. El sistema de instrumentación de un proceso industrial puede requerir desde instrumentos tan simples como un termómetro o indicador de presión local, hasta sistemas computarizados distribuidos en la planta para la implementación de esquemas de control modernos.

Todo lazo de control realimentado, como se muestra en la figura 5.2, siempre requerirá como mínimo, de un elemento de medición y transmisión del valor de la variable que se desea controlar, un controlador y un elemento final de control debidamente interconectados entre sí.

Para la selección, instalación y puesta en servicios de los lazos de control industrial, se requiere conocer los instrumentos disponibles para la medición de las principales variables medidas o controladas en la industrial, sobre las válvulas de control, las cuales son el elemento final de control más utilizado y sobre la operación de los controladores de uso industrial, su sintonización y los procedimientos para la obtención de la información necesaria del proceso para realizarla.

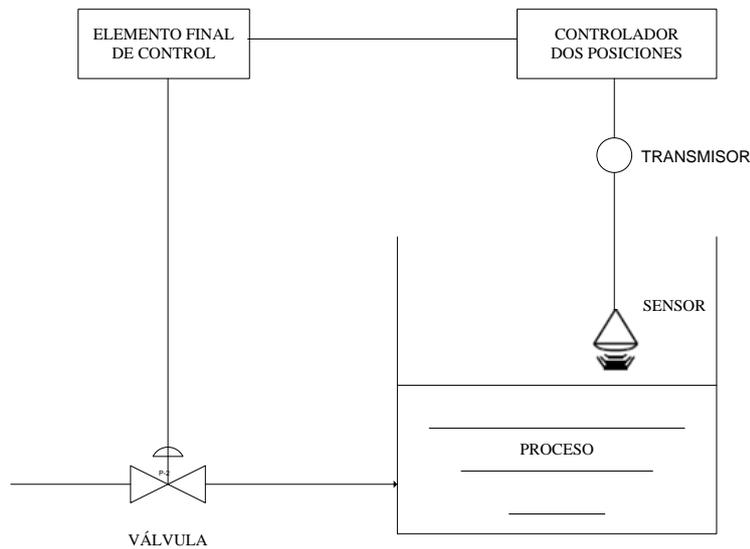


Figura 5. 2 Lazo de control alimentado.

Un caso muy simple es el manejo de un motor eléctrico de inducción para un ventilador de enfriamiento. Aquí el sistema de control sería un arranque eléctrico con protección contra sobrecarga del motor y fallas en los cables. El control operacional simplemente sería presionar unos botones de inicio/parado en el cual se iluminaría unas lámparas de funcionando/parado y unas lámparas de mal funcionamiento, como se muestra en la figura 5.3.

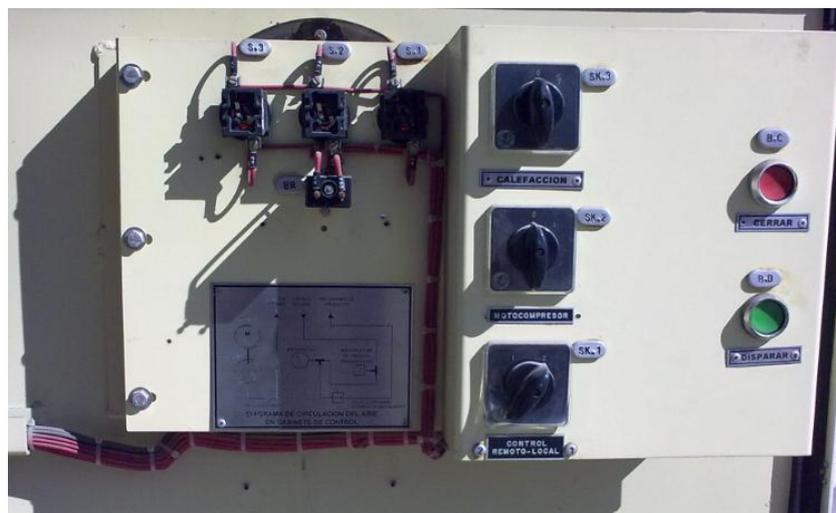


Figura 5. 3 Control operacional.

En otro extremo puede ser el control de la caldera donde intervienen más variables donde el sistema de control se mezcla más complejo y utiliza mayor tecnología. El

enlace que tiene los operadores (humanos) con los dispositivos usados es menos directo y son controlados por un sistema automatizado.

En lo que refiere a la automatización muy pocos sistemas y plantas de procesos pueden ser ejecutados sin un sistema de control automatizado el cual pueda garantizar un adecuado funcionamiento seguro y económico. Pero de cualquier forma los operadores (humanos) son parte importante de los sistemas automatizados, si una alarma es detectada por el sistema el operador deberá atenderla para saber la razón por la cual se generó y poder corregir el problema antes que sea un riesgo para el equipo y el personal.

Los sistemas de control (controlador) aplican medios artificiales para cambiar el comportamiento de un sistema. Dependiendo del problema en el control se puede determinar el tipo de control que el sistema puede utilizar. Cada controlador está diseñado para alcanzar un objetivo específico.

El sistema de control que permite este mantenimiento de las variables puede definirse como aquel que compara el valor de la variable o condición a controlar con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto.

El sistema de control exige pues, para que esta comparación y subsiguiente corrección sea posible, que se incluya una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso.

5.1.1 Controladores.

El controlador es un componente del sistema de control que detecta los desvíos existentes entre el valor medido por un sensor y el valor deseado o “set point”, programado por un operador; emitiendo una señal de corrección hacia el actuador, como se muestra en la figura 5.4.

Un controlador es un bloque electrónico encargado de controlar uno o más procesos. Son los instrumentos diseñados para detectar y corregir los errores producidos al comparar y computar el valor de referencia o “set point”, con el valor medido con el parámetro más importante a controlar en un proceso.

Los controladores pueden ser del tipo: manual, eléctrico, electrónico, neumático o digitales; así como las tarjetas de adquisición de datos y los controladores lógicos programables (por sus siglas en inglés PLC).

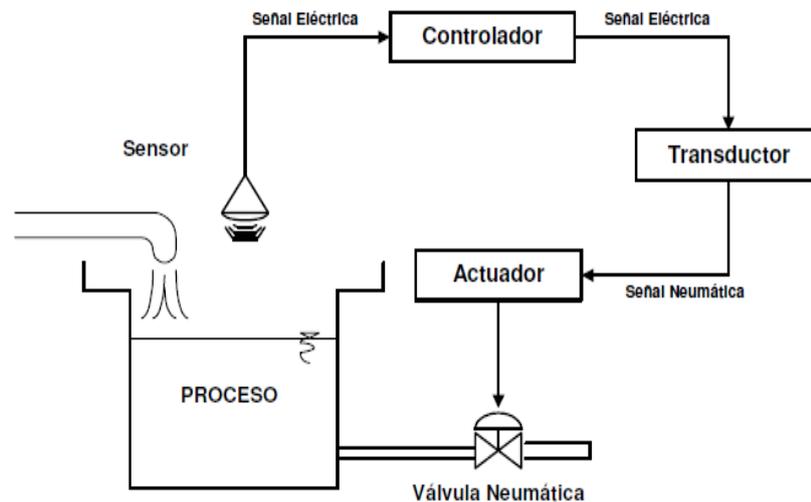


Figura 5. 4 Sistema de control.

Actualmente en la industria se utiliza para controlar las variables de operación los sensores inteligentes y PLC, supervisando y adquiriendo los datos a través de las computadoras personales e integrándolas por una red y logrando un sistema de control distribuido.

Existen varios modos para controlar los procesos como pueden ser: Proporcional, Integral o Derivativo y su caso la combinación de éstos. El controlador empleado en más del 95% de los lazos de control industrial es el controlador PID (Proporcional – Integral – Derivativo), que se forma de los tres modos de controlar mencionados, el cual debe ser sintonizado adecuadamente para lograr el desempeño deseado del lazo de control. Su sencillez, versatilidad y capacidad para resolver los problemas básicos que se presentan en los procesos con dinámica favorable y requisitos de funcionamientos modestos hacen de ellos una herramienta imprescindible en el control de procesos.

Los controles que conforman el control PID se mencionan a continuación, solo de carácter informativo, para tener en claro la función que tiene al integrar el controlador PID.

- **Modo proporcional:** Este es el control principal y el método principal. Para mantener una salida constante, el control mide la salida y controla la entrada (usualmente un sensor) y aplica modelos matemáticos a la diferencia de los dos (denominados errores). El modo de control proporcional, está basado en un algoritmo lineal y proporcional, que tiene por objetivo reducir la magnitud del error (diferencia entre el punto de ajuste y la medición), así dará estabilidad al proceso.
- **Modo integral:** Tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; luego es multiplicado por la constante de integración I. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.
- **Modo derivativo:** La acción derivativa se presenta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral. La función de la acción derivativa es la de mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce, de esta manera evita que el error se incremente.

5.1.2 Esquemas de control.

En el control de un proceso industrial están envueltas varias variables que entran y salen del mismo, relacionadas entre sí por el proceso mismo y por el lazo de control. Las cantidades o variables controladas son aquellas condiciones que se desean controlar o mantener en un valor deseado y pueden ser flujo, temperatura, presión, niveles, composiciones u otras características necesarias de controlar. Para cada una de estas variables se establece un valor deseado también llamado punto de ajuste o de referencia (Set Point). Para cada variable controlada existe una cantidad o variable manipulada de entrada asociada a esta, que se puede modificar para lograr el objetivo de control.

Las perturbaciones son también entradas de control al proceso sobre las que no se puede actuar y tienden a llevar a las variables controladas fuera de sus condiciones deseadas.

Pueden ser cambios en alguna característica del proceso o del medio ambiente. Las perturbaciones más importantes son los cambios de carga, producidos por las variaciones en las entradas o en la demanda de proceso, será entonces necesario contar con algún sistema de control para ajustar las variables manipuladas de manera de mantener las variables controladas en su valor deseado a pesar de las perturbaciones. Como se muestra en la figura 5.5, se ilustra las variables envueltas en el control de un proceso.

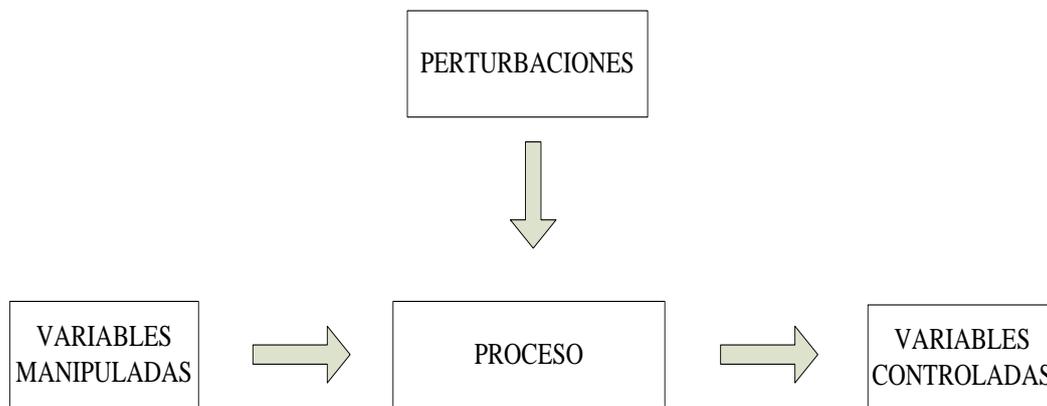


Figura 5. 5 Esquema de control de proceso.

También puede ser necesario cambiar los valores deseados, requiriéndose entonces, modificar las variables manipuladas para llevar las variables controladas a sus nuevos valores.

Además de las variables anteriores, puede existir también, un ruido de medición en las señales realimentadas. Este ruido de medición no contiene información de proceso por lo que la instalación de la instrumentación debe de hacerse de manera de evitar su presencia en lo posible y en caso de existir, este debe ser filtrado adecuadamente.

5.1.3 Control de lazo cerrado realimentado (Feedback).

En un sistema de control realimentado, sea este manual o automático, debe obtenerse información del valor real de la variable controlada y compararlo con su valor deseado. La diferencia entre el valor real y el valor deseado de la variable controlada (error), es utilizada dentro del lazo de control para lograr la disminución o eliminación de dicho

error. En otras palabras, el sistema de lazo cerrado es aquel en el cual la acción a controlar dependen de la salida.

En el control realimentado manual el operador observa (sensa) el valor real de la variable controlada, lo compara con el valor deseado, toma una decisión (controla) y modifica (actúa) el valor de la variable manipulada.

Como se muestra en la figura 5.6, se observa al operador efectuar entonces todas las labores requeridas dentro del lazo de control realimentado.

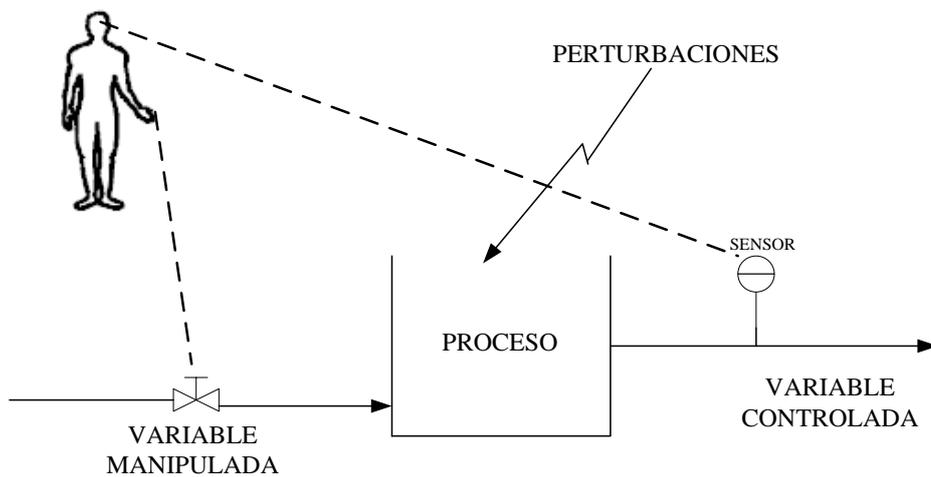


Figura 5. 6 Lazo de control cerrado realimentado.

Las limitaciones del sistema de control realimentado manual hacen evidente la necesidad del sistema de control realimentado automático. En este se deberá contar con un dispositivo de medición (sensor) para obtener el valor real de la variable controlada.

Este valor es entonces transmitido (transmisor) al equipo de control (controlador), este realiza la comparación entre el valor real y el valor deseado de la variable controlada, basado en la diferencia entre estos dos valores (error) y utilizando el algoritmo de control incorporado en el, calcula los valores necesarios de las variables manipuladas los cuales son enviadas a los elementos finales de control (actuador-elemento final) para manipular la entrada al proceso.

Este esquema establece un lazo cerrado de retroalimentación base fundamental de su funcionamiento, como se muestra en la figura 5.7.

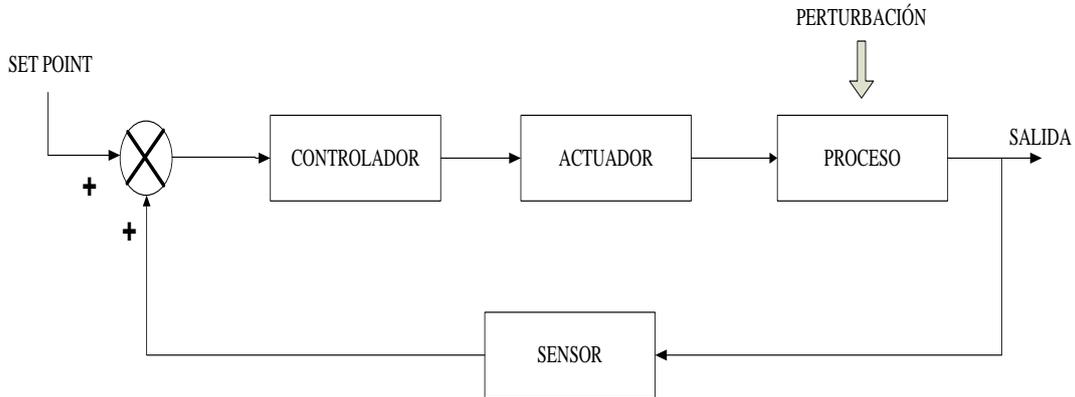


Figura 5. 7 Lazo cerrado retroalimentación.

En el control realimentado no es necesario conocer por anticipado ni en forma precisa las relaciones existentes entre las perturbaciones y la variable controlada, el equipo de control es estándar y su sincronización, ajuste de sus parámetros, se realiza normalmente a partir de información del proceso obtenida en forma experimental, una vez que todos los instrumentos del lazo han sido instalados e interconectados.

Por requerir de un error para dar inicio a la acción correctiva, el sistema de control realimentado no puede efectuar un control perfecto en presencia de perturbaciones, esto es con error cero todo el tiempo.

5.1.4 Control en lazo abierto (open loop).

El control prealimentado ofrece una forma alterna y conceptualmente diferente para efectuar el control de la variable de interés. En el control prealimentado manual el operador observa (sensa) el valor de la perturbación y basado en este, en el valor deseado de la variable controlada y en su conocimiento del proceso, toma una decisión (controla) y modifica (actúa) el valor de la variable manipulada de manera de contrarrestar el efecto de la perturbación sobre la variable controlada.

Como se observa en la figura 5.8, el control realimentado opera para eliminar los errores mientras que el control prealimentado lo hace para prevenir la ocurrencia del error,

aumentándose considerablemente el conocimiento del proceso que debe tener el operador. Debe conocer cuales perturbaciones afectan al proceso y tomar previsiones para su medición.

Debe conocer cuando y como ajustar la variable manipulada para poder compensar los efectos de las perturbaciones en forma exacta.

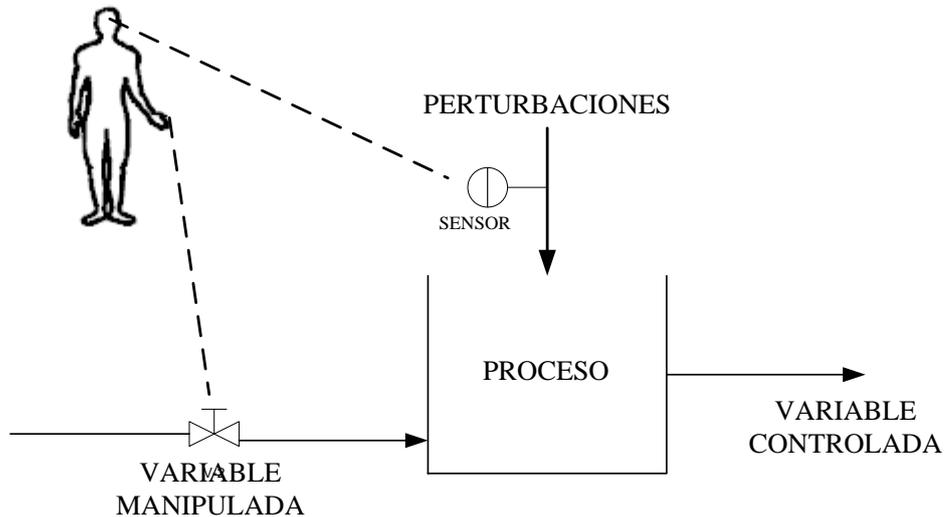


Figura 5. 8 Control lazo abierto prealimentado.

Si el operador tiene esa habilidad, entonces la variable controlada no variará de su valor deseado, pero si su conocimiento del proceso es incompleto, cometerá un error o no puede anticipar todas las perturbaciones que pueden afectar el proceso, entonces la variable controlada se desviará de su valor deseado y existirá un error no corregido y conocido.

En forma análoga al caso manual, en el control prealimentado automático deben existir sensores para medir las perturbaciones entrando al proceso. Basado en los valores medidos de las perturbaciones, el valor deseado de la variable controlada y la información del proceso incorporada en el, el controlador prealimentado calcula el valor requerido de la variable manipulada para eliminar el efecto de las perturbaciones.

Todo el control se efectúa sin el conocimiento del valor real de la variable controlada por lo que no existe un lazo de control realimentación ni una señal de error.

Es evidente que los controladores prealimentados deben incorporar un conocimiento preciso de los efectos de las perturbaciones, también la variable manipulada, que tendrán sobre la variable controlada para poder calcular el valor exacto requerido de la variable manipulada, como se muestra en la figura 5.9.

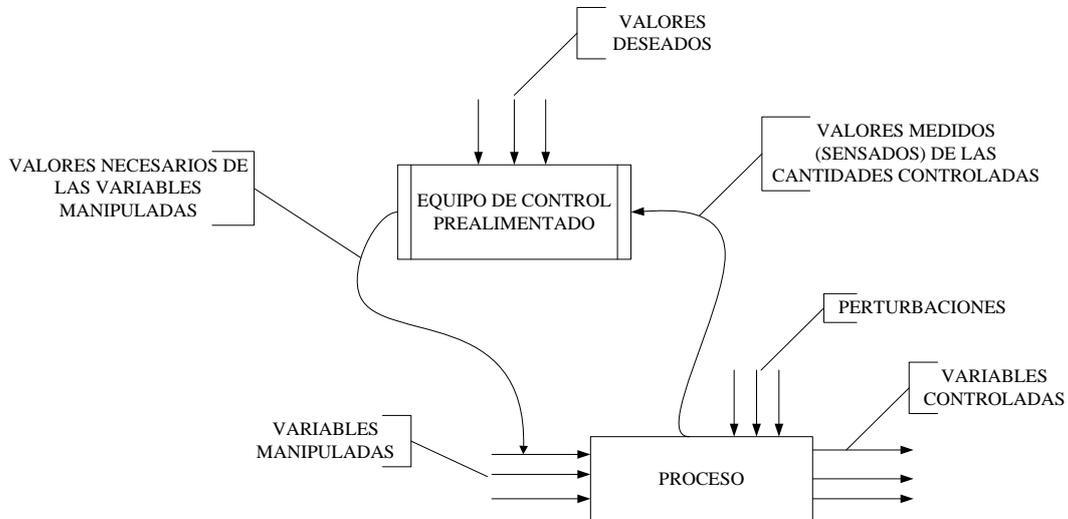


Figura 5. 9 Lazo de control prealimentado.

El incremento en el conocimiento del proceso requerido por el control prealimentado, requerido por el control realimentado es grande, por lo que su aplicación es reducida pero importante. Usualmente no se emplea solo, si no en combinación de un esquema de control realimentado.

Los esquemas básicos de control son entonces el control realimentado (lazo cerrado) y el control prealimentado (lazo abierto) siendo los demás variaciones de estos.

5.1.5 Control realimentado.

El control realimentado es el esquema que resuelve la gran mayoría de los problemas de control. Un proceso de control tendrá una o más variables que se deban controlar y para cada una de estas es necesario seleccionar una variable manipulada asociada para su control. Una variable controlada particular debe hacer pareja entonces con una variable manipulada específica, por medio del equipo de control realimentado apropiado.

El sistema de control requiere entonces el valor deseado para la variable controlada, para tomar la acción correctiva al momento de presentarse un error, ya sea por el efecto de la perturbación o por un cambio en el valor deseado.

La relación de las diferentes variables involucradas en el esquema de control se muestra en la figura 5.10.

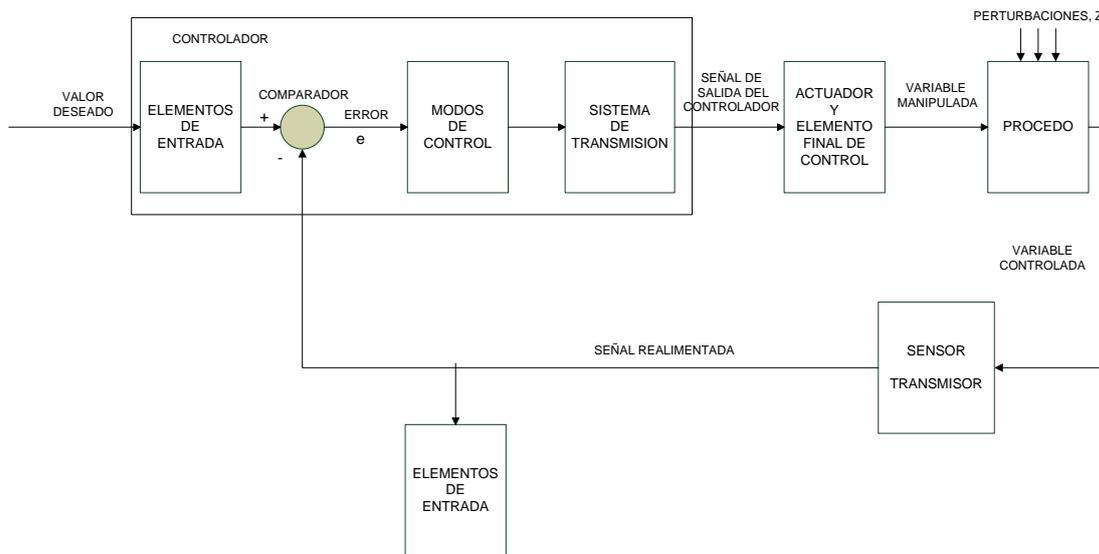


Figura 5. 10 Variables de un esquema de control.

