

ESTADO DEL ARTE DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRUCTURAS DE CONTROL DE CALDERAS

VICTOR JAVIER MORENO VELASCO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
Marzo 2011**

ESTADO DEL ARTE DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRUCTURAS DE CONTROL DE CALDERAS

VICTOR JAVIER MORENO VELASCO

Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

**Director del proyecto
Héctor Ramiro Pérez Rodríguez**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
Marzo 2011**

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga Marzo de 2011

Dedico este proyecto a DIOS por que no me desampara y me muestra el camino siempre,

A mi Padre por sus concejos, por creer en mi y ser un gran maestro en mi vida,

A mi Madre por su apoyo incondicional, por estar a mi lado en todo momento brindandome su cariño y amor,

A mi hermana Mely porque juntos hemos salido adelante pese a las dificultades,

A Lina por su amor incondicional, su comprensión y compañía durante mis estudios,

A mi familia, mis abuelos y mis tios ejemplo de unión y lealtad constante,

A mis tíos Pilar, Carlos y Lucia por estar siempre dispuestos a ayudarme,

A mis amigos podría dejar de mencionar a varios, pero siempre recordándolos Messi, Carlos, Manuel, Gerley, Sergio, Paisa, mis primos Jullieta, Andres y Alonso por que siempre encuentre en ellos la alegría de compartir,

A mi abuelita Cristina, quien desde el cielo me acompaña y estoy seguro que en estos momentos está orgullosa de mí,

A Maria Paula a quien espero encuentre en mi un ejemplo a seguir,

Y a todos los que de una u otra forma contribuyeron en este proceso de formación especialmente a las familias Moreno Vezga, Velasco Uribe y Cáceres Galvis.

AGRADECIMIENTOS

Al director PH.D. Hector Ramiro Perez Rodriguez por sus orientaciones y su disposición para enseñarme y compartir sus experiencias y sabiduria como profesional y como ser humano. Gracias por sus enseñanzas, el conocimiento y la visión transmitida en los momentos compartidos.

A las empresas ITALCOL y HARINAGRO S.A. por abirme sus puertas y permitirme conocer sus procesos.

A los profesores, funcionarios y compañeros de la Universidad Pontificia Bolivariana que contribuyeron con mi formación profesional y fueron impulso para mi crecimiento personal.

Índice

1. INTRODUCCION	1
2. Glosario	2
3. Descripción de las calderas	4
3.1. Tipos de caldera	5
3.2. Descripción de algunos tipos de calderas	8
3.3. Descripción de las Calderas Acuotubulares	11
3.4. Descripción de las Calderas Piro tubulares	14
4. Transferencia de calor en calderas	16
4.1. Conducción	17
4.2. Convección	17
4.2.1. Convección natural	17
4.2.2. Convección forzada	17
4.3. Radiación	18
4.4. Nucleate boiling	18
4.5. Film boiling	19
5. Propiedades físicas del vapor	19
6. Tratamiento de Agua Para Calderas	21
6.1. Problemas derivados de la utilización del agua en calderas	22
6.2. Procesos de Tratamiento	24
6.3. Esquema de tratamiento:	25
6.4. Químicos para la Caldera:	26
7. Combustión	27
7.1. Fundamentos básicos de la combustión	27
7.2. Combustibles	28
7.2.1. Quemado de combustibles gaseosos	29
7.2.2. Quemado de combustibles líquidos	29
7.2.3. Quemado de combustibles sólidos	30

7.3.	Aire atmosférico	30
7.4.	Exceso de aire	31
7.5.	Exceso de aire vs. monóxido de carbono	31
7.6.	Exceso de aire vs. óxidos de nitrógeno	32