La variable controlada es una variable física (nivel, flujo, temperatura, presión, etc.) lo mismo que las perturbaciones (cambios en las características de las variables del proceso, cambios de cargas, etc.) y también la variable manipulada.

La señal realimentada es una señal normalizada neumática o eléctrica que representa a la variable controlada, esta señal es transmitida por el sensor/trasmisor hasta el controlador y posiblemente a otros instrumentos para su despliegue, registro u otro uso.

El controlador debe proveer un mecanismo mediante el cual el operador pueda establecer el valor deseado requerido de la variable controlada, el cual es comparado con su valor real empleando un comparador de error. La señal de error es empleada por los modos de control que componen el controlador, para producir la señal de salida del controlador la cual también es una señal normalizada, neumática o eléctrica, que puede ser interpretada por el actuador y elemento final de control encargado de efectuar el cambio necesario en la variable manipulada.

El sensor/trasmisor y el actuador/elemento final de control se encontrarán instalados en el proceso o planta, en el que se denomina usualmente campo, mientras que los controladores o instrumentos que requieren la atención del operador se encuentran

normalmente reunidos en un tablero de control centralizado, junto con los instrumentos correspondientes a los otros lazos de control de proceso.

El diagrama de bloques, como se muestra en la figura 5.11, muestra la nomenclatura empleada para las diferentes variables y funciones de transferencia del lazo de control.

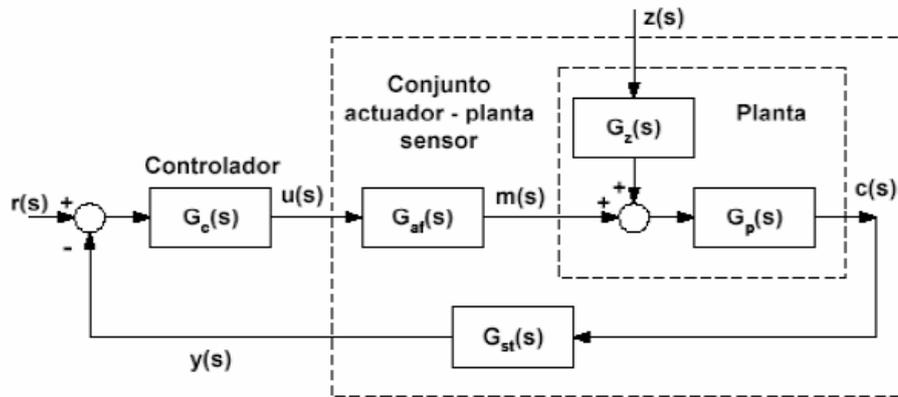


Figura 5. 11 Nomenclatura en un diagrama de bloques.

Como se muestra en la figura 5.12, es la forma comparativa de los instrumentos y variables que se han definido anteriormente.

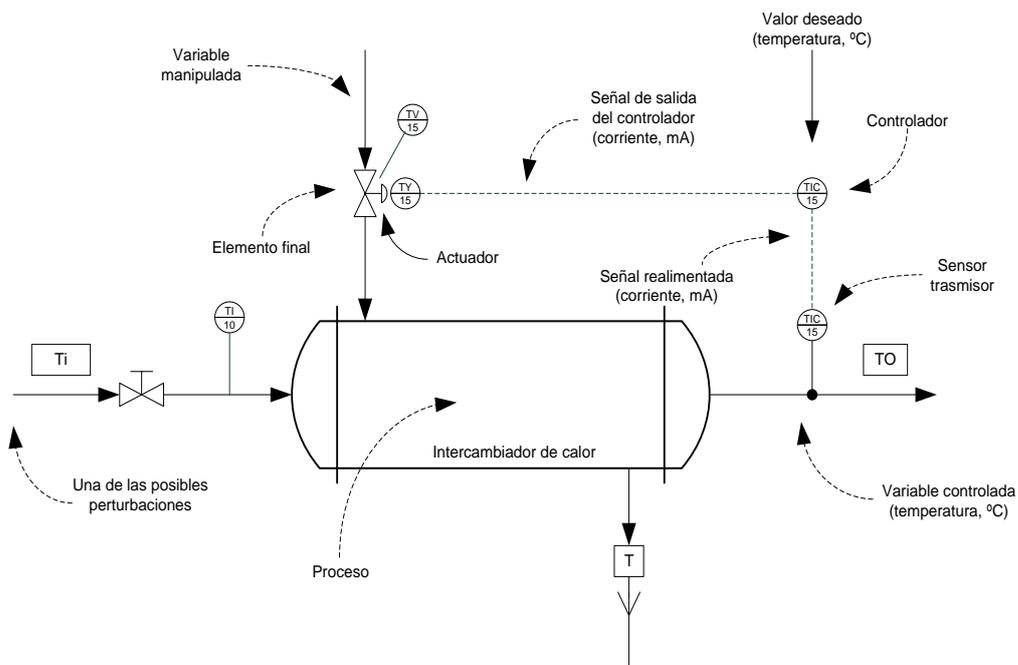


Figura 5. 12 Instrumentos y variables en un diagrama final de control.

5.2 Simbología de control.

La instrumentación empleada en un control de proceso forma parte integral del mismo, por lo que es importante que la documentación relacionada con los sistemas de control,

permitan un conocimiento claro del criterio de diseño empleado, las especificaciones de los instrumentos y la forma en que estos están instalados e interconectados.

5.2.1 Diagrama de flujo de instrumentos.

El diagrama de instrumentos, es el documento que muestra toda la instrumentación empleada en el control de la planta por lo tanto permite entender cómo se efectúa el control, que tipo de instrumento se emplea y donde están localizados.

En este diagrama, cada instrumento estará representado por una etiqueta o identificación y por un símbolo. La etiqueta es un conjunto de letras y números que indican cual es la variable medida o controlada y cuáles son las funciones del instrumento. La simbología empleada en el diagrama permite ubicar el instrumento, determinar el tipo de señales empleadas y otras características de los mismos.

5.2.2 Etiquetas o identificación del instrumento con norma ISA²².

Cada instrumento tendrá asociado una etiqueta compuesta por letras y números la cual lo describe funcionalmente. Esta etiqueta de identificación está compuesta por dos partes: una identificación funcional y una identificación por lazo.

La identificación funcional a su vez está compuesta por una primera letra que identifica a la variable medida o controlada y una serie de letras sucesoras que describen las funciones del instrumento. Por su parte, la función del lazo está constituida por un número del lazo y un sufijo, sí esté fuera necesario, como se muestra en la tabla 5.1, que es un ejemplo de lo mencionado.

IDENTIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO			
Primera letra	Letras sucesoras	Número de lazo	Sufijo
T	IC	10	A
Identificación funcional		Identificación de lazo	

Tabla 5. 1 Identificación del instrumento.

Como se muestra en la tabla 5.2, son los significados de las letras, dependiendo de su posición dentro de la etiqueta del instrumento.

²² ISA- International Society of Automation (Sociedad Internacional de Automatización)

LETRAS DE IDENTIFICACIÓN					
	PRIMERA LETRA		LETRAS SUCESORAS		
	VARIABLE MEDIDA	MODIFICADOR	FUNCIÓN PASIVA	FUNCIÓN DE SALIDA	MODIFICADOR
A	análisis	-----	alarma	-----	-----
B	llama	-----	libre	libre	libre
C	libre	-----	control	-----	-----
D	libre	diferencial	-----	-----	-----
E	voltaje (fem)	-----	elemento primario	-----	-----
F	cuadal	relación	-----	-----	-----
G	libre	-----	visro, mirilla	-----	-----
H	manual	-----	-----	-----	alto
I	corriente eléctrica	-----	indicador	-----	-----
J	potencia	muestra	-----	-----	-----
K	tiempo	razón de cambio	-----	estación de control	-----
L	nivel	-----	luz piloto	-----	bajo
M	libre	momentáneo	-----	-----	medio, intermedio
N	libre	-----	libre	libre	libre
O	libre	-----	orificio	-----	-----
P	presión, vacío	-----	punto de prueba	-----	-----
Q	cantidad	integrar (totalizar)	-----	-----	-----
R	radioactividad	-----	registrador	-----	-----
S	velocidad frecuencia	seguridad	-----	interruptor	-----
T	temperatura	-----	-----	transmisor	-----
U	multivariable	-----	multifunción	multifunción	multifunción
V	vibración	-----	-----	válvula	-----
W	peso, fuerza	-----	pozo	-----	-----
X	no clasificado	eje X	no clasificado	no clasificado	no clasificado
Y	evento	eje Y	-----	relé, convertidor	-----
Z	posición	eje Z	-----	actuador, elemento final de control no clasificado	-----

Tabla 5. 2 Letras de identificación.

Los tamaños de las etiquetas y los símbolos son los tamaños generalmente recomendados. Los tamaños óptimos pueden variar dependiendo del diagrama y dependiendo el número de caracteres seleccionados apropiadamente de otros símbolos y de otros equipos en un diagrama.

La etiqueta o rótulo del instrumento, se encerrará dentro de un círculo de aproximadamente 1 cm de diámetro, el cual indica la localización del instrumento, ya sea que este esté instalado directamente en el campo, en el equipo mismo o en un

tablero de control accesible al operador (por la parte frontal) o por la parte interior (trasera), como se muestra en la figura 5.13.

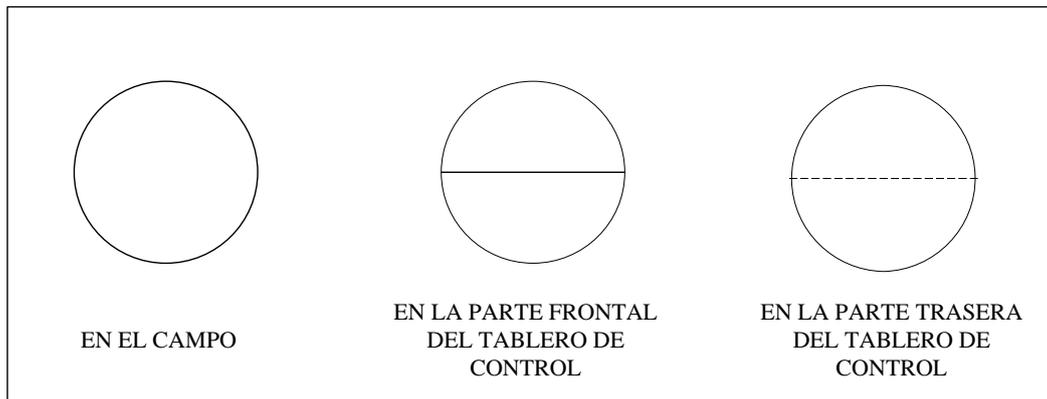


Figura 5. 13 Etiquetas o rótulos de instrumentos.

5.2.3.1 Líneas de interconexión (señales).

Las líneas de señales pueden ser dibujadas en un diagrama enteramente o dejando la parte apropiada de un símbolo en cualquier ángulo. La función de los designadores de bloque y los números de las etiquetas podrían ser siempre mostrados con una orientación horizontal. Flechas direccionales podrían ser agregadas a las líneas de las señales cuando se necesite aclarar la dirección del flujo para información.

En general, una línea de una señal representará la interconexión entre dos instrumentos en un diagrama, como se muestra en la figura 5.14. Pueden ser conectados físicamente por más de una líneas.

La interconexión de los instrumentos al proceso y entre estos, se realiza con línea que indican el tipo de conexión o señal empleada.

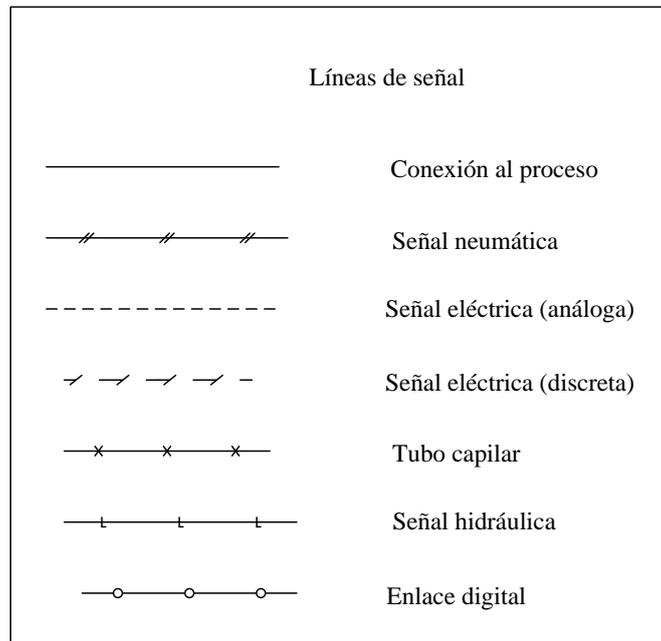


Figura 5. 14 Líneas de señales.

5.3 Sistemas de control de la caldera.

Con base en el principio del funcionamiento de la caldera controlaremos los sistemas que intervienen en el proceso de generación de vapor. Los sistemas a controlar son: control de combustible y aire (combustión), control de agua de alimentación (nivel del domo), control de la temperatura del vapor.

5.3.1 Sistema de control de combustible y aire.

La función principal del control de combustible es entregar una mezcla de aire y combustible al quemador que satisfaga los requerimientos de carga de la caldera bajo condiciones seguras y eficientes. Si el aire no es suficiente, se desperdiciaría combustible debido a una combustión incompleta, además esta mezcla rica puede causar explosiones en puntos calientes. Un exceso de aire también desperdicia combustible, calentando aire que luego sale por la chimenea.

Existen consideraciones que deben tomarse en cuenta como los efectos del combustible, la densidad del aire y los cambios de temperatura.

Muchas instalaciones, particularmente en unidades pequeñas, utilizan lo que es llamado sistema de control de posición de eje de unión en el cual el combustible y el aire no se miden, como se muestra en la figura 5.15.

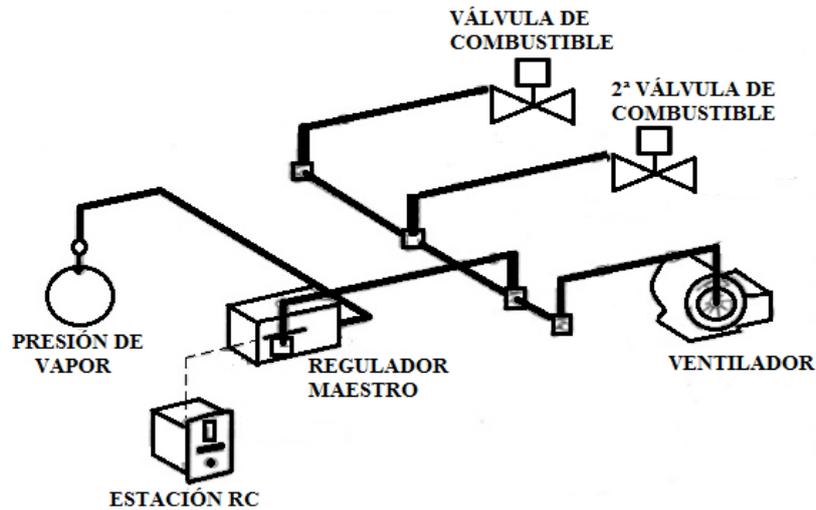


Figura 5. 15 Sistema de control combustible/aire.

Como se muestra en la figura 5.16, es la presentación del diagrama del sistema de control de posición de eje de unión, usando simbología ISA, la cual es un sistema de posicionamiento paralelo que no mide el combustible ni el aire. Esta relación es mantenida mediante la posición del operador en relación con el combustible y el aire.

Cada posición de la válvula de combustible representa el valor del flujo del combustible y un valor correspondiente para el flujo del aire para presentar un valor repetible del flujo de aire. La caracterización del aire debe estar siempre en el control de la compuerta y en algunos casos en la válvula del combustible y que el segundo operador final puede seguir la secuencia correcta. Un ajuste en el límite de recorte es provisto en la proporción de combustible aire para permitir algunas modificaciones de la calibración inicial en la proporción combustible aire. Esto puede lograrse de forma automática, pero una estación manual es el método más común.

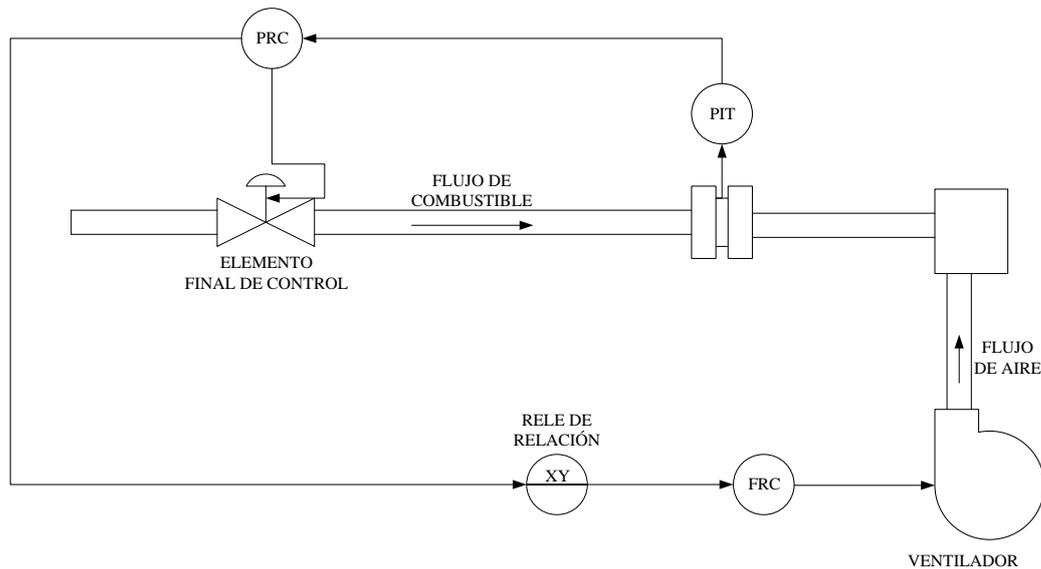


Figura 5. 16 Sistema de control de posición de eje de unión.

Hay ventajas y desventajas en un sistema de posicionamiento eje-paralelo de unión. Las ventajas son su seguridad, sensibilidad y rentabilidad. En un sistema neumático con una señal de transmisión de largo alcance, por ejemplo, un sistema de posicionamiento eje-paralelo de unión ha sido aplicado exitosamente, en algunos casos donde los lazos de flujo lento son indeseables. Esto es, el rango de control del sistema es alto, limitado únicamente por el operador final.

Ya que no se basa en una medición, el control de la relación combustible aire no es preciso. Esto depende de otros parámetros y es afectado por las diferentes características del combustible, temperatura del combustible y/o variación de la presión, condiciones atmosféricas, etc. Sí estas no se ven constantes, la relación combustible aire se verán afectadas significativamente.

Para superar las desventajas inherentes de los sistemas de medición, se puede aplicar un sistema de control al quemador. El combustible y aire son medidos y los circuitos de control de flujo son cerrados en dichas variables.

La masa de aire medida debe ser una señal repetitiva que es la representación de la entrada de aire al quemador. Cuando las técnicas de medición del volumen se emplean y la temperatura del aire en el elemento de medición del flujo varía de 300 K (27 C) o más, los flujos medidos deben ser compensados por la densidad del flujo de aire para

determinar la verdadera masa de aire de flujo. En el sistema de control, el aire caracterizado al combustible debe prevenir la entrada excesiva de combustible.

El seguimiento automático se debe proporcionar sin perturbaciones en modo automático. El control de la combustión, que responde a la demanda de energía de la caldera, debe llevarse a cabo mediante el control de la presión del quemador, demanda de aire y de combustible.

Esto es un prerequisite para que el control del aire este en automático cuando el control del combustible este en automático. Deben tomarse disposiciones necesarias para asegurar que la regulación automática de combustible se reflejara en la cantidad suficiente para la relación de aire que proporcionara con esto un funcionamiento seguro de la caldera. Esto incluye limitar el flujo del combustible o el flujo de aire bajo todas las condiciones que asegure que el flujo del combustible, que nunca exceda los límites de la seguridad de la combustión, soportará el flujo de aire.

Un exceso de aire es requerido en todas las cargas para garantizar una combustión correcta del combustible que entra en el quemador. El quemador no debe funcionar a un nivel de oxígeno, en los gases de combustión, por debajo de la caldera o del quemador recomendado por el fabricante.

Dos enfoques básicos y uno compuesto para el sistema de control son: Control Serie, Control Paralelo y límites cruzados.

5.3.1.1 Sistema de control serie (cascada).

El Sistema de control serie, como se muestra en la figura 5.17, nos indica la manera en que el combustible sigue al aire. Toda la presión diferencial de la señal del transmisor debe ser convertida en una señal lineal, como se muestra en la figura 5.17. Los diagramas de flujo con el transmisor de presión diferencial, que se presenta en los diagramas de control por medio de la raíz cuadrada, puede lograr la transmisión completa de modo que el combustible siga al aire.

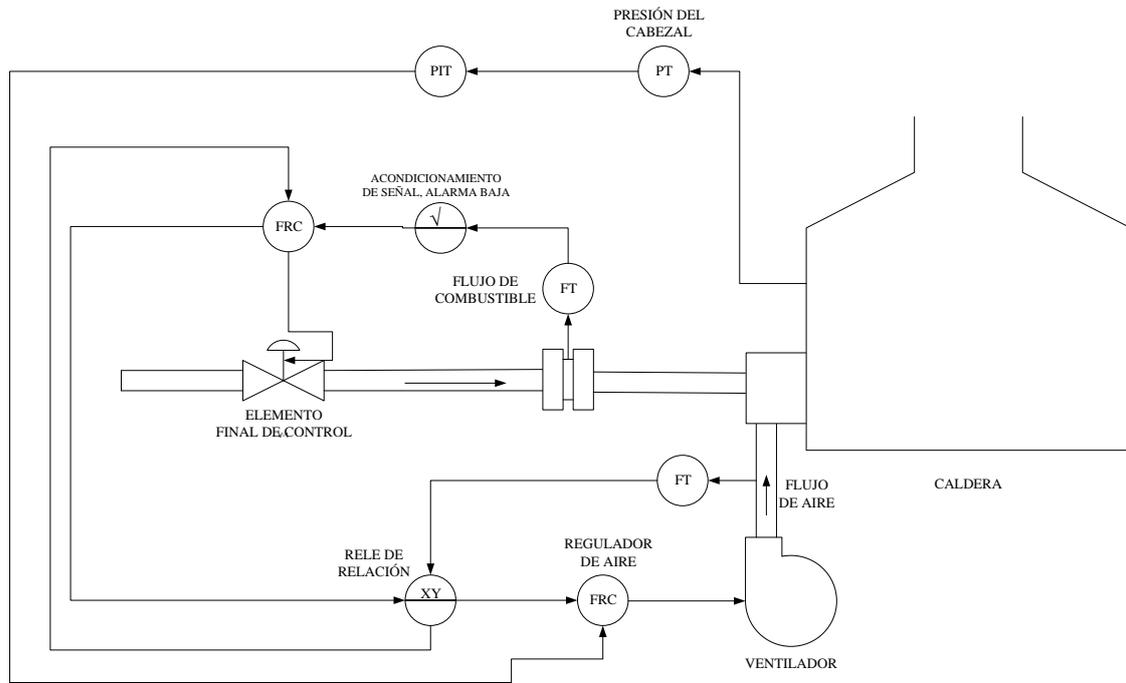


Figura 5. 17 Sistema de control serie.

En este sistema, la demanda de disparo establece el set point para el controlador del flujo de aire y la medida del flujo de aire establece el set point del controlador del flujo de combustible. Por lo tanto, la constante relación que se mantiene en la relación aire-combustible es mantenida por una base de medición medida. Con esta configuración la demanda del combustible nunca será mayor que la medición actual del flujo de aire. Esta es una consideración importante de seguridad. El combustible sigue al aire en un incremento de la carga. No hay posibilidad de quemar combustible acumulado. El circuito de flujo de aire es usualmente algo más lento a la respuesta del circuito de flujo de combustible, el seguimiento paralelo de los dos sistemas ocurre en la disminución de la carga.

Otro sistema de medición, en serie, se refiere a un sistema de combinación aire-combustible, como se muestra en la figura 5.18. Estructuralmente es idéntica al sistema de seguimiento combustible-aire, excepto que los circuitos combustible aire son invertidos, esto es, este sistema de medición en serie tiene una ventaja. Su respuesta es óptima debido a una respuesta más rápida del circuito de combustible.

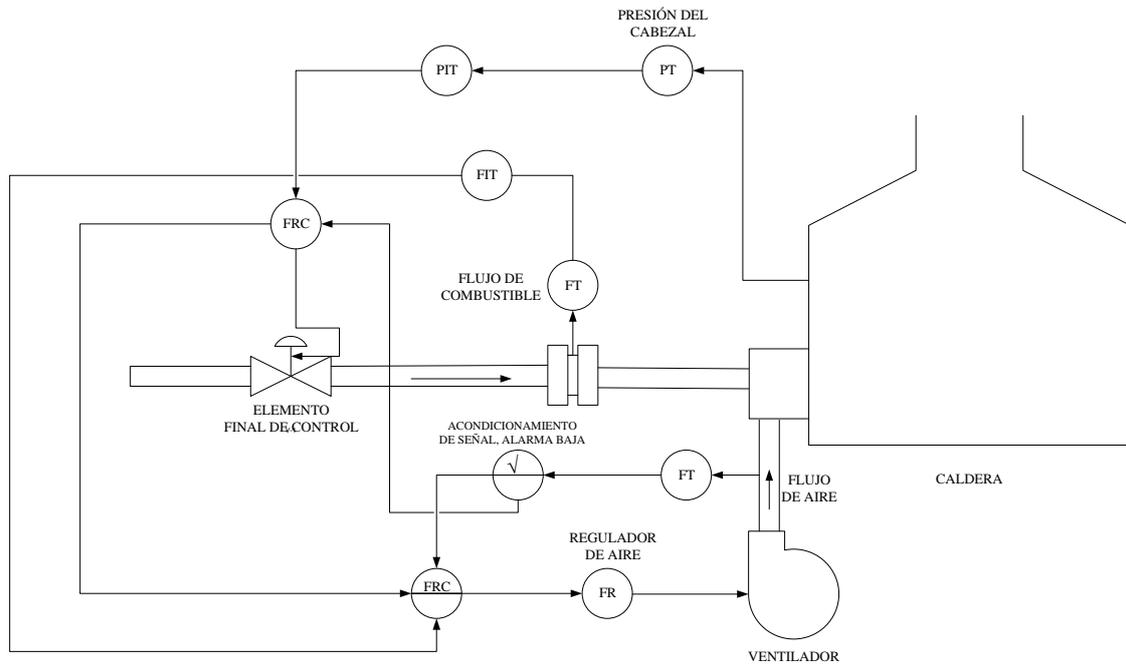


Figura 5. 18 Sistema de control serie aire/combustible.

Desde un punto de vista de seguridad, esta configuración es indeseable. Como la carga aumenta, el combustible conducirá al aire. También, la demanda de combustión tiene más combustible que aire.

5.3.1.2 Sistema de control paralelo (override).

La mejor configuración para el control de aire-combustible se muestra en la figura 5.19. En este sistema de medición paralela, la demanda de la tasa de la señal de disparo se aplica en paralelo con el *set point* para los dos circuitos control de flujo. Un circuito de control monitorea el flujo del combustible y el otro monitorea el circuito de control del aire.

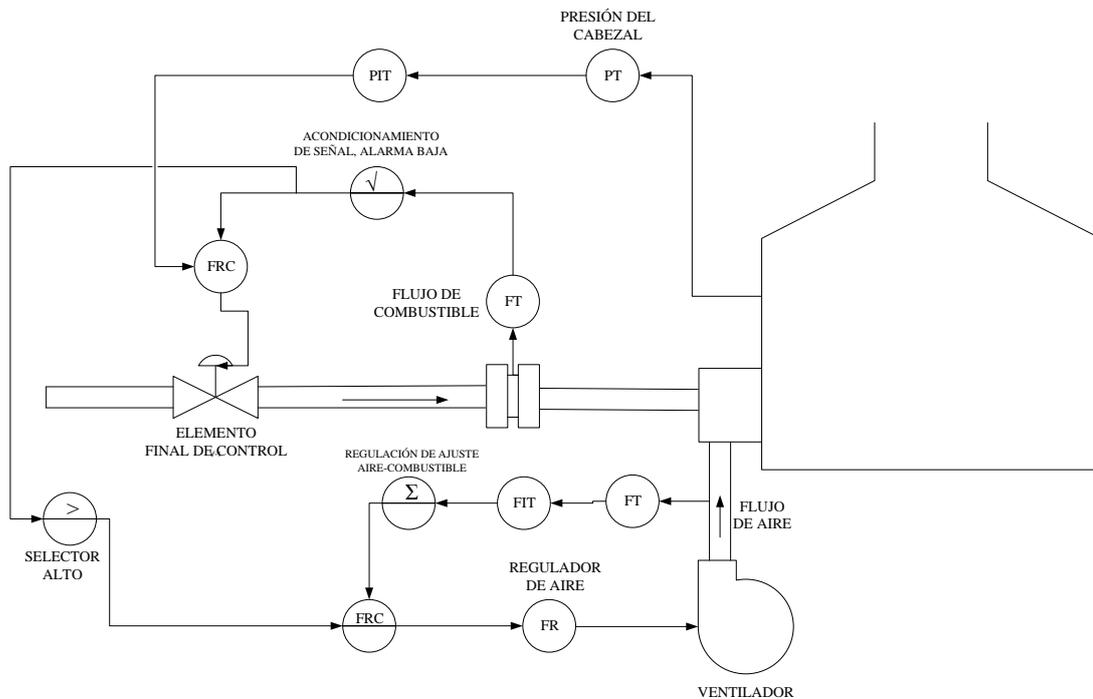


Figura 5. 19 Sistema de control paralelo aire combustible.

Este sistema permite un control estable y preciso de la entrada de energía y la relación aire-combustible durante el funcionamiento normal, pero no garantiza seguridad en la combustión durante condiciones transitorias o durante ciertas irregularidades del funcionamiento del sistema.

En el sistema paralelo se incorpora un bloqueo (interlock) en el flujo de combustible, como se muestra en la figura 5.20. El interlock se lleva a cabo mediante la intersección de un selector de señal baja en el set point (de referencia) para el control de flujo del combustible. La segunda entrada en el selector es el control de flujo de aire. Entonces, la señal de la demanda de combustible o la señal del flujo de aire activa la señal en el interlock o en su caso la que sea menor. Con este sistema, la demanda del combustible nunca excederá el flujo de aire y, un incremento en la carga, la demanda de combustible puede ser seguido por la demanda de aire. El flujo del combustible no puede aumentar hasta que el flujo del aire aumente, esto se realiza a través del punto de medición del flujo de aire.

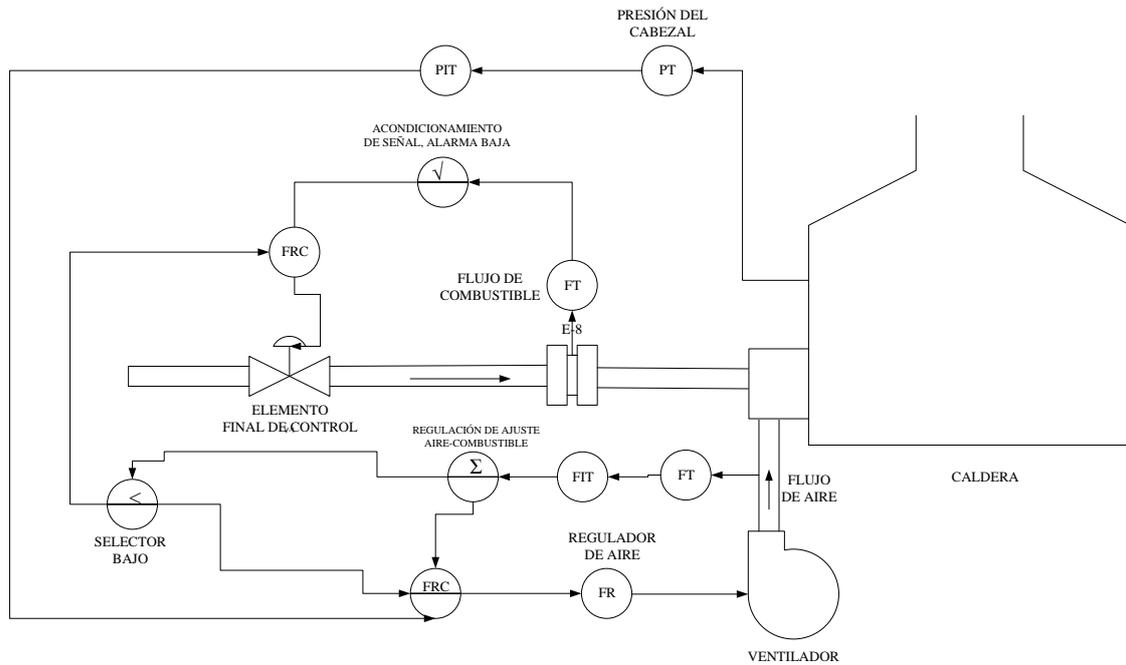


Figura 5. 20 Sistema de control paralelo con interlock en combustible.

En el sistema paralelo se incorpora un bloqueo (interlock) en el flujo de aire, como se muestra en la figura 5.21. Esto se lleva a cabo mediante la intersección de un selector de señal alta en el set point, de referencia, para el control del flujo de aire. La segunda entrada en el selector es para el control de flujo del combustible. Por lo tanto, la señal de la demanda del aire o la señal del flujo de combustible activa la señal en el interlock o en su caso la que sea mayor.

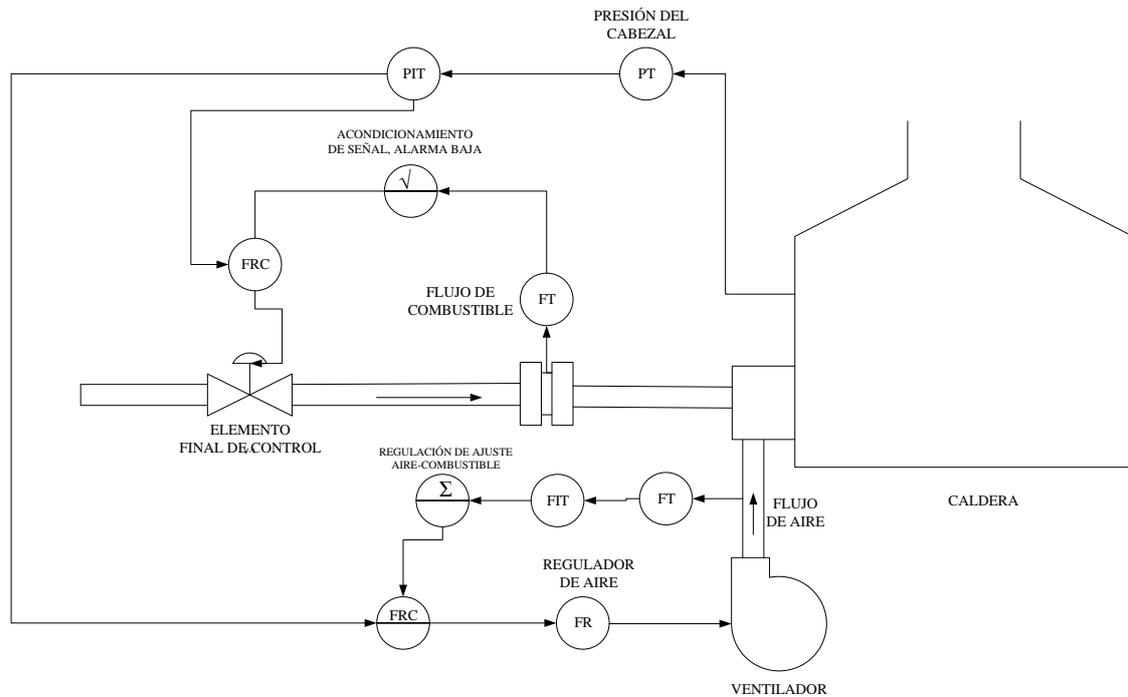


Figura 5. 21 Sistema de control paralelo con interlock en aire.

Con este sistema, la demanda de aire no puede ser menor que el flujo de combustible. En una reducción de carga, la demanda de aire puede seguir al combustible. El aire no puede ser reducido hasta que se reduzca el flujo del combustible, esto se realiza a través del punto de medición del flujo del combustible.

5.3.1.3. Sistema de control de límites cruzados (split range).

El siguiente sistema en paralelo, incorpora tanto el flujo de combustible como el flujo de aire, que fueron descritos en el punto 5.2.2. Como se muestra en la figura 5.22, este diagrama se conoce como: *sistema de límites cruzados* o *sistema de flujo entrelazado*. El control del combustible y el aire es representado en el esquema de control de la figura 5.22, sin embargo, el concepto de control de límites cruzados es comúnmente usado para todos los combustibles y ha sido el estándar para las calderas de servicio desde 1960.

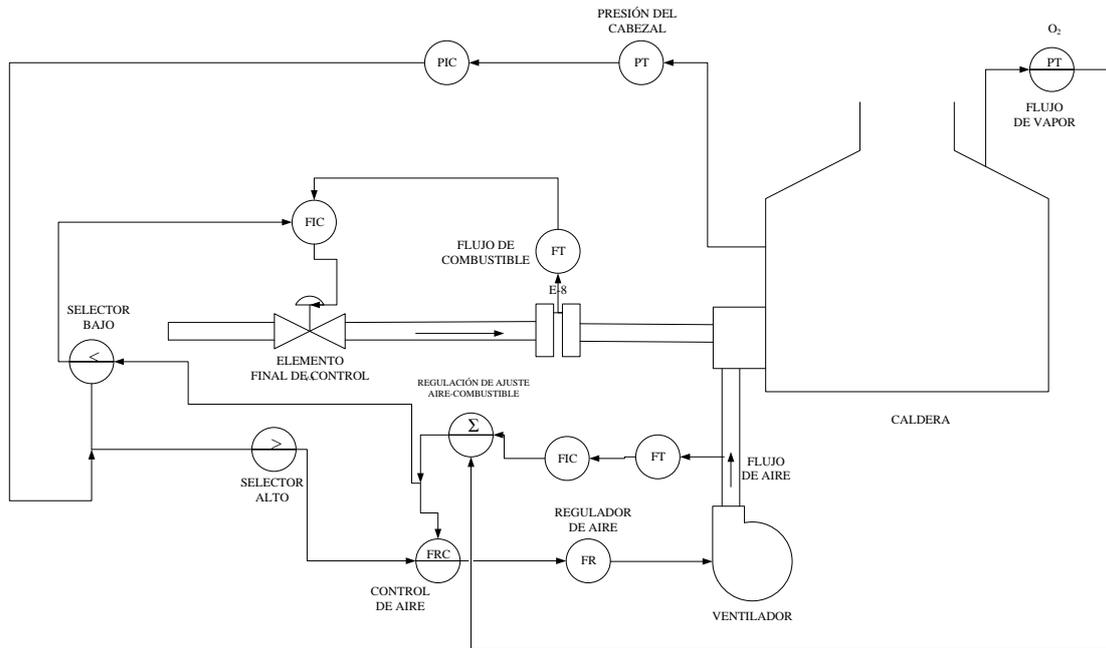


Figura 5. 22 Sistema de control de límites cruzados (split range).

El controlador maestro de presión PIC genera la señal de demanda de la relación de quema de combustible, a los selectores de alto y bajo. La función de control de estos selectores de señal se le llama “límites cruzados”. El selector alto también recibe la señal de flujo de combustible como una entrada y su salida en el set point remoto del controlador de flujo de aire FIC. El selector bajo también recibe la señal de flujo de aire como una entrada y su salida es el set point para el controlador de flujo de combustible FIC. Cuando la señal de demanda de la relación de quemado se incrementa, el selector alto proporciona el set point remoto al controlador de flujo de aire FIC y el selector bajo bloquea la señal de demanda de la relación de quemado al controlador de flujo del combustible FIC. Entonces el flujo de aire inmediatamente empieza a incrementarse según se incremente la señal de demanda de la relación de quemado. El selector bajo, permite el paso de la señal de flujo de aire incrementándose como set point del controlador de flujo de combustible FIC. De esta forma el flujo de aire se incrementa antes de que el flujo de combustible se incremente.

Cuando la señal de demanda del quemado de combustible disminuye, el selector bajo proporciona el set point remoto al controlador de flujo de combustible y el selector alto bloquea la señal de demanda al controlador de flujo de aire. El flujo del combustible inmediatamente empieza a disminuir siguiendo el decremento en la señal de demanda. El selector alto permite el paso de la señal de flujo de combustible que está

disminuyendo, como el set point del controlador de flujo aire para disminuir el flujo de aire. De esta forma, también disminuye el flujo de combustible antes de que el flujo de aire disminuya.

Si un mal funcionamiento causa un decremento en el flujo de aire, el selector bajo permite el paso de la señal de flujo de aire al controlador de flujo de combustible. El flujo del combustible disminuirá en proporción al flujo de aire sin importar la demanda del vapor del sistema; esto evitará tener una mezcla rica de combustible en el hogar de la caldera.

En este sistema de control, el flujo de aire siempre se incrementa antes que el flujo de combustible lo haga y el flujo de combustible siempre disminuirá antes que flujo de aire lo haga.

5.3.2 Control de agua de alimentación.

El primer propósito de los sistemas de control es mantener el nivel del agua dentro del límite superior e inferior, ya que si el nivel del agua es muy bajo las superficies de calentamiento quedaran expuestas y la caldera se sobrecalentara; si es demasiado alto el nivel del agua podrá ser aspirada junto al vapor resultando una pobre calidad de vapor. Este sistema de control es complicado debido a la respuesta inversa que se presenta en estos sistemas, conocida como shrink and swell²³.

En calderas grandes se utiliza un sistema típico diseñado para cambios de cargas rápidas y grandes conocido como feedforward-plus-feedback o control de nivel de tres elementos, donde se mide el flujo de agua, el flujo de vapor y el nivel del domo.

El elemento primario mantiene el suministro del agua en balance con la demanda del vapor y el control del nivel ajusta el flujo para compensar las pérdidas por purga o errores en la medición de flujo de vapor. La salida del control de flujo puede operar sobre la válvula de control de nivel o sobre el variador de velocidad del motor de la bomba de alimentación.

Para poder controlar el nivel del agua de una caldera debe ante todo poder medirse. En las calderas, aun con tasas bajas de generación de vapor, cuando las condiciones son de lo más estable, hay un movimiento considerable del agua y gran turbulencia, al hervir el

²³ Shrink and swell (Contraer e hinchar): Efectos de dilatación que se produce por variaciones en el nivel de la superficie del líquido en el vapor cada vez que se produce cambios en la carga de la caldera (cambios en la demanda de vapor).

agua las burbujas de vapor empieza a ocupar un cierto espacio dentro del agua ocasionando un aumento de nivel general, aunque la cantidad de agua en si no ha cambiado, entre más vigorosa se vuelva la ebullición, más aumenta el nivel.

Los cristales de nivel extremo deben de medir el nivel del agua en ebullición justo por debajo de la capa de burbujas, donde la proporción de agua-burbujas sea representativa del interior de la caldera y ese es el nivel que se ve a través del indicador de nivel, para lograrlo el indicador se conecta al agua de la caldera en un punto libre de turbulencia y burbujas.

Como se mencionó anteriormente, el nivel del agua de alimentación dentro de los domos de la caldera, debe ser controlado para mantener la seguridad de la misma y poder abastecer al 100 % la demanda del vapor, por eso es importante mantener los niveles del agua en sus puntos óptimos de control.

5.3.2.1 Nivel de agua de alimentación dentro del domo.

Los niveles dentro del domo de la caldera deben ser los límites establecidos por el fabricante. Sí el nivel en el domo no permanece dentro de los límites, puede haber remanente de agua. Sí el nivel excede los límites, habrá un exceso de agua en la calera y se puede introducir en el super-calentador o puede causar daños en la turbina y generar un mantenimiento muy costoso o paros en las turbinas o calderas. Sí el nivel es muy bajo, el sobrecalentamiento en los tubos de agua puede causar ruptura de los mismos y provocar serios accidentes, resultando una reparación mayor de la caldera, pérdida de tiempo, lesión o muerte de personas. Una ruptura o grieta mayor puede ocurrir en la unión de los tubos con el domo. Cuando el nivel en el domo es demasiado bajo, la caldera se dispara para evitar daños en los tubos y evitar grietas en los tubos que se conectan en el domo de la caldera.

Debido a la naturaleza crítica de las mediciones, una variedad de equipos son aplicados para monitorear los niveles del agua en el domo de las calderas. Un domo tiene mirillas de vidrio, electrodos de columnas y diferentes trasmisores e indicadores de presión de base, como se muestra en la figura 5.23

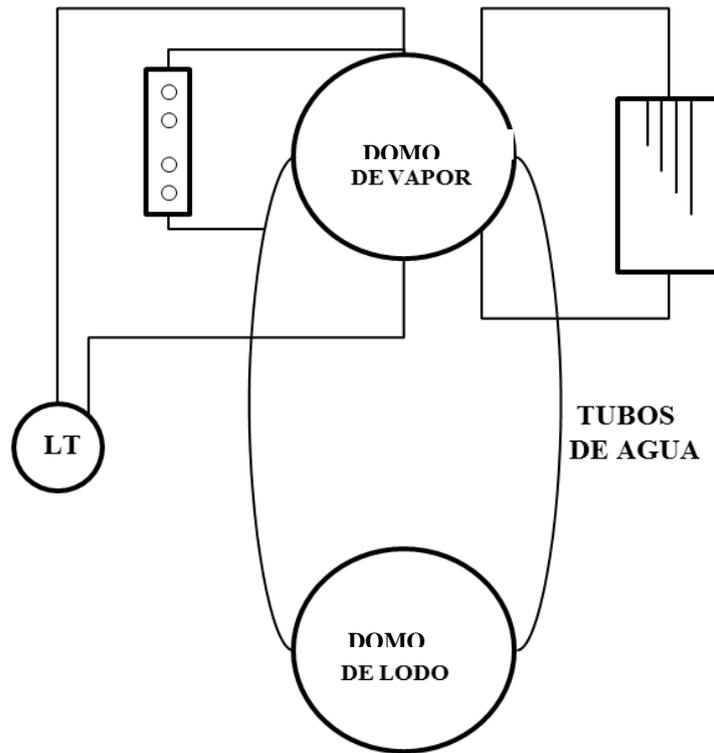


Figura 5. 23 Control del nivel da agua de alimentación en domo.

Los dispositivos de nivel para la presión diferencial, incluyendo los visores, presentan mediciones imprecisas cuando la caldera no está ajustada a los valores de diseño. Estos cambios en la presión pueden ser pasados por alto cuando las calderas funcionan a presiones más bajas, pero para la mayoría de las calderas, las correcciones deben hacerse para cambios en presión.

Un ejemplo del método correcto para la instalación de transmisores diferenciales de presión, se muestra en la figura 5.24. La correcta instalación de los transmisores impide que los sedimentos, de la línea de purga, entren en los transmisores.

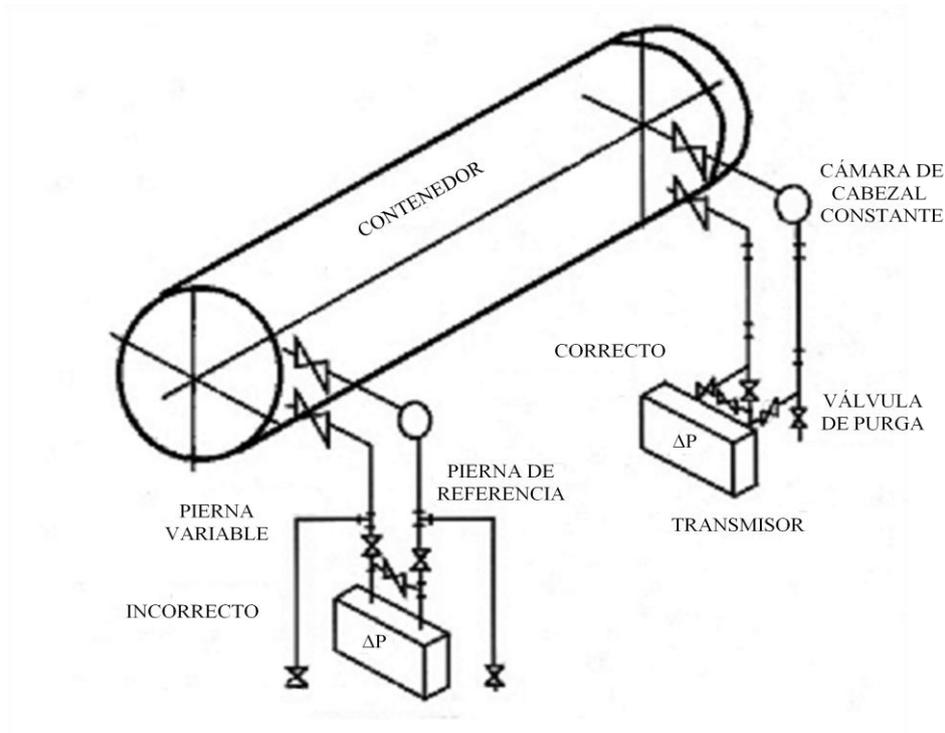


Figura 5. 24 Instalación de un trasmisor diferencial.

La indicación básica del nivel de agua en el domo es el que se muestra en la mirilla conectada en el domo de la caldera. Debido al diseño de la caldera, y de la distancia entre el domo de la caldera y el operador, la línea de visión puede no ser práctica. El tamaño de la imagen que se refleja puede ser proyectado con un periscopio arreglado con espejos, como se muestra en la figura 5.25.

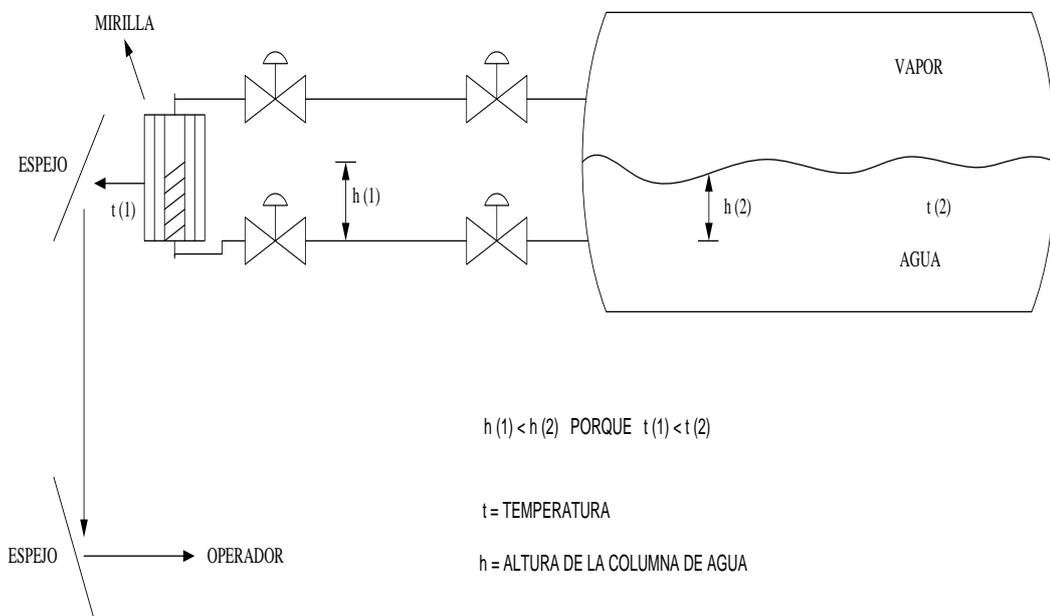


Figura 5. 25 Indicación básica de nivel de agua en domo.

Si la visión de la imagen del nivel del agua es prácticamente imposible, otros métodos de observación pueden ser necesarios. Un método es utilizar un sistema de televisión de circuito cerrado; otro método es incorporar indicadores de nivel remotos basado en el uso de la fibra óptica.

Como se muestra en la figura 5.26, que es el típico arreglo de un transmisor diferencial de presión conectado en una caldera. La señal de salida del transmisor diferencial aumenta con la disminución de la presión diferencial. El rango de la presión diferencial variará entre los 15 y 30 pulgadas, dependiendo del tamaño del domo de la caldera, con supresión de ceros de varias pulgadas.

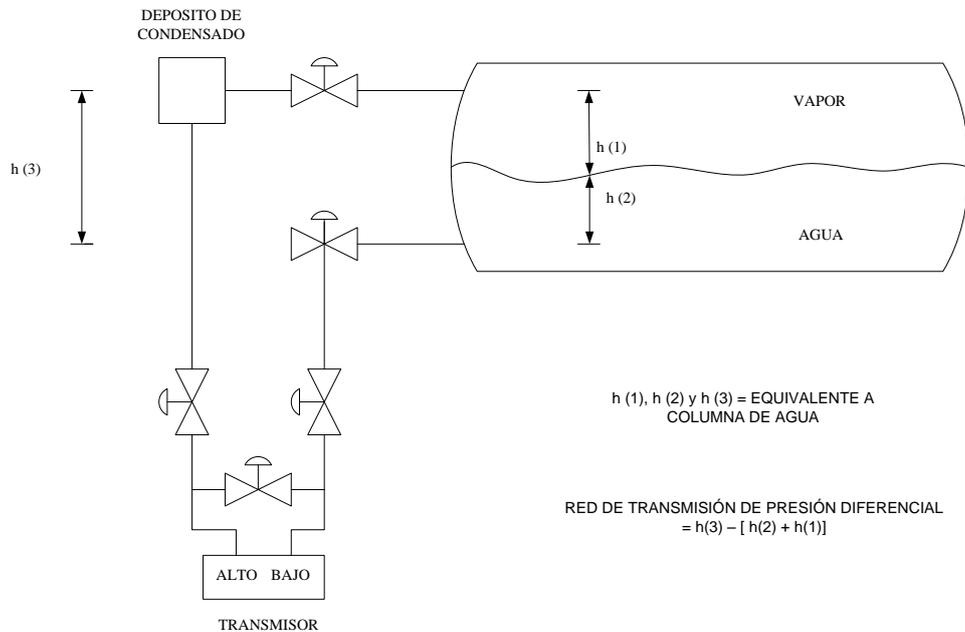


Figura 5. 26 Arreglo de transmisor diferencial de presión.

En el lado de alta presión, el transmisor nos dice que, la presión efectiva iguala a la presión del domo de la caldera más el peso de una columna de agua a temperatura ambiente teniendo una longitud igual a la distancia entre las dos conexiones de presión del domo. Entonces, por el lado de baja, la presión efectiva iguala a la presión del domo de la caldera más el peso de una columna de vapor saturado teniendo una longitud desde la conexión superior del domo hasta el nivel de agua y el peso de una columna de agua a temperatura de saturación teniendo una longitud desde el nivel del agua hasta la conexión de presión del domo inferior.

5.3.2.2 Control del nivel del agua de alimentación.

Algunas calderas utilizan cargas constantes para que el control del nivel sea únicamente con un solo elemento y la medición del nivel sea posible. Un solo elemento de control es usado al inicio de cada carga o de cargas bajas, independientemente a los cambios rápidos que se presenten en las cargas. Pero el usar un solo elemento de control también tiene sus desventajas porque los diseños de algunas de las calderas más modernas tienen un almacenaje mínimo de agua comparado con el nivel de vapor de la caldera.

Mecánicamente, un sistema de un solo elemento de control es básicamente un control proporcional. Mientras este puede trabajar satisfactoriamente en un inodoro, puede no ser satisfactorio en una caldera. Añadiendo otro sistema de control, este podría proporcionar un sistema más eficiente pero un sistema de un elemento de control puede no ser suficiente.

Un controlador con un sistema de dos elementos de control, controla la válvula del agua de alimentación y restablece la señal del nivel en el domo con lo cual es capaz de manejar algunos sistemas menos complicados.

Unidades grandes con pequeñas capacidades de almacenamiento y las unidades que experimentan fuertes cambios, de carga rápida, usualmente requieren de un sistema de tres elementos de control, mediante el cual el flujo de agua corresponde al flujo de vapor y restablece a la vez el nivel en el domo.

5.3.2.3 Disminución y aumento de agua y vapor en el interior de la caldera.

La disminución y el aumento del agua deben ser considerados cuando se determine el control de una caldera. En un rápido incremento de carga, un incremento severo en el nivel de agua puede ocurrir. La disminución y el aumento es el resultado de los cambios de presión en el domo y en los cambios en la densidad del agua. El agua en el domo contiene burbujas de vapor, similar al agua cuando hierve. Durante un incremento rápido en la carga, un incremento severo en el nivel de agua puede ocurrir porque hay un incremento considerado de volumen debido a las burbujas. Este incremento de volumen es el resultado tanto de una disminución en la presión del vapor como del incremento de la carga y por lo tanto del incremento de la generación de vapor, como se muestra en la figura 5.27

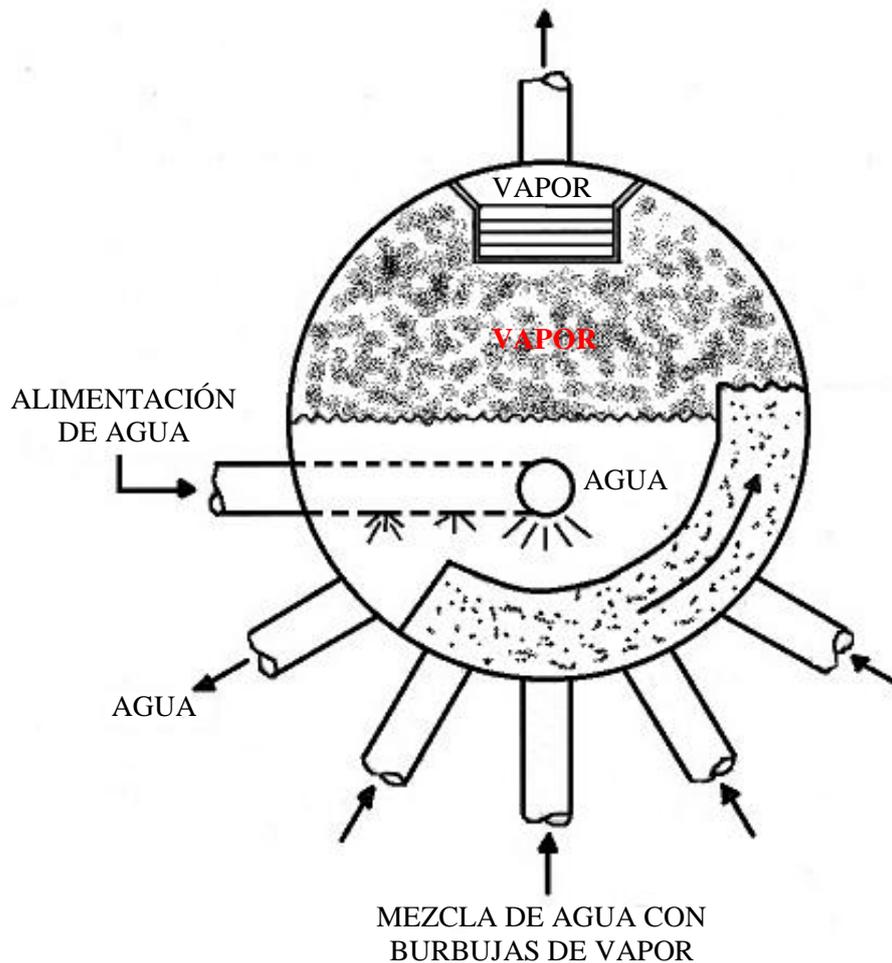


Figura 5. 27 Interior del domo del vapor.

Cuando hay una disminución de la demanda de carga, la presión en el domo aumenta y el cambio en el disparo cambia, esto reduce el volumen de las burbujas (las burbujas se hacen más pequeñas). Una repentina pérdida de carga podría ocasionar una disminución en el nivel del domo lo suficientemente grave como para disparar la caldera por bajo nivel. La frecuencia de los disparos de la caldera tiene efecto sobre el nivel del domo, pero la causa más significativa de las disminuciones y de los aumentos son los rápidos cambios en la presión del domo reduciendo o ampliando las burbujas de vapor debido a los cambios de carga.

El esquema de control de tres elementos utiliza el flujo de vapor y el flujo de agua manteniendo eficazmente la retroalimentación de agua igual que el flujo de vapor. Como la carga aumenta y disminuye, el flujo de agua aumentará o disminuirá. El control en el nivel del domo es una respuesta lenta en el circuito.

Cuando un sistema de control de un solo elemento se implementa, el transmisor de nivel (LT) envía una señal al controlador del nivel, como se muestra en la figura 5.28, que a su vez permite el aumento y la disminución de agua de alimentación, el cual depende de las necesidades de la carga. La variable de proceso (señal de entrada) en el controlador es comparada con el *set point* (SP).

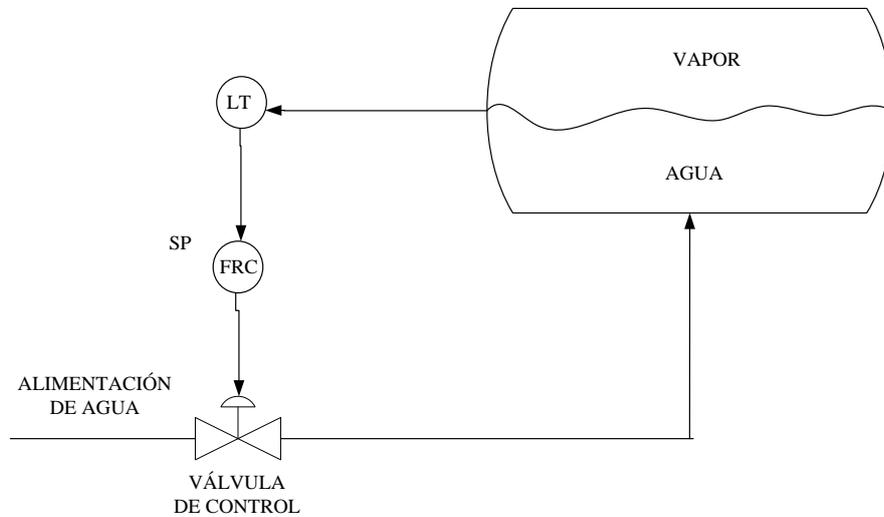


Figura 5. 28 Sistema de control de un elemento.

5.3.2.4 Sistema de control de nivel de un elemento.

Este es el sistema de control más básico, en el cual la señal de salida es modificada y ajusta por el dispositivo de control final, como se muestra en la figura 5.29, el cual es el control de retroalimentación de agua con un solo elemento.

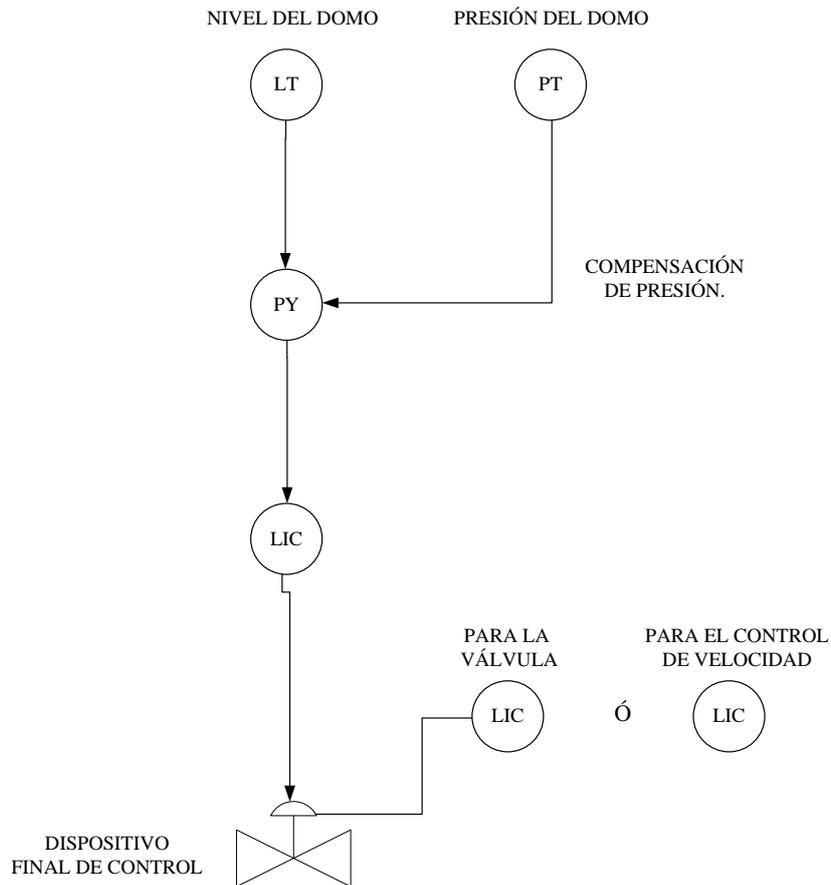


Figura 5. 29 Sistema de control de un elemento.

5.3.2.5 Esquema de control de nivel con dos elementos.

El esquema de control de dos elementos utiliza el flujo de vapor además del nivel de agua en el domo. Es una simple retroalimentación de un sistema de control de agua de alimentación, con una variable secundaria que tiene una relación previsible con la variable manipulada. La variable secundaria hace que la variable manipulada cambie con la variable primaria. El flujo de vapor ajusta la válvula de control del agua de alimentación basado en la señal del flujo de vapor y la señal controla el nivel del domo. Como el flujo de vapor aumenta o disminuye, el flujo de vapor se ajusta a la salida de la muestra y selecciona directamente el elemento final del agua de alimentación.

Como se muestra en la figura 5.30, es la presentación del diagrama de un controlador Integral-Derivativo para un control de dos elementos.

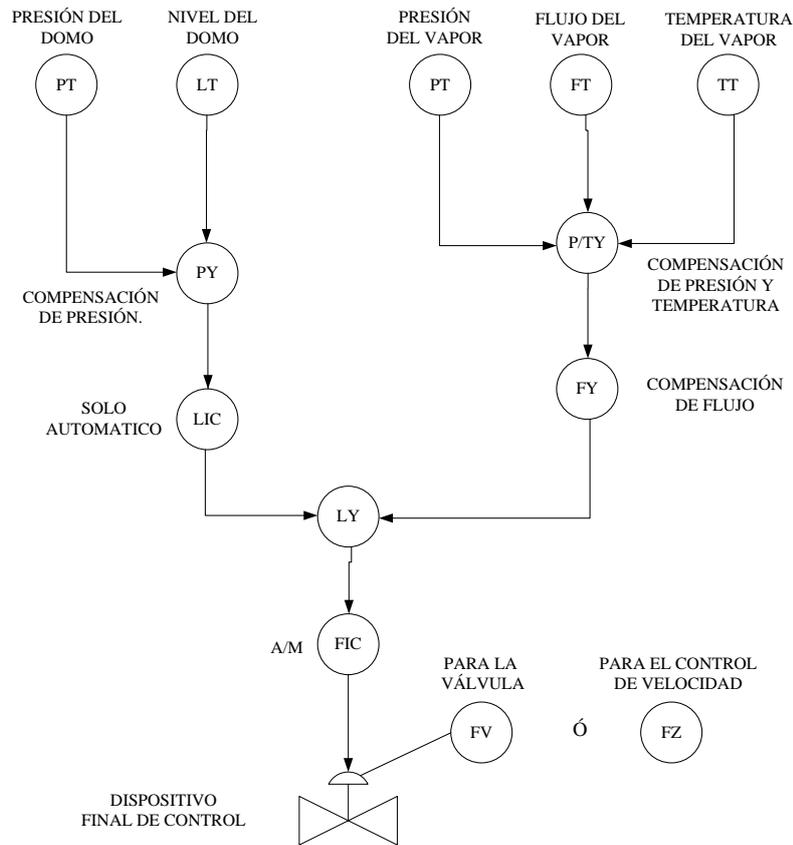


Figura 5. 30 Diagrama de control Integral/Derivativo con dos elementos.

5.3.2.6. Sistema de control de nivel de tres elementos.

El sistema de control de tres elementos utiliza el flujo de agua y vapor en suma con el nivel del domo, como se muestra en la figura 5.31. Este es un sistema simple de realimentación, el agua de alimentación y un circuito de control en cascada. El flujo de vapor ajusta la válvula de control del agua de alimentación basado en la señal de flujo de vapor y la señal del controlador del nivel del domo. Como el flujo del vapor crece y decrece, el flujo del vapor ajusta la salida del sumador y selecciona directamente en el controlador el *set point* del agua de alimentación. Mediante la adición del flujo de agua de alimentación, la variable que se mide en el controlador es la retroalimentación, por lo tanto, se controla lo que se está midiendo. El control se mejora mediante la compensación de flujo, nivel en el domo, flujo de vapor y flujo de agua.

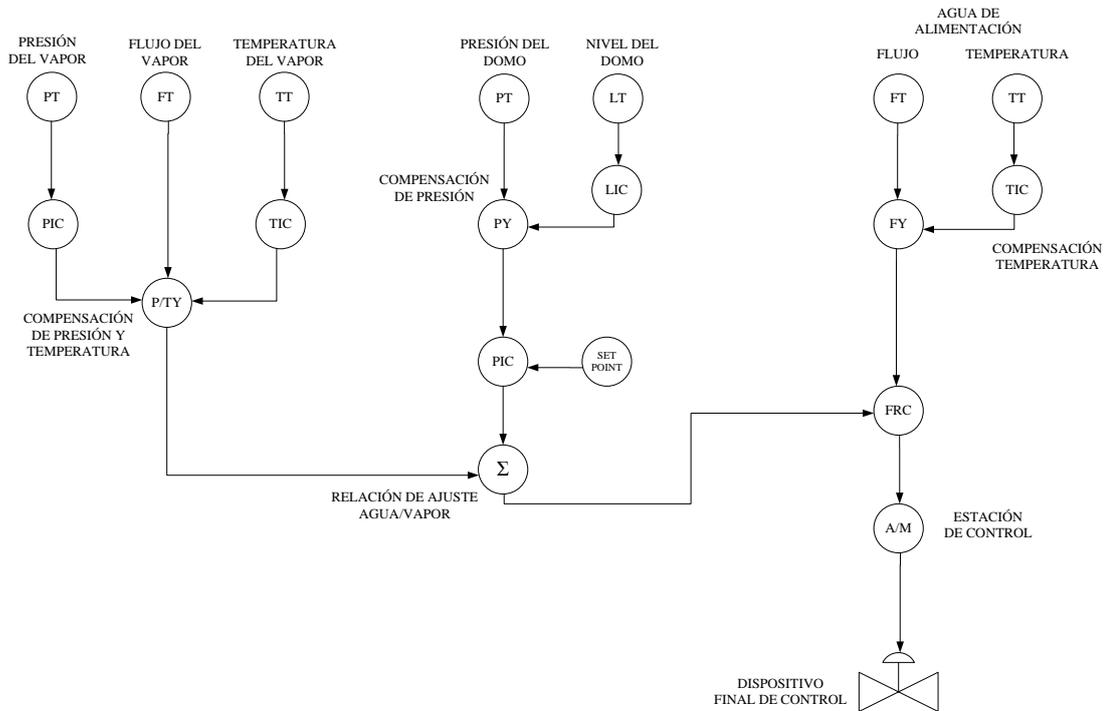


Figura 5. 31 Sistema de control con tres elementos.

Como se muestra en la figura 5.32, es la presentación del diagrama de un controlador Integral-Derivativo para un control de tres elementos.

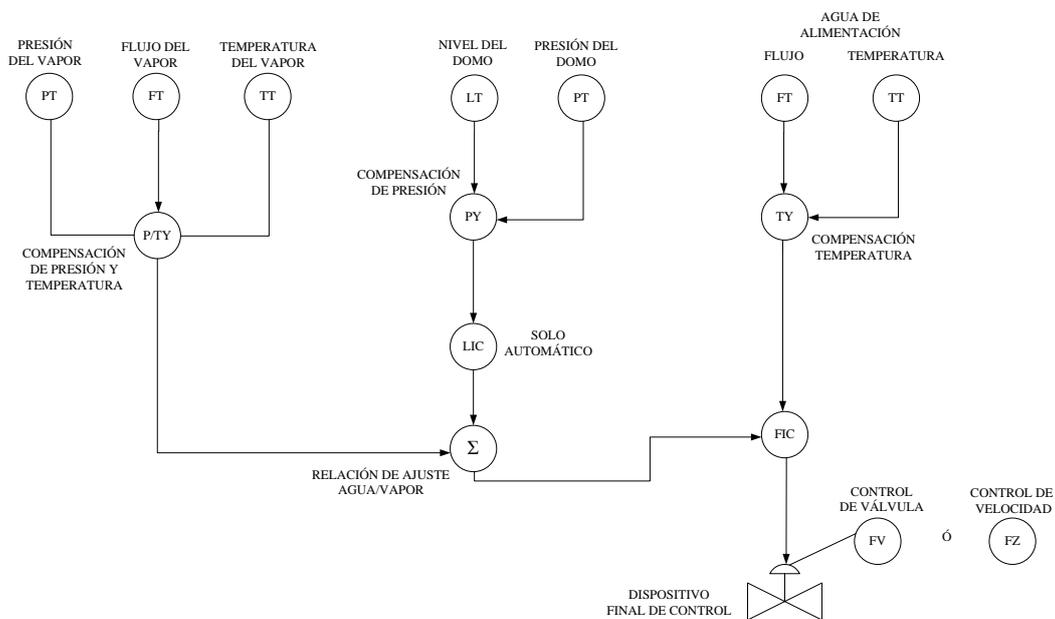


Figura 5. 32 Sistema de control Integral/Derivativo con tres elementos.

5.3.2.7 Configuración del sistema de control del nivel del domo.

El controlador del nivel del domo es configurado, para estar en acción directa o en inversa del controlador. Esto depende de la configuración del dispositivo de control final y el modo a prueba de fallas de la válvula de control. Si la válvula de control no cierra, el controlador es configurado para estar en acción inversa al controlador. Si la válvula de control no abre, el controlador es configurado para estar en acción directa al controlador. El elemento de control final puede ser una válvula de control, un control de velocidad o una combinación de ambos.

5.3.3 Sistema de control de la temperatura del vapor.

El cuarto elemento de un sistema de control es la temperatura del vapor. La función de un sistema de control de temperatura de sobrecalentamiento es mantener la temperatura del vapor de recalentamiento dentro de los límites especificados por el fabricante de las calderas. Generalmente, el objetivo es obtener una determinada temperatura final del vapor de recalentamiento de la caldera especificado en el rango de la carga. La estrategia de control debe basarse en los mecanismos de control utilizados y la filosofía del fabricante de la caldera para el control de la temperatura del vapor. La estrategia consiste en atemperación²⁴ de agua en spray (atomizada), derivación de gas, recirculación de gas, inclinación del quemador o una combinación de estos procesos. Aunque la estrategia de control descrita en esta sección usa técnicas de control PID convencionales, el uso de sistemas de control avanzados no se excluye. El primer beneficio de una temperatura constante del vapor es mejorar la economía de la conversión de la energía mecánica y reducir la cantidad de humedad en el vapor. La humedad en el vapor en exceso puede resultar en daños en la turbina. El control de temperatura constante permite una tolerancia menor en los equipos mecánicos.

Los tubos del supercalentador calientan el vapor y elimina la humedad del vapor. El vapor es controlado para una temperatura deseada por el enfriamiento del vapor con agua atomizada. Este proceso se conoce como *de-sobrecalentamiento*. El *de-sobrecalentamiento* controla la temperatura del vapor de agua atomizada en la línea del vapor, para reducir el vapor sobrecalentado a la temperatura deseada. El *de-sobrecalentamiento* puede llevarse a cabo por uno, dos o tres elementos de control.

²⁴ Atemperación: Moderar (algo o a alguien) y acomodar o adaptar (una cosa a otra); en textos referidos a sistemas de refrigeración o de calefacción es habitual encontrarse con el término atemperamiento.

5.3.3.1. Sistema de control con un solo elemento.

El control de la temperatura del vapor con un solo elemento es la estrategia de control mínimo necesario para regular la temperatura del vapor que sale de la caldera. El control de un solo elemento solo debe utilizarse en aplicaciones de carga lenta como en la construcción de sistemas de calefacción, donde la temperatura del vapor es constante, no es crítica o cuando la demanda del vapor tiene muy poca variación. Sin embargo, en la mayoría de las instalaciones este tipo de control no será suficiente para mantener la temperatura del vapor en los márgenes exigidos.

Un sistema de control de un solo elemento, como se muestra en la figura 5.33, es un típico control simple de retroalimentación. La temperatura final del vapor es medida y comparada con el *set point*, el resultado es usado para regular el flujo del agua atomizada. El bloqueo del agua atomizada evita la inyección de agua si la temperatura del vapor no es suficiente.

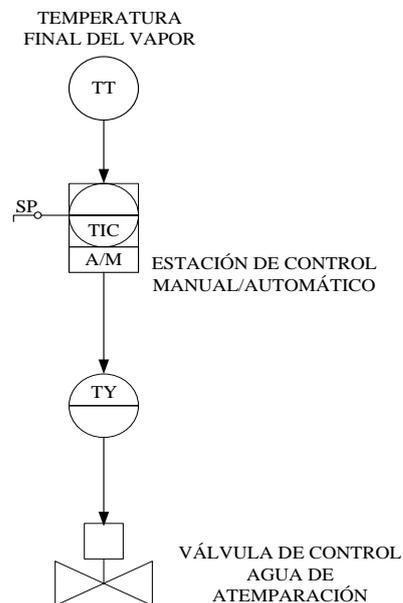


Figura 5. 33 Sistema de control con un elemento.

5.3.3.2 Sistema de control con dos elementos.

El control de temperatura de vapor con dos elementos añade una señal de retroalimentación y una señal de corrección transitoria para el control de un solo elemento. Como mínimo, la señal de retroalimentación se deriva de la variación en la demanda de carga de vapor. Esta señal de retroalimentación debe reconocer todas las

influencias más importantes en la temperatura del vapor, incluyendo los ajustes en la distribución del calor dentro de la caldera.

La estrategia del control de la temperatura del vapor con dos elementos solo debe ser usada con lentitud en aplicaciones con cambios de carga moderada o con una fuente constante de presión de agua atomizada y aplicaciones fijas de vapor a presión.

Como se muestra en la figura 5.34, la cual es un sistema de control típico retroalimentación con una variable secundaria y un índice de carga que tiene una relación predecible con la variable manipulada del agua atomizada. La temperatura final del vapor es medida y comparada con el *set point*, modificado por el cálculo de retroalimentación y el resultado es usado para regular el flujo del agua atomizada.

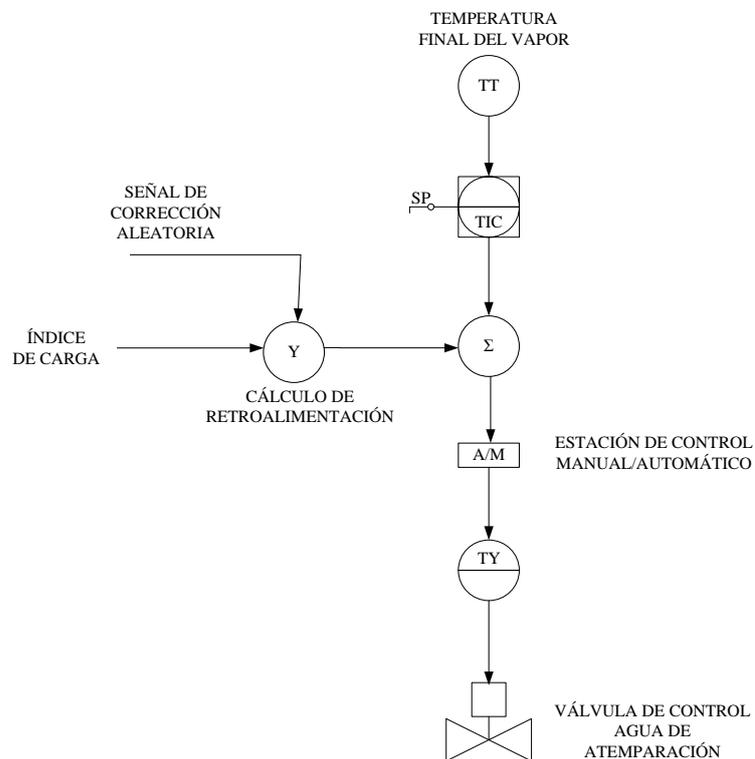


Figura 5. 34 Sistema de control con dos elementos.

5.3.3.3 Sistema de control con tres elementos.

La estrategia de control de temperatura del vapor con tres elementos se usa en aplicaciones cuando se están cambiando rápidamente las cargas, presiones variables de

vapor o variaciones de presión de agua atomizada. El sistema de control de temperatura de vapor con tres elementos añade un dispositivo de control en cascada para la estrategia de control de dos elementos para el control de la válvula del agua atomizada. La estrategia de control de dos elementos actúa como un *set point* para el desarrollo del circuito de control interno del arreglo del control en cascada.

Como se muestra en la figura 5.35, que es un controlador retroalimentado con control en cascada. La variable de proceso para el circuito de control interno es un monitor para la acción de atomizado. Aunque la temperatura del vapor inmediatamente después de la atemperación (de-sobrecalentamiento) es la variable de proceso principal y el flujo del vapor atomizado también se puede utilizar. Como mínimo, la señal de retroalimentación se deriva de la variación de la carga. Esta señal de retroalimentación debe reconocer todas las influencias más importantes en la temperatura del vapor, incluyendo los ajustes de la distribución de calor dentro de la caldera. Para presiones variables, una adecuada señal de retroalimentación debe reflejar los cambios en las propiedades termodinámicas del vapor en la temperatura final del vapor.

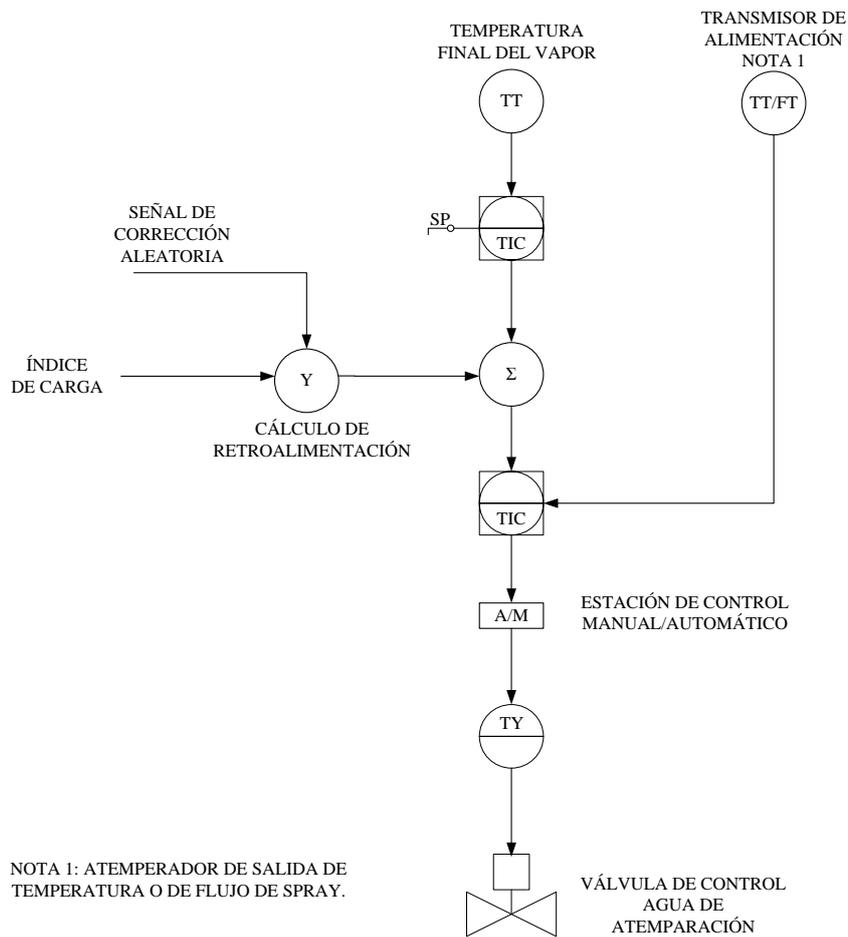


Figura 5. 35 Sistema de control de temperatura del vapor con tres elementos.

5.3.4 Sistema general del quemador.

El termino general para un sistema de seguridad es “Sistema General del Quemador” (BMS), por sus siglas en ingles “Burner Management System”. Sin embargo, también puede ser llamado sistema de seguridad de combustión del quemador de la caldera, sistema del control del quemador, sistema de seguridad de la flama, sistema de dispara de emergencia o sistema instrumentado de seguridad (SIS) por sus siglas en ingles Safety Instrumented System.

El sistema general del quemador es un sistema que controla la quema del combustible en condiciones de arranque, paro y operación de la caldera. Está diseñado para presentar el estado de todos los equipos que intervienen en la combustión en un formato conciso que ayude al operador de la caldera. El BMS inicia con condiciones seguras de operación y con el procedimiento de apagado para evitar una explosión, en caso de que exista una condición insegura, para la protección de los equipos y evitar que el personal sufra lesiones o incluso la muerte. El Sistema de Control de Procesos Básicos (BPSC),

por sus siglas en ingles Basic Process System Control, modula la entrada de aire y combustible a la caldera, en respuesta a las variaciones de carga. El sistema general del quemador es esencialmente un sistema de control encendido/apagado (On/Off) que permite el arranque de la caldera con la carga cuando existen condiciones de seguridad. Sí una condición insegura se presenta, el BMS apaga automáticamente el suministro del combustible o las funciones de la caldera para ir a un estado seguro.

5.3.4.1 Detección de llama.

Los detectores de llamas pueden ser de autocontrol, ya sea mecánicamente o electrónicamente, sí el detector se completa con el modo de llama demostrado. El fracaso de cualquiera de los componentes no puede dar lugar a una falsa indicación de la llama. La configuración del escáner depende de la clase de ignición.

La luz visible, infrarroja (IR) y la ultravioleta (UV) son las principales tecnologías utilizadas para detectar la llama. En algunas aplicaciones, el parpadeo de la llama se utiliza en combinación con la infrarroja y la ultravioleta. La detección de la llama por ultravioleta es principalmente para el servicio del gas. La detección de la llama por infrarrojo puede ser usado en combustibles como el petróleo, el carbón y el licor negro, así como el gas. La luz visible y la infrarroja es el 90% de la llama y la luz ultravioleta es entre el 1 y 10 % de la llama. Cuando se mira la llama, el detector de la llama debe apuntar hacia abajo u horizontal, en la llama.

5.3.4.2 Requerimiento de independencia del control (Hardware y Software).

El sistema de manejo del quemador tiene que tener una lógica independiente. Entrada independiente, sistema de salida independiente y suministro de energía independiente. También debe ser funcional y estar separado físicamente de otros sistemas lógicos como los de la caldera.

Para las calderas con un solo quemador, los sistemas de control de la caldera se permite combinar con el sistema de manejo del quemador solo si la relación aire-combustible se maneja externamente al sistema de control de la caldera, por ejemplo la relación aire-combustible bloquearlo con el posicionamiento mecánico del sistema. Las funciones de seguridad del manejo del quemador deben incluir, pero no limitarse solo con estas, el tiempo y enclavamiento de purga, los paros de seguridad obligatorios, el tiempo de

prueba para la ignición y supervisión de la llama. Un sistema lógico se está limitado para un generador de vapor.

Las alarmas deben ser generadas para indicar el mal funcionamiento del equipo, condiciones hazzard y mal funcionamiento. El diseño del sistema debe analizar la lógica de la falla de los componentes y como mínimo, las fallas siguientes deberán evaluarse y dirigirse a:

- Interrupciones, caídas, recuperaciones y pérdidas parciales de poder.
- Pérdida y estrago de memoria.
- Entradas y salidas (falla-encendido, falla-apagado).
- Fallas del proceso.
- Fallo en la bobina del relé.
- Falla en el tiempo.

Nota: Estos son algunos casos que pueden aplicarse a los sistemas pero no son todos.

El diseño de los sistemas lógicos para el manejo de los quemadores puede incluir y adaptar los siguientes requerimientos:

- El diagnostico debe ser incluido en el diseño para supervisar las funciones del procesador de lógica.
- El sistema lógica de fallas no debe impedir la intervención adecuada del operador. Un método debe ser provisto para apagar la caldera o ir a un estado seguro en el evento de una falla en el sistema lógico.
- La lógica debe ser protegida de cambios no autorizados. La lógica no debe ser cambiada mientras el equipo asociado está en funcionamiento.
- El tiempo de respuesta del sistema debe ser corto para evitar efectos negativos sobre las aplicaciones.
- Protección frente a los efectos del ruido que impida un funcionamiento erróneo.
- El operador debe ser provisto con un manual dedicado al interruptor (es) que accionará el relé principal de disparo del combustible de forma directa e independiente.

Nota: Estos son algunos casos que pueden aplicarse a los sistemas pero no son todos.

5.3.4.3 Control de purga.

La purga se requiere antes de encender el primer quemador para eliminar cualquier material combustible que se haya acumulado en la caldera o en cualquiera de sus componentes. Este es un momento crítico antes de la ignición del primer quemador. Los requisitos de la purga varían para cada caldera.

La purga de la caldera con un solo quemador, debe alcanzar al menos el 70% del flujo de aire de su máxima capacidad continua de la unidad. La purga debe ser por lo menos ocho cambios de aire. El flujo de aire durante el período de apertura de la compuerta y el retorno a la posición de apagado está incluido en el cómputo del tiempo de ocho cambios de aire.

El flujo de aire para la purga en los tubos de humo de la caldera debe alcanzar al menos el 70 % necesario en su máxima capacidad continua de la unidad. La purga del quemador y el paso a la caldera de gas debe ser al menos cuatro cambios de aire. Durante la purga, la compuerta de aire debe ser llevada a la posición totalmente abierta. El flujo de aire durante el período de apertura de la compuerta y el retorno a la posición de apagado está incluido en la programación del tiempo de cuatro cambios de aire.

El lecho fluidizado y la carcasa de la caldera deben ser purgadas con no menos de 5 cambios de volumen de aire pero, en cualquier caso, por un período continuo de no menos de 5 minutos bajo las siguientes condiciones:

- La purga debe incluir el aire y los conductos de gas, el calentador de aire, el quemador, el lecho y la caja de viento.
- La purga no debe ser inferior al 25 % de la masa de diseño a plena carga del flujo de aire.
- El flujo de aire total no debe ser inferior a la tasa de purga.

5.4. Sistema de encendido y protección.

El sistema de encendido y protección de la Caldera Tipo Paquete Izquierda está constituido básicamente por una lógica de operación y detectores de flama, como ya se menciono anteriormente, tiene por objeto el prevenir de alguna situación riesgosa la operación continua de la caldera y asistir al operador durante el arranque y paro de quemadores y equipo asociado.

Las funciones principales de los sistemas de protección son:

- Prevenir la caldera de una posible explosión.
- Prevenir a los quemadores y al equipo de combustible de alguna operación anormal.
- Evitar falsos disparos del equipo de combustión cuando no exista alguna situación insegura.
- Proporcionar un método o secuencia de operación para ser usado en el Arranque, Paro, Operación y Control del equipo de combustible.
- Monitorear la operación de la caldera.

5.4.1 Sistema de control de encendido.

Para el sistema de encendido de la caldera, se encuentran varios modos de controlarlo de los cuales se derivan los siguientes:

- Control manual.
- Control manual con sistema de comprobación de flama.
- Control Remoto de Secuencia Manual (Manual-Supervisado).
- Control Automático de Secuencias.
- Control y Operación de Quemadores sin Supervisión del Operador.

5.4.1.1 Control Manual.

Este concepto se aplica eventualmente en condiciones extremas de operación cuando es necesario operar manualmente todo el equipo. En este caso, la verificación de las condiciones existentes para el quemado del combustible dependen de los conocimientos del personal de operación, al observar, evaluar y decidir cualquier acción que se deba llevar a cabo durante el arranque y paro de quemadores.

5.4.1.2 Control manual con Sistema de Comprobación de Flama.

Se refiere a la aplicación de un control semiautomático del encendido del piloto incluyendo comprobación de la flama y un sistema para entrelazar pre-encendido, purga y permiso para encender el quemador. La protección se efectúa a través del detector de flama. El encendido se inicia localmente con la operación manual de los registros de aire y los quemadores. Si después de un pequeño tiempo no se detecta la flama, la válvula de corte se dispara; de igual manera ocurrirá si durante la operación normal del quemador hay pérdida total de flama.

Este es un sistema manual local y no será operado desde una operación remota porque además de la detección de flama, no hay ninguna otra vigilancia para el quemador excepto la responsabilidad del operador.

5.4.1.3 Control Remoto de Secuencia Manual (Manual-Supervisado).

Este sistema permite la operación manual remota desde el cuarto de control, pero usa además de la detección de flama, sistemas de instrumentación, sensores y switches de posición para inteligencia, se conoce la posición de válvulas de combustible y registros de aire y se dispone de sistemas entrelazados para satisfacer la purga del hogar, encendido, operación de quemadores y disparo de combustible.

Con este sistema el operador participa en la operación del equipo de combustible. El operador controla cada secuencia del procedimiento de operación de quemadores desde el cuarto de control y gabinetes locales de encendido; la lógica del sistema efectúa los pasos principales de operación, obedeciendo las órdenes del operador.

5.4.1.4 Control Automático de Secuencias.

Esta automatización del control de secuencias permite el arranque del equipo de quemado de combustible oprimiendo un simple botón. La automatización reemplaza al operador en el control de las secuencias de operación. El operador participa y monitorea con su inteligencia la secuencia de operación indicada por luces y señales de instrumentación desde los procedimientos del proceso de arranque hasta completarlos con la unidad en servicio de control automático.

5.4.4.5 Control y Operación de Quemadores sin Supervisión del Operador.

Finalmente se ha logrado un grado avanzado de automatización del sistema de combustible que permite que el equipo auxiliar de quemadores y el mismo quemador sean colocados en servicio o disparo, sin supervisión del operador. El sistema reconoce por sí mismo el nivel de combustible demandado a la caldera, sabe el rango de operación del equipo de combustible que está en servicio, toma una decisión concerniente a las necesidades de arrancar o para el equipo de combustible y selecciona el siguiente incremento de combustible basándose en las características de combustión de los quemadores de servicio. Tales demandas de operación pueden ser iniciadas por el sistema sin el conocimiento inmediato del operador.

5.4.2. Detección de flama.

La detección de la flama es el medio de asegurar la presencia o ausencia de flama en el quemador individual e independiente del combustible que se está quemando. La presencia o ausencia de flama es la retroalimentación más importante en un sistema secuencial de protección de la caldera. Toda retroalimentación a la lógica sirve para que el equipo no sea operado inadvertidamente de una manera incorrecta. El problema de la detección satisfactoria de la flama ha hecho posible la evolución de los dispositivos sensores de flamas desde los primitivos interruptores de temperatura de la chimenea, las varillas rectificadoras de la flama, las celdas fotoeléctricas y las celdas de sulfito de plomo, hasta el refinamiento del bulbo sensor ultravioleta, el desarrollo de la celda fotovoltaica y actualmente el sensor ultravioleta en estado sólido.

5.4.2.1 Detección Ultravioleta.

Este tipo de sensor se usa para vigilar la flama del quemador de gas natural, combustóleo y algunas aplicaciones limitadas en quemado de carbón. Actualmente su mejor aplicación se obtiene en gas natural debido a la abundancia de radiación ultravioleta producida por la combustión del hidrógeno en el gas natural. Se ha comprobado que los sensores ultravioleta tienen limitaciones de detección de flama cuando se quema diesel, petróleo, bunker o carbón, debido a que con estos combustibles la detección ultravioleta no cumple correctamente con la indicación confiable de la presencia o ausencia de flama. Una de las fallas de los bulbos sensores ultravioleta es quedarse ionizados con ausencia de flama, problema que a la fecha se ha superado con la implementación de un sistema de autochequeo a los detectores de flama de este tipo.

5.4.2.2 Detección Infrarroja.

Los detectores de flama infrarrojos se han desarrollado para usarse en la detección de flama de gas, aceite y carbón ya que ondas las flamas radian energía de intensidad variable desde la infrarroja hasta la ultravioleta. Sensores utilizan un fotodiodo de silicón fotovoltaico y un sensor de sulfuro de plomo para sensar las radiaciones de la flama que producen una frecuencia desde el rango de la luz visible hasta longitudes de onda de 3000×10^{-9} metros en el espectro infrarrojo, la cual es amplificada en la cabeza sensora y procesada para salidas binarias de reconocimiento de flama y salidas analógicas para brillantez e intensidad de la flama.

5.5 Propuesta de control para caldera.

Antes de que se desarrollaran los Sistemas de Control Distribuido y los sistemas electrónicos, era la responsabilidad del operador alinear el set point y la variable de proceso antes de transferir a control automático. Ahora, estos sistemas tienen la capacidad de dar seguimiento al set point y a la variable de proceso por lo que están alineadas cuando se transfiere al control automático. Con lo anterior no quiere decir que se va a prescindir del operador, únicamente facilitará el manejo de la misma y reducirá riesgo de alguna explosión. De acuerdo a lo descrito en los capítulos anteriores, se asignarán los controles que se implementarán en la caldera, todos dentro de lo establecido por las normas de seguridad y con las características de la misma.

5.5.1 Sistema de control implementado para la caldera.

La lógica que se implantará para la caldera de tipo paquete cae en la categoría de “Sistema de Control Remoto de Secuencia Manual (Manual-Supervisado)” donde se toma en cuenta el grado de flexibilidad de operación permitida con el “Sistema de Control del Quemador” y está estrechamente relacionada con el grado de participación del operador. Éste método permite la participación del operador en los niveles más importantes de la secuencia del sistema.

5.5.2 Tipo de Detector para el Quemador de la caldera.

En la caldera Tipo Paquete Izquierda se propone utilizar la detección ultravioleta con auto-chequeo y se tendrá un Detector de Flama común, para el piloto y el Quemador de Gas.

5.5.3 Sistema de control del nivel del domo o de agua de alimentación.

El sistema de control que se implantará para la caldera es un sistema de tres elementos que son: El flujo de vapor, el flujo de agua de alimentación y el nivel del domo, donde el flujo del vapor corregido algebraicamente por el nivel del domo actúan como señal anticipatoria para demandar el flujo de agua requerido el cual es retroalimentado al sistema para establecer que la demanda ha sido satisfecha.

Este sistema tiene el propósito de mantener constante el nivel del agua en el domo del vapor durante la operación normal de la caldera por lo tanto la variable a controlar es el nivel del domo el cual se debe mantener constante en su nivel.

Pero un cambio en la carga del vapor teniendo el nivel del domo normal, el flujo del vapor al cambiar, solicita un cambio directamente proporcional en la apertura de la válvula de control del agua y por consiguiente modifica el flujo del agua de alimentación hasta igualar este al flujo del vapor, pero si esta condición no es suficiente para mantener normal el nivel del agua del domo, el cambio que tenga el nivel corrige en forma inversa a la señal del flujo del vapor para establecer una nueva apertura de la válvula de control de agua de alimentación.

5.5.4 Sistema de control de temperatura del vapor.

El sistema de control de temperatura del vapor que se implementará para la caldera es de un solo elemento, donde el vapor sobrecalentado es atemperado en el cabezal de vapor a la salida de la caldera para bajar y mantener constante la temperatura de acuerdo a los requerimientos de la planta en lo que se requiere a la temperatura del vapor sobrecalentado.

Este sistema tiene el propósito de mantener constante la temperatura del vapor sobrecalentado (set point = 616.16 K) por medio de la regulación del agua de atemperación a través de su correspondiente válvula de control.

Por lo tanto, en este caso la temperatura del vapor es la variable de proceso a controlar y se mide con su respectivo elemento de medición/trasmisor localizado en el cabezal de la caldera después del atemperador, el cual envía su señal al controlador de temperatura.

El controlador, de acuerdo a la desviación que tenga la señal de la temperatura con relación a su set point, envía una señal directamente proporcional a la válvula de control de agua de atemperación para reajustar la temperatura del vapor al valor requerido por el set point.

La señal de salida del controlador permanece estable cuando la temperatura de operación del vapor es igual al valor del set point establecido.

5.5.5 Sistema de control de combustión.

El sistema de control de combustión que se implementará a la caldera será el de límites cruzados (split range) aire-combustible y tiene el propósito de mantener en operación automática la relación del aire y del combustible dentro de los parámetros fijados en la operación manual de la caldera.

Este sistema de control se forma con el control (maestro) de la presión del vapor, con el control de flujo del aire de combustión, con el control del flujo del combustible y con el control de ajuste de exceso de aire.

5.5.5.1 Sistema de control (maestro) de la presión de vapor.

Este sistema tiene el propósito de mantener constante la presión del cabezal general de vapor por medio de la regulación del flujo de aire de combustión y del flujo de gas combustible al quemador.

Por lo tanto, la presión de vapor en el cabezal general es la variable de proceso a controlar y se mide con su correspondiente transmisor de presión localizado en el cabezal general, el cual envía su señal al controlador (maestro) de presión.

El controlador, de acuerdo a la desviación que tenga la señal de la presión con relación a su set point, envía una señal inversamente proporcional al variador de velocidad del ventilador de tiro forzado y a la válvula de control del gas combustible para establecer la demanda de flujo de aire y de flujo de combustible al quemador.

La señal de salida del controlador permanece estable cuando la presión de operación del vapor es igual al valor del set point establecido.

5.5.5.2 Sistema de control del flujo de aire de combustión.

La señal del control (maestro) de presión de vapor, se compara en términos de porcentaje en un selector de señal con la señal del flujo de gas combustible y selecciona automáticamente la mayor de entre las dos señales.

Esta condición de limitación cruzada de la demanda permite que durante un aumento de carga la señal del maestro conduzca al aire y cuando disminuye la carga, entonces la disponibilidad de combustible es la señal que conduce al aire, en ambos casos, para asegurar que durante los cambios de carga se disponga siempre de mayor aire que de combustible.

La señal de demanda (señal maestra) se indica como set point en el flujo de aire de combustión.

5.5.5.3 Sistema de control de flujo de gas combustible.

La señal del control (maestro) de presión de vapor, se compara también en términos de porcentaje en un selector de señal con la señal del flujo de aire y selecciona automáticamente la menor de entre las dos señales.

Esta condición de limitación cruzada de la demanda permite que durante un rechazo de carga la señal del maestro conduzca al combustible y cuando aumente la carga, entonces la disponibilidad de aire es la señal que conduce al combustible, en ambos casos, para asegurar que durante los cambios de carga se disponga siempre de mayor aire que de combustible.

La señal de demanda (señal maestra) se indica como set point en el flujo de gas de combustible.

5.5.6 Diagrama general del control de la caldera.

El control propuesto para la caldera tipo paquete, mencionada en los puntos anteriores, da la facilidad de poder realizar su diseño gráfico para colocar los instrumentos seleccionados en sus respectivas posiciones y poderlos llevar a su lugar, físicamente, en la caldera.

6. Instrumentación.

Para la mayoría de las mediciones el cambio en la variable que se mide se transforma en el cambio de alguna otra variable (señal de medición), la cual a su vez opera el instrumento e inicia la acción de control o puede convertirse en una señal de medición. Así por ejemplo, la medición de flujo utilizando una placa de orificio o un tubo venturi (elemento primario) desarrolla una presión diferencial (señal de medición), la cual puede operar directamente un indicador, registrador o puede convertirse en una segunda señal de medición (neumática o eléctrica) que opera al dispositivo. La señal (analógica) eléctrica o neumática en los dispositivos modernos se convierte en una señal digital que a su vez puede enviarse a una computadora o a otro dispositivo de control. La señal analógica se remite a un transductor que es un dispositivo que tiene la misión de recibir energía eléctrica, mecánica, neumática, etc. y suministra otra energía de diferentes características dependiendo de los que recibió.

6.1 Clasificación de los instrumentos.

Los instrumentos son proporcionados para monitorear las variables claves del proceso durante la operación de la planta. Estos están incorporados al lazo de control o usados para el control manual de la operación. Ellos también pueden ser parte de un sistema de control por computadora. Los instrumentos monitoreando las variables críticas del proceso deben estar equipados con alarmas automáticas para alertar al operador sobre situaciones críticas y peligrosas.

Con el fin de entender mejor los instrumentos que seleccionaremos para el control e instrumentación de la caldera, será conveniente aclarar algunos conceptos acerca de los tipos de instrumentos.

Los instrumentos de medición y control son relativamente complejos y su función puede entenderse si se clasifican de manera adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, pero básicamente se consideran dos tipos: por la función del instrumento y por la variable del proceso.

6.1.1 Instrumentos por su función.

Los instrumentos por su función son aquellos que están en contacto con el fluido o variable, utilizando o absorbiendo energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. Los

ejemplos más típicos son las placas de orificio y los elementos de temperatura (termopares o termo-resistencias). Cabe indicar que los instrumentos compactos como manómetros, termómetros, transmisores de presión, etc. ya se supone que el elemento primario está incluido dentro del propio instrumento. Sólo se mencionarán algunos instrumentos utilizados, no por esto son los más importantes.

6.1.1.1 Trasmisores.

Son aquellos instrumentos que captan la variable de proceso, generalmente puede ser a través de un elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática (3-15psi), electrónica (4-20 mA), pulsos protocolarizada (hart) o bus de campo (Fieldbus, Foundation, Profibus, etc.) Estos instrumentos dan una señal continua de la variable de proceso.

Dentro de los trasmisores los hay ciegos (sin indicador local) y con indicador local incorporado.

6.1.1.2 Indicadores locales.

Son aquellos instrumentos que captan la variable de proceso y la muestran en una escala visible localmente. Los indicadores locales más utilizados son el manómetro (presión), termómetros (temperatura), rotámetros (flujo), etc. Normalmente estos instrumentos no llevan electrónica asociada, aunque también se consideran indicadores locales a los indicadores electrónicos conectados a los trasmisores. Estos últimos pueden ser analógicos o digitales.

6.1.1.3 Interruptores.

Son aquellos instrumentos que captan la variable de proceso y, para un valor establecido actúan sobre un interruptor, es decir, cambian de estado de reposo a activado cuando el proceso llega a un valor predeterminado. Es un instrumento todo-nada.

Los instrumentos más habituales son los presostatos (presión), termostatos (temperatura), interruptores de nivel, flujostatos (flujo), etc.

6.1.1.4 Convertidores.

Son aquellos instrumentos que reciben un tipo de señal de un instrumento y la modifican a otro tipo de señal. Pueden ser convertidores de señal neumática a electrónica, de mV a mA, de señal continua a tipo contacto, etc.

6.1.1.5 Elementos finales de control.

Son aquellos instrumentos que reciben un tipo de señal procedente de un controlador y modifica el flujo del fluido o agente de control. Los más habituales son las válvulas de control, servomotores o variadores de frecuencia.

Otros tipos de instrumentos cada vez menos utilizados son los registradores y controladores locales.

6.1.2 Instrumentos por variable de procesos.

La medición por presión, junto a la de la temperatura y nivel, son las variables de procesos más utilizadas en los procesos industriales. Se clasificarán las diferentes tecnologías de acuerdo con las prácticas más habituales de su utilización.

Para definir la clasificación de las diferentes tecnologías que están basadas en diferentes conceptos, se clasificarán de acuerdo con las prácticas más habituales de utilización.

6.1.2.1 Instrumentos locales de presión.

Los indicadores de presión o manómetros más utilizados son los basados en el tubo de “Bourdon”. El tubo de Bourdon es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, este tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora. El metal solo se puede deformar dentro de un rango limitado para evitar la deformación permanente. El material habitualmente utilizado suele ser acero inoxidable o aleaciones especiales tipo monel. Los rangos de utilización son desde 0 bar a cientos de bar.

Otra tecnología de medición local de presión, es con la utilización de manómetros de diafragma. El diafragma consiste en una o varias capsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. Al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento. Se suelen aplicar para pequeñas presiones.

Por último, otra forma de medición local es la basada en el principio de Fuelle. El principio es parecido al diafragma compuesto, pero basado en una sola pieza flexible

axialmente y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable. Tiene como ventaja su gran duración y se suele emplear para pequeñas presiones.

6.1.2.2 Interruptores de presión.

Los interruptores de presión o presostato, utilizan la misma tecnología que los manómetros, con la diferencia que les incluye un contacto eléctrico calibrado a un valor de presión, de tal manera que dicho contacto cambia de estado cuando el valor de la presión llega a dicho valor.

6.1.2.3. Trasmisores de presión.

Este tipo de instrumentos de presión convierte la deformación producida por la presión en señales eléctricas. Una diferencia respecto a los anteriores es la necesidad de incluir una fuente de alimentación eléctrica, mientras que tiene como ventaja las excelentes características dinámicas, es decir, al menor cambio producido por deformación debido a la presión, es suficiente para obtener una señal perfectamente detectada por el sensor.

Algunos transmisores de presión más habituales son los siguientes:

- ✓ Trasmisores de presión capacitivos
- ✓ Trasmisores de presión resistivos
- ✓ Trasmisores de presión piezoeléctricos
- ✓ Trasmisores de presión piezoresistivos o “Strain Gage”
- ✓ Trasmisores de presión de equilibrio de fuerzas
- ✓ Trasmisores de presión diferencial.

6.1.3 Instrumentos de Flujo

Las medidas de flujo tienen una gran importancia dentro de los procesos ya que se utilizan habitualmente para control de procesos y para medidas de contabilidad, por lo que la selección de la mejor tecnología tiene una gran implicación. Así por ejemplo, los instrumentos de flujo se utilizan para contabilizar productos dentro de la propia planta, con el exterior, etc. En cuanto al control de procesos, la medición de flujo es imprescindible para poder realizar control automático, así como para optimizar rendimientos en las unidades de producción aplicando balances de materia.

6.1.3.1. Medidores Deprimógenos.

El método más ampliamente utilizado para la medida del flujo en las plantas de procesos es el utilizado por presión diferencial. Para esto se utilizan elementos primarios:

- ✓ Tubos Venturi.
- ✓ Toberas.
- ✓ Tubos Pitot.
- ✓ Placas de orificios.
- ✓ Tubos Annubar.

Dentro de los anteriores, el sistema más barato y utilizado son las placas de orificios. Los elementos deprimógenos están basados en crear una restricción en la tubería al paso de un fluido, lo que hace aumentar la velocidad disminuyendo al mismo tiempo la presión, permaneciendo la energía total (cinética, potencial e interna) constante.

6.1.3.2 Instrumentos de área variable.

Los instrumentos de flujo por área variable utilizan el mismo principio de medida que los instrumentos por presión diferencial, es decir, la relación entre la energía cinética y la energía debida a la presión.

En estos instrumentos el área de la restricción cambia al mismo tiempo que el flujo, permaneciendo constante la presión diferencial. El instrumento de área variable por excelencia es el rotámetro, el cual consta básicamente de un tubo vertical troncocónico, de cristal o de armadura metálica, en cuyo interior se encuentra un flotador.

6.1.4. Instrumentos de temperatura.

Los instrumentos de temperaturas son equipos capaces de convertir la variación de temperatura en señales eléctricas equivalentes. Estos instrumentos juegan un papel muy importante en el monitoreo de la cantidad de calor presente en algún punto específico de un sistema.

6.1.4.1 Termistores.

Los termistores son un dispositivo semiconductor cuya resistencia cambia con la temperatura. Los termistores son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura y pueden ser calentados externamente por el medio ambiente o internamente por una corriente a través suyo.

Los cambios de resistencias hacen que también cambien el voltaje o la resistencia que a la entrada del sistema electrónico donde son procesados. Esta característica los hacen muy adecuados en mediciones y control de temperatura.

Existen dos clases generales de termistores, los de coeficiente negativo de temperatura NTC (Negative Temperature Coefficient) y los de coeficiente positivo de temperatura PTC (Positive Temperature Coefficient). En un termistor NTC la resistencia disminuye a medida que la temperatura aumenta y en un termistor PTC la resistencia aumenta a medida que la temperatura disminuye.

Entre los termistores se encuentran:

- Burbuja montada.
- Tubulares o de barra.
- De disco.
- De sonda de vidrio.
- Alta temperatura.
- Puente de Wheatstone.

6.1.4.2. Termopares.

El termopar es un dispositivo que convierte la energía calorífica en energía eléctrica, cuando pasa corriente eléctrica por un circuito, formado por dos metales diferentes cuya unión se mantiene a diferentes temperaturas, esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales diferentes cuando una corriente circula por la unión y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe una diferencia de temperatura.

Existen siete tipos de termopares conocidos como E, S, T, J, K, B, N y R por su composición química variada, como se muestra en la tabla 6.1.

TIPO	ALCANCE TEMPERATURA C	MATERIALES Y ALEACIONES (+) Vs (-)
METAL - BASE		
E	-270 a 1000	níquel - cromo Vs cobre - níquel
J	-210 a 1200	hierro Vs cobre - níquel
T	-270 a 400	cobre Vs cobre - níquel
K	-270 a 1372	níquel - cromo Vs níquel - aluminio
N	-270 a 1300	níquel - cromo - silicio Vs níquel - silicio - magnesio
METAL - NOBLE		
R	-50 a 1768	platino - 13% rodio Vs platino
S	-50 a 1768	platino - 10% rodio Vs platino
B	0 a 1820	platino - 30% rodio Vs platino - 6% rodio

Tabla 6. 1 Termopares.

6.1.5. Instrumentos de nivel.

Los instrumentos de nivel de líquidos trabajan midiendo, directamente, la altura de líquido sobre una línea de referencia, la presión hidrostática, el desplazamiento producido en el flotador por el propio líquido contenido en el tanque de proceso aprovechando características eléctricas del líquido.

6.1.5.1 Columna de nivel.

Se puede tener una indicación visual en líquidos limpios, si parte del tanque está fabricado con algún material transparente. Si la columna de nivel se monta en una tubería de derivación con llaves de paso en cada extremo, se logra aislar del tanque principal, lo cual permite retirar para su mantenimiento.

6.1.5.2 Switch de flotador.

Es el switch de nivel más conocido y simple. Consiste en un cuerpo flotante (flotador) montado sobre un brazo móvil y acoplado magnéticamente a un micro interruptor (externo al proceso). También hay versiones que consisten en un flotador redondo con pequeños imanes que suben a lo largo del tubo. En el tubo hay uno o varios relés de lámina. Los relés de lámina harán conmutar al relé a medida que el flotador (imán) pase.

6.1.5.3 Servodispositivo de nivel.

Este dispositivo mide el peso aparente del desplazador. Si el peso aparente del desplazador es muy alto, el desplazador está muy arriba en el líquido y cuando el nivel baja, la fuerza ascendente que ejerce el líquido sobre el desplazador es menos intensa. El servodispositivo se basa en las diferencias de nivel y en la fuerza de flotación y se controla de modo que siempre haya una situación de equilibrio.

6.1.6 Válvulas reguladoras.

Las válvulas reguladoras de flujo, son aquellas que influyen de alguna manera en la presión y flujo de los fluidos, el paso de fluido por su interior se produce de la forma todo o nada, es decir, o pasa todo el flujo que llega al conducto de entrada o no pasa nada y lo mismo sucede con el conducto de salida. El fluido puede ser regulado a voluntad de forma continua, dependiendo de la señal eléctrica variable establecida.

Las válvulas reguladoras de presión son aquellas que influyen en la presión de un líquido, controlando la presión en un circuito o en parte de él, con objeto de que dicha presión no supere los límites establecidos.

También se tiene las válvulas solenoides las cuales operan eléctricamente y son utilizadas para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o cerrada dándole la debida consideración a las presiones y temperaturas involucradas.

6.2 Selección de instrumentos.

Los instrumentos son una parte esencial del manejo de la caldera porque suministran informes acerca de las presiones, temperaturas, flujos, etc., que deben de ser de conocimiento del operador a fin de tener la caldera bajo control y de forma segura. Muchas de estas variables son imposibles de determinar por medios visuales o por observación física sin el uso de instrumentos.

Los instrumentos pueden estar localizados en los puntos donde tiene lugar la medición pero con más frecuencia se encuentran colocados en sitios alejados de la medición. A menudo se agrupan en algún punto central de operación a fin de lograr la máxima comodidad para el operador.

La selección de los instrumentos a utilizar para el control en la caldera, dependerá de la zona donde será utilizado y de la función que vaya a desempeñar. Para esto, comenzaremos con el suministro del combustible, suministro del aire, control de hogar, gases de la caldera, instrumentos del quemador, temperatura y flujo del vapor y agua de alimentación.

6.2.1 Instrumentos para el suministro y control del agua de alimentación.

Las especificaciones de la caldera para el agua de alimentación son las siguientes:

- Presión de entrada: 48 kg/cm^2 .
- Presión de salida: 42.6 kg/cm^2 a 46.5 kg/cm^2 .
- Flujo máximo: 40000 Kg/Hr .
- Flujo normal: 35000 Kg/Hr .
- Flujo mínimo: 5250 Kg/Hr .
- Temperatura: 103 C (376 K).
- Diámetro de la tubería: 2"
- Presión de entrada agua de atemperación: 48 kg/cm^2 .
- Presión de salida: $42. \text{ kg/cm}^2$ a 44 kg/cm^2 .

- Flujo máximo: 1400 Kg/Hr.
- Flujo normal: 1173 Kg/Hr.
- Flujo mínimo: 355 Kg/Hr.
- Temperatura: 103 C (376 K).
- Diámetro de la tubería: 1”

De acuerdo a las especificaciones anteriores se proponen los siguientes instrumentos y válvulas para el control, como se indica en la tabla 6.2.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	PI-502A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN AGUA ALIMENTACIÓN CABEZAL CALDERA
1	PIT-502A	TRANSMISOR INTELIGENTE	PRESIÓN AGUA ALIMENTACIÓN CABEZAL CALDERA
1	FE-502A	ELEMENTO DE MEDICIÓN	FLUJO DE AGUA ALIMENTACIÓN CALDERA
1	FIT-502A	TRANSMISOR INTELIGENTE	FLUJO DE AGUA ALIMENTACIÓN CALDERA
1	FCV-502A	VÁLVULA DE CONTROL TIPO	CONTROL FLUJO AGUA ALIMENTACIÓN CALDERA
1	FY-502A	POSICIONADOR INTELIGENTE 4-20 mA/3-15 PSIG	VÁLVULA CONTROL FLUJO AGUA ALIMENTACIÓN CALDERA

Tabla 6. 2 Instrumentos para agua de alimentación.

6.2.2 Instrumentos para el suministro y control del gas combustible.

Las especificaciones de la caldera para el suministro del gas combustible, tanto para el gas piloto como para el quemador son los siguientes:

- Presión máxima gas piloto: 0.35 Kg/cm².
- Presión mínima gas piloto: 0.21 Kg/cm².
- Presión del cabezal quemador: 3.5 Kg/cm².
- Temperatura: 60 F (288.55 K).
- Tamaño de la tubería: 3” Ø

De acuerdo a las especificaciones anteriores se proponen los instrumentos y válvulas de control, como se indica en la tabla 6.3.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	PVC-501A	VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN ¾ Ø	CONTROL PRESIÓN GAS CABEZAL PILOTO
1	PI-506A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN GAS CABEZAL PILOTO
1	SV-504A	VÁLVULA SOLENOIDE 2 VIAS, N.C. ¾ Ø	CORTE GAS CABEZAL PILOTO
1	SV-505A	VÁLVULA SOLENOIDE 2 VIAS, N.C. ¾ Ø	CORTE GAS CABEZAL PILOTO
1	SV-506A	VÁLVULA SOLENOIDE 2 VIAS, N.C. ¾ Ø	VENTEO GAS CABEZAL PILOTO
1	PI-504A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN GAS CABEZAL CALDERA
1	PIT-504A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN GAS CABEZAL CALDERA
1	PSL-505A	INTERRUPTOR DE PRESIÓN 1/DPDT	BAJA PRESIÓN GAS CABEZAL CALDERA
1	FE-503A	ELEMENTO DE MEDICIÓN PLACA DE OROFICIO 3" Ø	MEDICIÓN FLUJO GAS A QUEMADOR
1	FIT-503A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN DIFERENCIAL	FLUJO GAS A QUEMADOR
1	UV-501A	VÁLVULA DE BOLA 3" Ø C/ACTUADOR ROTATORIO	CORTE GAS CABEZAL QUEMADOR
1	ZSC/0-501A	INTERRUPTOR DE POSICIÓN MAGNETICO 2/SPDT	POSICIÓN VÁLVULAS DE CORTE GAS CABEZAL QUEMADOR
1	SV-501A	VÁLVULA SOLENOIDE 3-5 VIAS MONTAJE DIRECTO	CORTE AIRE SUMINISTRO VALV. CORTE GAS CAB. QUEMADOR
1	UV-502A	VÁLVULA DE BOLA 3" Ø C/ACTUADOR ROTATORIO	CORTE GAS CABEZAL QUEMADOR
1	ZSC/0-502A	INTERRUPTOR DE POSICIÓN MAGNETICO 2/SPDT	POSICIÓN VÁLVULAS DE CORTE GAS CABEZAL QUEMADOR
1	SV-502A	VÁLVULA SOLENOIDE 3-5 VIAS MONTAJE DIRECTO	CORTE AIRE SUMINISTRO VALV. CORTE GAS CAB. QUEMADOR
1	UV-502A	VÁLVULA DE BOLA 1" Ø C/ACTUADOR ROTATORIO	VENTEO GAS CABEZAL QUEMADOR
1	ZSC/0-503A	INTERRUPTOR DE POSICIÓN MAGNETICO 2/SPDT	POSICIÓN VÁLVULAS VENTEO GAS CABEZAL QUEMADOR
1	SV-503A	VÁLVULA SOLENOIDE 3-5 VIAS MONTAJE DIRECTO	CORTE AIRE SUMINISTRO VALV. VENTEO GAS CAB. QUEMADOR
1	FCV-503A	VÁLVULA DE CONTROL TIPO GLOBO 2" Ø, 150# RF	CONTROL FLUJO GAS QUEMADOR
1	FY-503A	POSICIONADOR INTELIGENTE 4-20 Ma/3-15 psig	VÁLVULA CONTROL FLUJO GAS QUEMADOR
1	ZSI-503A	INTERRUPTOR DE POSICIÓN MAGNETICO 1/SPDT	POSICIÓN MÍNIMO VAL. CONTROL FLUJO GAS QUEMADOR
1	PCV-502A	VALVULA REGULADORA DE PRESIÓN 1 ½" 150#RF	CONTROL PRESIÓN GAS FUEGO MÍNIMO QUEMADOR
1	PIT-505A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN GAS CABEZAL QUEMADOR
1	PI-505A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN GAS CABEZAL CALDERA

Tabla 6. 3 Instrumentos para gas combustible.

6.2.3. Instrumentos para el suministro y control del aire.

El suministro de aire es impulsado por el ventilador de tiro forzado que tras pasar por la caja de aire y los registros del quemador, en donde se produce la turbulencia necesaria para una combustión correcta, se introduce en el hogar.

Para poder controlar el suministro de aire requeriremos los instrumentos que se indican en la tabla 6.4.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	FE-504A	ELEMENTO DE MEDICIÓN TIPO PILOT	MEDICIÓN FLUJO AIRE DE COMBUSTIÓN
1	FIT-504A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN DIFERENCIAL	FLUJO DE AIRE DE COMBUSTIÓN
1	PDSL-506A	INTERRUPTOR DE POSICIÓN DIFERENCIAL 1/SPDT	FALLA VENTILADOR DE TIRO FORZADO
1	PIT-507A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN DESCARGA VENTILADOR DE TIRO
1	PI-507A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN DESCARGA VTF
1	PIT-508A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN CAJA DE AIRE
1	PI-508A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN CAJA DE AIRE

Tabla 6. 4 Instrumentos para suministro de aire.

6.2.4 Instrumentos para el control de la flama.

Los instrumentos para el control de la flama son muy importantes, debido a que la flama en muchos tipos de gases tiene poca luminosidad por lo que es muy difícil verla en el horno, otro es que la acumulación del gas sin quemarse por resultado de fugas dentro del horno, o por la pérdida de fuego en los quemadores no lo hacen visible y por tal motivo no será notado por los operadores dando por consecuencia una explosión.

Los instrumentos para realizar el control de la flama son los que se indican en la tabla 6.5.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	BE-501A	DETECTOR DE FLAMA ULTRAVIOLETA	DETECTOR DE FLAMA PILOTO/QUEMADOR
1	BS-501A	MODULO CONTROL DE FLAMA	CONTROL SEÑAL FLAMA PILOTO/QUEMADOR
1	XMR-501A	TRANSFORMADOR DE IGNICIÓN	ENCENDIDO PILOTO

Tabla 6. 5 Instrumentos para flama.

6.2.5 Instrumentos para el control del vapor.

Los instrumentos para el vapor nos deben permitir controlarlo para evitar una temperatura excesiva del vapor sobrecalentado que pueda ser causado por un exceso del aire de combustión, una deficiencia de aire o un régimen de combustión excesivo. El control de la presión del vapor regula el equipo de combustión para mantener una presión constante en la tubería principal del vapor. Por otro lado, los medidores de caudal de vapor proporcionan una señal de medición para el sistema de control de la caldera, nuevamente al régimen de combustión.

Los instrumentos propuestos para el control del vapor a la salida de la caldera son los que se muestran en la tabla 6.6.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	TI-501A	INDICADOR DE TEMPERATURA 5" Ø	TEMP. VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	TW-501A1	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	TE-501A	ELEMENTO TEMPERATURA TERMOPAR TIPO K	TEMP. VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	TW-501A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	TIT-501A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE TEMPERATURA	TEMP. VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	FE-501A	ELEMENTO DE MEDICIÓN TOBERA BRIDAD 6" Ø	FLUJO VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	FIT-501A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN DIFERENCIAL	FLUJO VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	PIT-501A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	PI-501A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA
1	PSV-502A	VÁLVULA DE SEGURIDAD 2"-600# X 3"-150#	RELEVO PRESIÓN SOBREC. SOBREC. SOBREC. SOBREC.
1	PI-513A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN VAPOR SOBREC. SALIDA CALDERA.

Tabla 6. 6 Instrumentos para vapor.

6.2.6 Instrumentos para el control del nivel de agua del domo.

Los medios comunes para observar el nivel del agua dentro de los domos de la caldera consisten en columnas de agua equipadas con tubos de cristal, generalmente se instalan dos columnas para cada caldera. El nivel de agua en la caldera es el factor preponderante de control en condiciones de flujo constante, por lo que se deben instalar instrumentos que nos aseguren el nivel. La presión en el domo debe ser medida y

controlada debido a que un aumento en la combustión provoca la presión en el domo y por ende provoca un aumento en la cantidad de vapor generado.

Para controlar el nivel de agua en el domo, su presión de agua y de vapor se propone los siguientes instrumentos, como se muestran en la tabla 6.7.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	LIT-501A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE NIVEL	NIVEL DOMO VAPOR
1	LG/LS-503A	COLUMNA DE NIVEL CON ELECTRODOS	INDICADOR LOCAL NIVEL DOMO Y LAH. LAL Y LALL
1	PSH-504A	INTERRUPTOR DE PRESIÓN 1/DPDT	ALTA PRESIÓN DOMO VAPOR
1	PI-503A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN DOMO VAPOR
1	PIT-503A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN DOMO VAPOR
1	PSV-501A-1	VÁLVULA SEGURIDAD 2"-600#-3"-150#	RELEVO PRESIÓN DOMO VAPOR
1	PSV-501A-2	VÁLVULA SEGURIDAD 2"-600#-3"-150#	RELEVO PRESIÓN DOMO VAPOR
1	PI-512A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN DOMO VAPOR

Tabla 6. 7 Instrumentos para nivel en domo.

6.2.7 Instrumentos para el control de temperatura y presión de la salida del economizador.

El economizador es principalmente un intercambiador de calor que va a aprovechar la el calor de la salida de los gases de la chimenea, con lo cual precalienta el agua de alimentación de la caldera. El agua es calentada de tal forma que el agua alcance temperaturas cercanas a la ebullición, pero se hace de manera que el vapor formado no produzca arrastre de agua ni espume.

Se debe monitorear la temperatura del agua de alimentación al economizador y la temperatura de salida del mismo. También se colocaran instrumentos para determinar el incremento de la temperatura del agua y caída de presión en el economizador, así como pérdida de presión en los gases de combustión del mismo, ya que son de suma importancia para el arranque de la caldera, pues sirven de referencia en la operación subsecuente.

Los instrumentos propuestos para el control de la temperatura y presión del economizador, se muestran en la tabla 6.8.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	TI-505A	INDICADOR DE TEMPERATURA 5" Ø	TEMPERATURA GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	TW-505A1	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 150# SS316	TEMPERATURA GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	TE-505A	ELEMENTO TEMPERATURA TERMOPAR TIPO K	TEMPERATURA GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	TW-505A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 150# SS316	TEMPERATURA GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	TIT-505A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE TEMPERATURA	TEMPERATURA GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	PI-511A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	PIT-511A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN GASES SALIDA ECONOMIZADOR
1	TW-503A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TIT-503A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE TEMPERATURA	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TI-502A	INDICADOR DE TEMPERATURA 5" Ø	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN ENTRADA ECONOMIZADOR
1	TW-502A1	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN ENTRADA ECONOMIZADOR
1	TE-502A	ELEMENTO TEMPERATURA	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN ENTRADA ECONOMIZADOR
1	TW-502A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN ENTRADA ECONOMIZADOR
1	TIT-502A	TRANSMISOR INTELIGENTE	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN ENTRADA ECONOMIZADOR
1	TI-503A	INDICADOR DE TEMPERATURA 5" Ø	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TW-503A1	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TE-503A	ELEMENTO TEMPERATURA	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TW-503A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 600# SS316	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR
1	TIT-503A	TRANSMISOR INTELIGENTE	TEMP. AGUA ALIMENTACIÓN SALIDA ECONOMIZADOR

Tabla 6. 8 Instrumentos para economizador.

6.2.8. Instrumentación para la temperatura y presión de gases a la salida de la caldera.

Los instrumentos para saber la temperatura y presión de los gases de salida de la caldera, como se indican en la tabla 10, son de carácter informativos ya que con esos valores podemos determinar la eficiencia de la caldera, ya que cuando la temperatura de los gases de salida de caldera es muy alta nos indica que la caldera está sucia o incrustada.

También es de suma importancia medir la cantidad de gases contaminantes que arroja la caldera a la atmósfera por que se deberá instalar a la salida de la caldera un medidor de gas O₂ para su monitoreo, como se indican en la tabla 6.9.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	TI-504A	INDICADOR DE TEMPERATURA 5" Ø	TEMPERATURA GASES SALIDA DE CALDERA
1	TW-504A1	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 150# SS316	TEMPERATURA GASES SALIDA DE CALDERA
1	TE-504A	ELEMENTO TEMPERATURA TERMOPAR TIPO K	TEMPERATURA GASES SALIDA DE CALDERA
1	TW-504A2	TERMOPOZO BRIDADO 1 ½" 150# SS316	TEMPERATURA GASES SALIDA DE CALDERA
1	TIT-504A	TRANSMISOR INTELIGENTE DE TEMPERATURA	TEMPERATURA GASES SALIDA DE CALDERA
1	PI-510A	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN GASES SALIDA CALDERA
1	PIT-510A	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN GASES SALIDA CALDERA
1	AE-501A	ELEMENTO SENSOR ANALIZADOR DE O2	MEDICIÓN O2 EN GASES SALIDA CALDERA
1	AIT-501	TRANSMISOR INTELIGENTE ANALIZADOR DE O2	MEDICIÓN O2 EN GASES SALIDA CALDERA

Tabla 6. 9 Instrumentos para gases.

6.2.9 Instrumentos para el agua de atemperación.

El caudal de agua de atemperación es controlado por una válvula externa de control. Para un adecuado control de temperatura, la válvula de agua de rociado debe reaccionar rápidamente a las variaciones de temperatura de agua y bajo flujo para manejar múltiples cargas de operación.

La válvula de control del agua y el atemperador deben estar situados lo más cerca posible. La válvula de control debería estar situada por debajo del punto de atemperación.

Los instrumentos y equipo seleccionados para el control del agua de atemperación, se muestran en la tabla 6.10.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	TCV-501A	VÁLVULA DE CONTROL TIPO	CONTROL FLUJO AGUA ATEMPERACIÓN VAPOR
1	TY-501A	POSICIONADOR INTELIGENTE	VÁLVULA CONTROL FLUJO
1	TB-501A	ATEMPERADOR VAPOR 3" - 600# RF X 1" SW	AGUA ATEMPERACIÓN

Tabla 6. 10 Instrumentos para agua atemperación.

6.2.10. Instrumentos para el control del cabezal principal.

El cabezal principal es la tubería principal de distribución de vapor a la planta de procesos, por lo que es recomendable colocar trampas de vapor que le den servicio al cabezal para descargar grandes cantidades de condensado y partículas en forma instantánea, también es de suma importancia el conocer la presión que maneje el cabezal, del cual la acción que realizarán los instrumentos serán únicamente informativos.

Los instrumentos seleccionados para el control del cabezal, se muestran en la tabla 6.11.

CANT.	TAG	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	PIT-501	TRANSMISOR INTELIGENTE PRESIÓN MANOMÉTRICA	PRESIÓN VAPOR CABEZAL GENERAL
1	PI-501	INDICADOR DE PRESIÓN 4" Ø	PRESIÓN VAPOR CABEZAL GENERAL

Tabla 6. 11 Instrumentos para cabezal principal.

7. Criterios para la implementación de la propuesta.

Los elementos con más frecuencia controlados en las calderas son los niveles en los condensadores, calentadores de agua de alimentación y domo. Del mismo modo se debe controlar el arranque y el paro de bombas y por medio de válvulas reguladoras se consigue el mantener el aire, vapor, combustible y agua a presiones dentro de límites deseados. El vapor de la caldera se mantendrá a un valor constante por medio de la regulación del combustible y el aire necesario para el proceso de combustión dentro de la caldera.

Las unidades de control deben instalarse en lugares donde puedan estar firmemente soportadas y libres de vibraciones y en donde el movimiento relativo entre la unidad de fuerza y el elemento de control no se vean afectados. Los instrumentos de medición deben ser cuidadosamente armados, calibrados y mantenidos.

El estudio del control e instrumentación de la caldera implica en primer lugar de la ubicación de la caldera, ya que dependemos de todos los servicios que impliquen en su uso como son agua de alimentación, combustible y condiciones ambientales. Otro de los factores que se deben tomar en cuenta es la selección de los instrumentos, el buen conocimiento en el manejo de los instrumentos, la interpretación de las lecturas de los mismos y su mantenimiento oportuno y correcto para tener la confianza de sus lecturas y la confiabilidad de su control para tener las condiciones de seguridad y la buena calidad del vapor.

7.1 Confiabilidad en los sistemas de control propuestos.

Los sistemas de control propuestos están basados ISA, con su amplia experiencia y estudio del control y la instrumentación de las calderas a nivel mundial nos proporciono herramientas para llevar a cabo este trabajo.

Los controles propuestos son para la alimentación del agua, el suministro del combustible, el suministro de vapor al área de proceso y los controles de seguridad basados en las especificaciones del fabricante de la caldera.

7.1.1 Sistema de control para la alimentación de agua a la caldera.

El sistema de control propuesto para el control de la caldera es el de tres elementos, donde vamos a controlar el agua de alimentación, el flujo de vapor a la salida de la caldera y el nivel del domo (máximo y mínimo), como se muestra en la figura 7.1, 7.2. y 7.3, respectivamente.

El nivel de agua de la caldera es el factor preponderante de control de los tres elementos, ya que en base al nivel de agua y a su flujo constante podemos remplazar el vapor que se está consumiendo. La válvula de globo reguladora de agua nos mantendrá el nivel de agua dentro del límite, regulando el flujo de agua. Se instalarán dos válvulas, antes y después de la válvula reguladora, conectarlas en serie y, un by-pass para no interrumpir el flujo de agua por algún desperfecto llegara a tener la válvula reguladora y para control manual de emergencias. Estas válvulas deben instalarse cerca de la entrada de agua de la caldera.

Los instrumentos de control, indicador, registrador de nivel, manómetro, etc. deben colocarse alejados de la caldera para evitar cualquier incidente con el operador al momento de verificar los instrumentos y al momento de su calibración. También deben ser instalados de modo que no se vean expuestos a cambios bruscos de temperaturas tales como el efecto directo del sol, lluvias repentinas o corrientes de aires fríos; a fin de conseguir esto, se recomienda la instalación de cubiertas protectoras que eviten la acción directa de los elementos, pero que no impidan la libre circulación y ventilación.

7.1.1.1 Sistema de control de nivel de domo.

El sistema de control del nivel de agua en el domo, como se muestra en la figura 7.3, agua de alimentación, como se muestra en la figura 7.1, ya mencionados anteriormente, es un sistema de tres elementos que son, el flujo de vapor FIT-501A, el flujo de agua de alimentación FIT-502A y el nivel del domo LIT-501A, donde el flujo de vapor corregido algebraicamente por el nivel del domo actúa como una señal anticipada para demandar el flujo de agua requerido el cual es retroalimentado al sistema para establecer que la demanda ha sido satisfecha.

En un cambio de carga teniendo el domo un nivel normal de agua, el flujo de vapor al cambiar, solicita un cambio directamente proporcional en la apertura de la válvula de control de agua FCV-502A y por consiguiente modifica también el flujo del agua FIT-

502A hasta igualar este al flujo del vapor FIT-501A, pero si esta condición no es suficiente para mantener normal el nivel del agua, el cambio que tenga el nivel corrige en forma inversa a la señal del flujo de vapor para establecer una nueva apertura en la válvula de control del agua de alimentación FCV-502A.

Otro factor importante en el agua de alimentación es el control de la purga, en la cual se debe colocar válvulas de flujo, para poder controlar la purga continua. Esta deberá ser respaldada por una o más válvulas de corte. Las válvulas para la purga deben estar una tras otra, se recomienda que la válvula que se encuentre hacia el exterior es la que se use para estrangular y regular el flujo y la válvula que está cerca del domo es la de abrir y cerrar, esto es, que la válvula exterior es la que sufre por el efecto de estrangulamiento y puede repararse cuantas veces sea necesario, mientras la caldera está en servicio. Usualmente las válvulas de purga en el domo se pueden operar en cualquier momento sin que ocurran perturbaciones en la circulación del agua en la caldera.

7.1.2 Sistema de control para la alimentación combustible y aire.

El sistema de control del gas combustible y aire, como se muestra se la figura 7.4 y 7.5 respectivamente, está formado por elementos operativos funcionales, indispensables para una óptima operación del transporte del gas combustible a la zona de quema a condiciones especiales de temperatura y presión. Estos elementos deben funcionar correctamente, calibrados e instalados adecuadamente, pues manejan combustible inflamable que puede ocasionar un accidente.

El sistema de control utilizado es el de límites cruzados el cual nos asegurará que nunca pueda haber una reacción peligrosa de combustible y aire dentro de la cámara de combustión. Esto queda implementado siempre ya que al haber una demanda de vapor se incrementa el flujo de aire antes que se incremente el flujo de combustible y cuando hay una disminución de vapor siempre disminuye el flujo del combustible antes que disminuya el flujo de aire.

El sistema de control de límites cruzados es muy eficiente el cual proporciona las siguientes ventajas:

- Optimiza el consumo del combustible.
- Condiciones de operación más segura al reducir el riesgo de explosión.

- Rápida adaptación de las variaciones en el suministro de combustible y aire.
- Satisfacer la demanda de vapor a las áreas de producción.

Este sistema de control se forma con el control maestro de presión del vapor (PIC-501), con el control de flujo de aire de combustión (FIC-504A) y con el control de ajuste de exceso de aire (AIC-501A).

7.1.2.1 Sistema de control maestro de presión del vapor.

Este sistema de control tiene el propósito de mantener constante la presión en el cabezal general del vapor por medio de la regulación del flujo de aire de combustión y del flujo de gas combustible al quemador.

Por lo tanto, la presión del vapor en el cabezal general es la variable del proceso a controlar y se mide con su correspondiente transmisor de presión PIT-501 localizado en el cabezal general, el cual envía su señal al controlador maestro de presión PIT-501.

El controlador PIC-501, de acuerdo a la desviación que tenga la señal de la presión con relación a su set point, envía una señal inversamente proporcional al variador de velocidad del ventilador del variador de tiro forzado SC-504 y a la válvula de control de gas combustible FCV-502A para establecer la demanda del flujo de aire y de flujo de combustible al quemador.

Por lo tanto, la señal de salida del controlador PIC-501 permanece estable cuando la presión de operación del vapor es igual al valor del set point establecido.

7.1.2.2 Sistema de control de flujo de aire de combustión.

La señal del control maestro de presión de vapor, se compara en términos de porcentaje en el selector de señal con la salida del flujo de gas combustible y se selecciona automáticamente la mayor de entre las dos señales, la del control maestro o la del flujo del combustible.

Esta condición de limitación cruzada de la demanda permite que durante un aumento de carga la señal del maestro conduzca aire y, cuando disminuya la carga, entonces la disponibilidad del combustible es la señal que conduce al aire, en ambos casos, para

asegurar que durante los cambios de carga se disponga siempre de mayor cantidad de aire que de combustible.

7.1.2.3 Sistema de control de flujo de gas combustible.

La señal del control maestro de presión de vapor, se compara también en términos de porcentaje en un selector de señal con la señal del flujo de aire de combustión y se selecciona automáticamente la menor de entre las dos señales, la del control maestro o la del flujo de aire de combustión.

Esta condición de límites cruzados de la demanda, permite que durante un rechazo de carga la señal del maestro conduzca al combustible y cuando aumente la carga, entonces la disponibilidad de aire es la señal que conduce al combustible.

La señal de demanda se indica como set point en la estación de flujo gas combustible FIC-503A.

7.1.2.4 Sistema de control de la temperatura del vapor.

El sistema de control de temperatura del vapor es de un solo elemento, donde el vapor sobrecalentado es atemperado en el cabezal de vapor a la salida de la caldera para bajar y mantener constante su temperatura TIT-501A, de acuerdo a los requerimientos de la planta, en lo que se refiere a la temperatura del vapor sobrecalentado.

El sistema de control tiene el propósito de mantener constante la temperatura del vapor sobrecalentado TIT-501A, con set point = 343 C (616.16 K), por medio de la regulación del agua de atemperación a través de su correspondiente válvula de control TCV-501A, como se muestra en la figura 7.2.

Por lo tanto, la temperatura del vapor es la variable del proceso a controlar y se mide con su respectivo elemento de medición/trasmisor TE/TIT-501A, localizado en el cabezal de vapor de la salida de la caldera, después del atemperador, el cual envía se señal al controlador de temperatura TIC-501A.

El controlador TIC-501A, de acuerdo a la desviación que tenga la señal de la temperatura con relación a su set point, envía una señal directamente proporcional a la

válvula de control de agua de atemperación TCV-501A para reajustar la temperatura del vapor TIT-501A al valor requerido en el set point.

Con lo anterior, la señal de salida del controlador TIC-501A permanece estable cuando la temperatura de operación del vapor es igual al valor del set point.

7.1.2.5 Sistema de control de gases.

El sistema de control de gases, es un sistema de monitoreo el cual nos permite monitorear los componentes de los gases de la combustión y realizar los ajustes necesarios en el flujo del combustible y aire, para mantener las condiciones de operaciones dentro de los parámetros establecidos.

Para realizar este control se utiliza un elemento sensor analizador de O₂ AE-501A y un transmisor inteligente analizador de O₂ AIT-501, como se muestra en la figura 7.6.

7.1.2.6 Sistema de control del cabezal gas quemador.

El sistema de control del cabezal gas piloto/quemador es un sistema de un elemento, con el cual vamos a controlar el encendido del quemador por medio del modulo de control de flama BS-501A y del detector de flama ultravioleta BE-501A, en conjunto con el transformador de ignición XMR-501A, como se muestra en la figura 7.7.

Es importante mencionar que el control de quemador está relacionado con el encendido del cabezal gas piloto, el cual nos permitirá que siempre se encuentre encendido nuestro quemador. El sistema de cabezal gas piloto ya está incluido dentro del cabezal gas quemador de nuestra caldera.

NIVEL DE AGUA EN DOMO

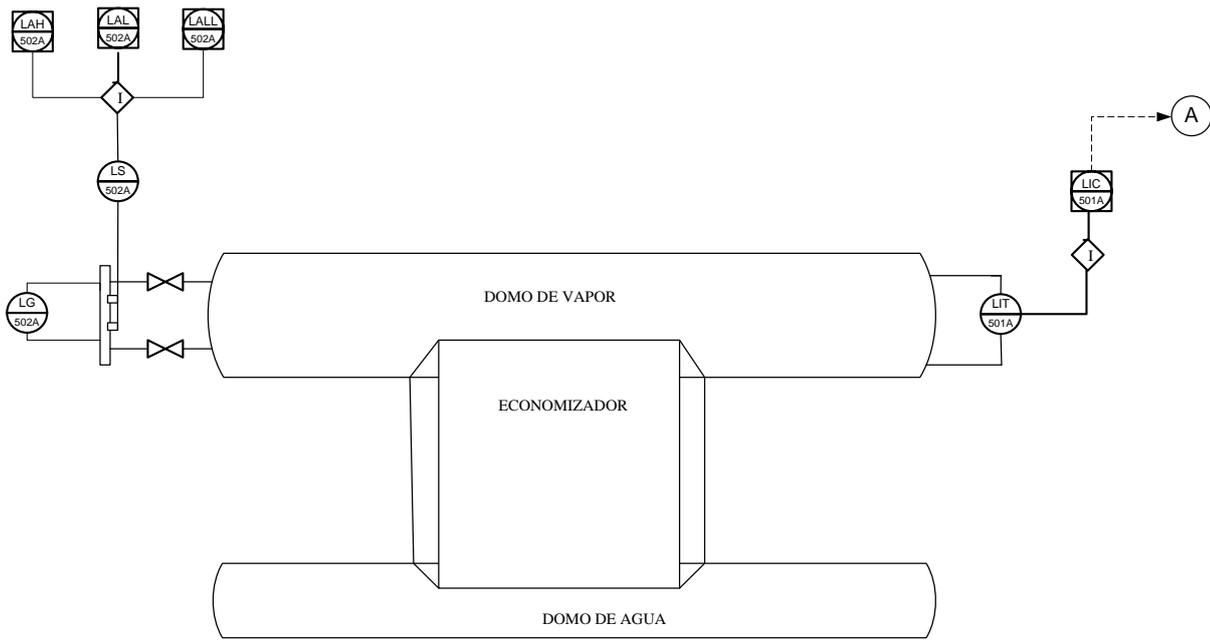


Figura 7. 3 Control del nivel de agua en domo.

CONTROL DE GAS COMBUSTIBLE

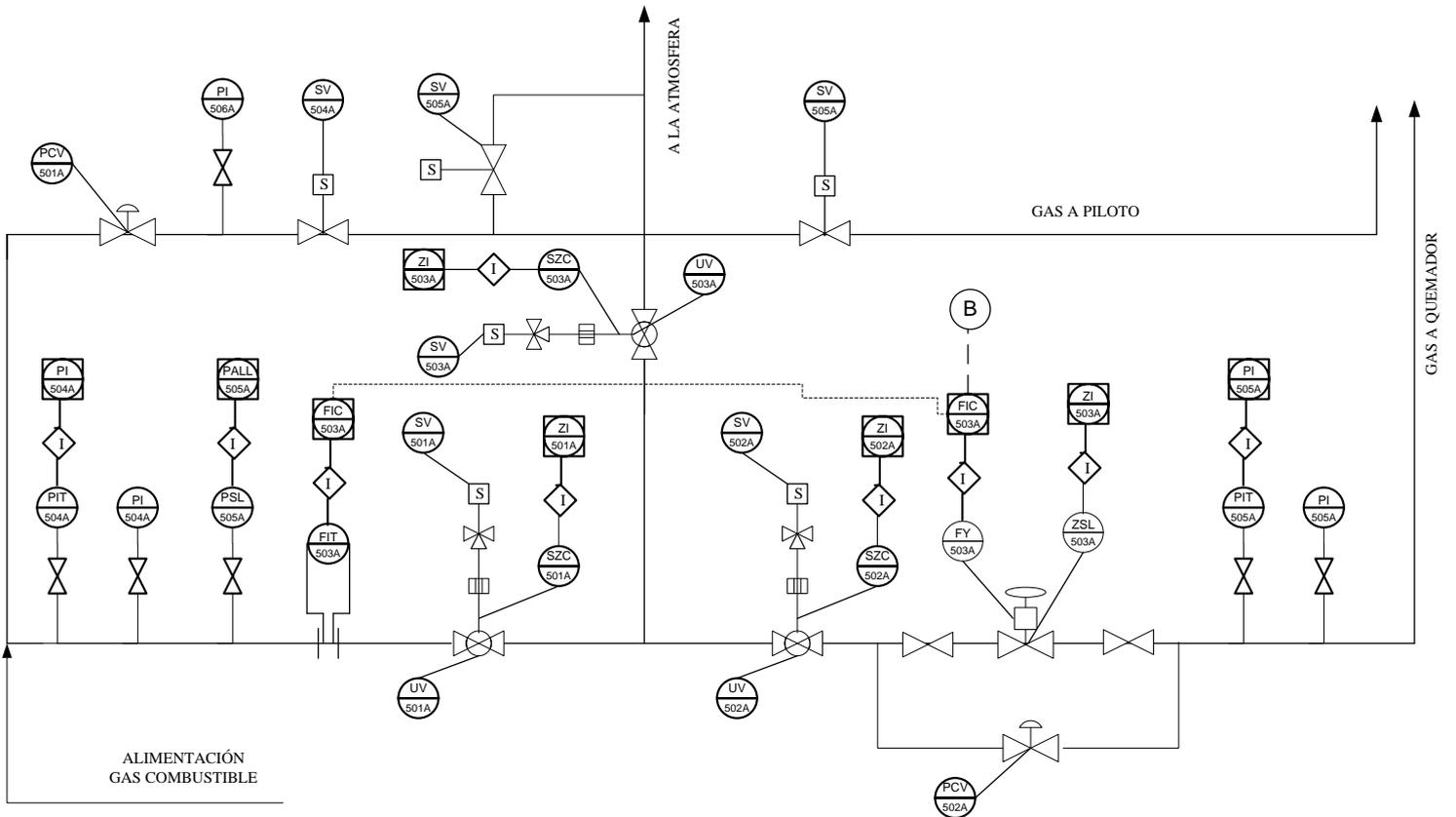


Figura 7. 4 Control de gas combustible.

CONTROL DE AIRE DE ALIMENTACIÓN

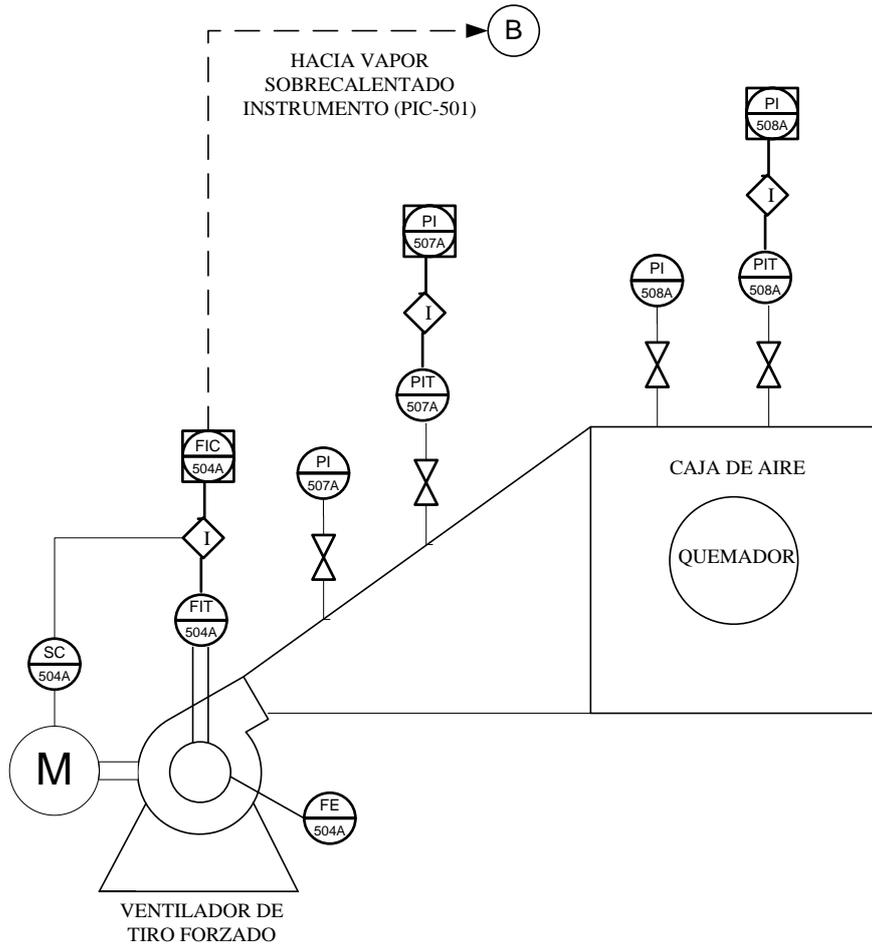


Figura 7. 5 Control de aire de alimentación.

CONTROL DE GASES

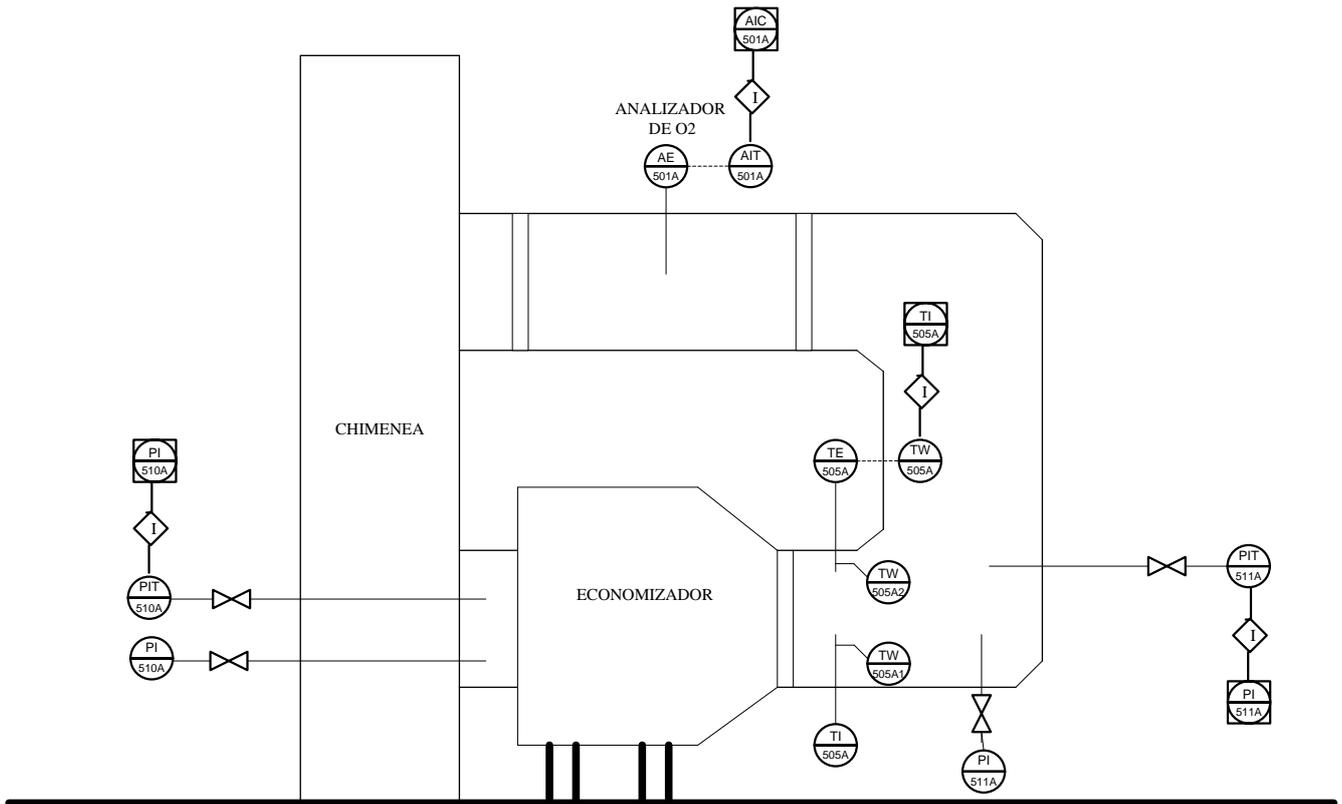


Figura 7. 6 Control de gases.

CONTROL DEL QUEMADOR

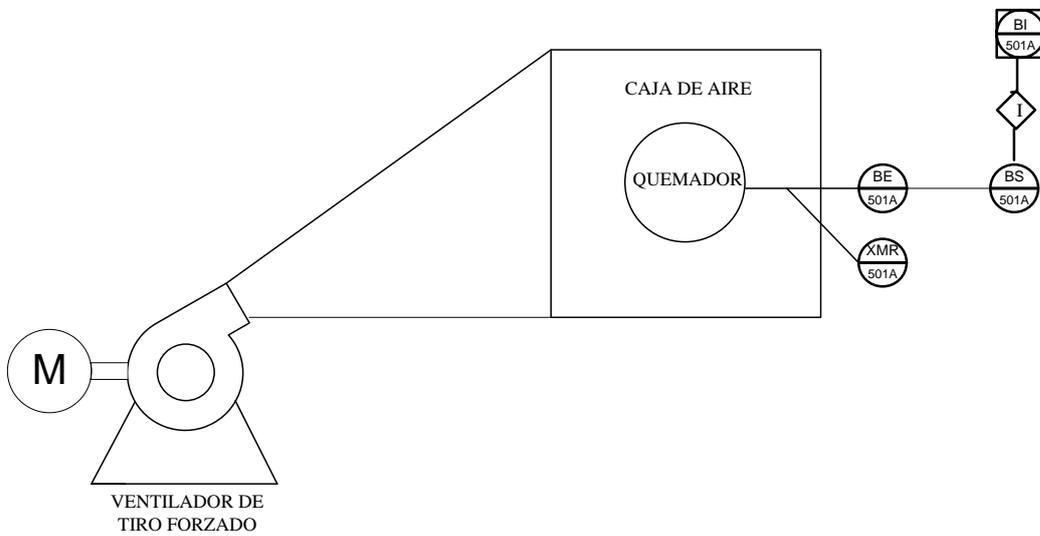


Figura 7. 7 Control del quemador.

7.2 Justificación de instrumentos seleccionados.

Los requerimientos crecientes de seguridad en la operación de las calderas, con mayor eficiencia energética, la preservación del medio ambiente y un control de calidad del vapor para el uso industrial, hacen necesario contar con un sistema de supervisión y control de los procesos cada vez más sofisticados.

Como se ha podido leer en los temas anteriores, la selección de los instrumentos, para un control de una caldera, puede requerir instrumentos desde los más simples como un termómetro o indicador de presión local, hasta sistemas computarizados distribuidos en la planta o equipo para la implementación de esquemas de control.

Existen en el mercado diferentes marcas de instrumentos de medición que pueden ser utilizados para el control de la caldera, siempre y cuando cumplan con los requisitos que se especifican para el uso de la misma, por lo que se mencionaran algunas marcas de los diferentes tipos de instrumentos que cumplen con las especificaciones requeridas y en caso de implementar el proyecto tendrían que ser verificadas, junto con otras marcas, para seleccionar la mejor opción.

IV. Conclusiones.

Como resultado de la investigación bibliográfica presentada, es posible llegar a las conclusiones siguientes:

1.- Gracias a los avances en los estudios de los sistemas de control se puede tener cualquier caldera y en general cualquier equipo controlado, ayudando con esto a mejorar su desempeño y garantizando la seguridad del personal y del equipo. Tomando en cuenta que la interpretación de los sistemas de control nos ayudó a dar una propuesta que nos asegure el continuo abastecimiento de vapor al proceso evitando con esto que por falta de agua, combustible o de alguna otro factor pudiera realizar paros inesperados nuestra caldera.

2.- Los instrumentos de medición son la base para medir todas las variables a controlar de la caldera y teniendo en cuenta que todos ellos deben ser calibrado, siguiendo los estándares de calibración, debe cumplir con los rangos para los cuales serán utilizados y poder confiar ampliamente en ellos.

3.- Además de la experiencia con la cual cuentan los operadores de las calderas, estos deben ser entrenados para el manejo e interpretación de los instrumentos que con un manejo adecuado la caldera y cualquier equipo funcionará adecuadamente. Los operadores deben contar con todas las indicaciones, manuales e instructivos de los instrumentos empleados para poder tomar decisiones acertadas en el manejo de la caldera.

4.- La propuesta de control señalada en este trabajo, nos asegura que la caldera permanecerá controlada y bajo un control estricto de seguridad, a la vez que garantizara que los operadores pueden contar con todas la herramientas necesarias para controlar la caldera y ellos puedan enfocarse en los puntos críticos que pudieran presentarse durante la operación, como pueden ser las alarmas presentadas en la operación, verificar que se cumpla la programación de los mantenimiento preventivos de la caldera, programa de calibración y mantenimiento de los instrumentos, entre otros.

5.- Con los instrumentos y controles propuestos la disminución de los insumos va a ser considerable, esto es al tener el control de la cantidad de aire, combustible, agua y

demanda de vapor en el sistema, se mejora la combustión en la caldera lo cual nos evitará que se consuma más gas combustible y agua gracias al control del vapor solicitado por la planta porque cuando baje la demanda de vapor el consumo de gas combustible y agua también bajaran evitando consumo innecesario de los mismos.

V. Índice de figuras, gráficas y tablas.

Figuras.

Figura 1. 1 Máquina de vapor de Herón de Alejandría.	12
Figura 1. 2 Caldera de tubos de llama.	13
Figura 1. 3 Caldera de tubos de retorno de llama.	14
Figura 1. 4 Ciclo de vapor abierto.	16
Figura 1. 5 Diagrama P-V de ciclo de vapor abierto.	17
Figura 1. 6 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto.	18
Figura 1. 7 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto, incluyendo ciclo de Carnot. ...	18
Figura 1. 8 Ciclo de vapor cerrado o Rankine.	20
Figura 1. 9 Diagrama P-V de ciclo de vapor cerrado o Rankine.	21
Figura 1. 10 Diagrama T-S ciclo de vapor cerrado o Rankine.	21
Figura 1. 11 Diagrama de T-S de ciclo de vapor abierto, incluyendo ciclo de Carnot. .	22
Figura 1. 12 Caldera de calefacción a vapor.	26
Figura 1. 13 Planta generadora de energía eléctrica con caldera de vapor de alta presión.	28
Figura 1. 14 Reactor de energía nuclear de agua en ebullición.	28
Figura 1. 15 Reactor de energía nuclear de agua presurizada.	29
Figura 1. 16 Caldera pirotubular.	31
Figura 1. 17 Caldera de locomotora.	32
Figura 1. 18 Caldera marina escocesa tipo trasero húmedo.	33
Figura 1. 19 Caldera marina escocesa tipo trasera seca.	34
Figura 1. 20 Caldera de cuatro pasos.	35
Figura 1. 21 Calderas de hogar interior MS de varios pasos de tubos.	35
Figura 1. 22 Caldera tubular vertical.	37
Figura 1. 23 Diseño de calderas de tubos de agua modelos A, D y O.	39
Figura 1. 24 Caldera tipo D de dos calderines y tubos curvados.	40
Figura 1. 25 Caldera de combustión mixta.	41
Figura 1. 26 Caldera supercrítica.	43
Figura 1. 27 Caldera supercrítica ciclónica de hogar a carbón.	44
Figura 1. 28 Caldera tipo LaMont.	45
Figura 1. 29 Dispositivo caldera-turbina usando recirculación forzada.	46
Figura 1. 30 Caldera de serpentín de tubos de agua mostrando el flujo de agua y vapor.	47
Figura 1. 31 Componentes de un gran generador de vapor.	48
Figura 1. 32 Sobrecalentador de un generador de vapor.	50
Figura 1. 33 Sobrecalentador.	51
Figura 1. 34 Economizador.	52
Figura 2. 1 Caldera de paquete con hogar refrigerado con agua.	55
Figura 2. 2 Planta generadora de energía que quema carbón.	57
Figura 2. 3 Sistema de distribución de vapor.	59
Figura 2. 4 Tipos de válvulas.	60

Figura 2. 5 Separador de vapor.....	61
Figura 2. 6 Economizador.	63
Figura 3. 1 Caldera tipo paquete.....	73
Figura 3. 2 Caldera tipo paquete acuotubular.....	75
Figura 3. 3 Chimeneas.	76
Figura 3. 4 Ductos para vapor.	76
Figura 3. 5 Ventilador de tiro forzado.	78
Figura 3. 6 Bomba de agua de alimentación.	78
Figura 3. 7 Calentador de aire.	79
Figura 3. 8 Tipo de distribución de vapor a proceso.	80
Figura 3. 9 Tablero de control.	81
Figura 4. 1 Circuito de agua de alimentación.....	95
Figura 5. 1 Diagrama de bloques del control básico de una caldera.	98
Figura 5. 2 Lazo de control alimentado.....	100
Figura 5. 3 Control operacional.....	100
Figura 5. 4 Sistema de control.	102
Figura 5. 5 Esquema de control de proceso.....	104
Figura 5. 6 Lazo de control cerrado realimentado.....	105
Figura 5. 7 Lazo cerrado retroalimentación.....	106
Figura 5. 8 Control lazo abierto prealimentado.....	107
Figura 5. 9 Lazo de control prealimentado.....	108
Figura 5. 10 Variables de un esquema de control.....	109
Figura 5. 11 Nomenclatura en un diagrama de bloques.	110
Figura 5. 12 Instrumentos y variables en un diagrama final de control.	110
Figura 5. 13 Etiquetas o rótulos de instrumentos.	113
Figura 5. 14 Líneas de señales.....	114
Figura 5. 15 Sistema de control combustible/aire.	115
Figura 5. 16 Sistema de control de posición de eje de unión.	116
Figura 5. 17 Sistema de control serie.	118
Figura 5. 18 Sistema de control serie aire/combustible.....	119
Figura 5. 19 Sistema de control paralelo aire combustible.....	120
Figura 5. 20 Sistema de control paralelo con interlock en combustible.....	121
Figura 5. 21 Sistema de control paralelo con interlock en aire.	122
Figura 5. 22 Sistema de control de límites cruzados (split range).....	123
Figura 5. 23 Control del nivel da agua de alimentación en domo.	126
Figura 5. 24 Instalación de un trasmisor diferencial.	127
Figura 5. 25 Indicación básica de nivel de agua en domo.....	127
Figura 5. 26 Arreglo de transmisor diferencial de presión.....	128
Figura 5. 27 Interior del domo del vapor.....	130
Figura 5. 28 Sistema de control de un elemento.....	131
Figura 5. 29 Sistema de control de un elemento.....	132
Figura 5. 30 Diagrama de control Integral/Derivativo con dos elementos.....	133
Figura 5. 31 Sistema de control con tres elementos.	134
Figura 5. 32 Sistema de control Integral/Derivativo con tres elementos.....	134

Figura 5. 33 Sistema de control con un elemento.....	136
Figura 5. 34 Sistema de control con dos elementos.	137
Figura 5. 35 Sistema de control de temperatura del vapor con tres elementos.	139
Figura 7. 1 Control de agua de alimentación.....	172
Figura 7. 2 Control de vapor sobrecalentado.....	172
Figura 7. 3 Control del nivel de agua en domo.	173
Figura 7. 4 Control de gas combustible.....	173
Figura 7. 5 Control de aire de alimentación.	174
Figura 7. 6 Control de gases.	175
Figura 7. 7 Control del quemador.....	175

Gráficas.

Grafica 2. 1 Consumo de energía.	677
Grafica 2. 2 Consumo de combustibles.	677

Tablas.

Tabla 6. 1 Termopares.....	155
Tabla 6. 2 Instrumentos para agua de alimentación.	158
Tabla 6. 3 Instrumentos para gas combustible.	159
Tabla 6. 4 Instrumentos para suministro de aire.....	160
Tabla 6. 5 Instrumentos para flama.	160
Tabla 6. 6 Instrumentos para vapor.	161
Tabla 6. 7 Instrumentos para nivel en domo.	162
Tabla 6. 8 Instrumentos para economizador.....	163
Tabla 6. 9 Instrumentos para gases.....	164
Tabla 6. 10 Instrumentos para agua atemperación.	165
Tabla 6. 11 Instrumentos para cabezal principal.	165

VI. Bibliografía.

- 1) Luis Moreno, “Ingeniería de control. Modelado y control de sistemas dinámicos.” Ed. Ariel Ciencia
- 2) Pedro Fernández Diez, “Centrales térmicas”, Ed.
- 3) Antonio Creus Solé., “Instrumentación industrial”, Ed. Alfaomega Marcombo
- 4) U.S. Department of energy, “Improving steam system performance, A sourcebook for the industry”.
- 5) M.C. Gonzalo Serafín Reyes, “Instrumentación”, Ed. CECyTEM
- 6) Jerry Gilman, “Boiler control systems engineering”, Ed. ISA
- 7) Felder-Rousseau, “Principios básicos de los procesos químicos”, Ed.
- 8) Charles Donald Swift , “Plantas de vapor, arranque, paro y operación”, Ed. Compañía editorial continental.
- 9) José Acedo Sánchez, “Control avanzado de procesos, teoría y práctica”, Ed. Diaz De Santos.
- 10) V. Ganapathy, “Industrial boilers and heat recovery steam generators, design, applications and Calculations”, Ed. Marcel Dekker, Inc.
- 11) David Lindsley, “Power-plant control and instrumentation”, Ed. IEE Control Engineering Series 58.
- 12) Varios, “Manual de calderas industriales”, Ed. Universidad de Burgos.
- 13) Carlos A. Smith, “Control automático de procesos, Teoría y práctica”. Ed. Noriega.
- 14) Anthony L. Kohan, “Manual de calderas, Principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas”, Ed. McGraw Hill.
- 15) Wolfgang Altmann, “Process control for engineers and technicians”, Ed. Newnes.

VI. Artículos.

- 1) Carlos M. Rubalcaba Becerra, “Instrumentación industrial”, UDG.
- 2) Juan Carlos Maraña, “Instrumentación y control de procesos”, curso de formación.
- 3) Alberto de la Sen Sanz “Curso sobre control de calderas”, Sección Española, ISA.
- 4) Process steam systems.
- 5) Ana E. Zambrano T., “Dimensionamiento de calderas acuotubular”.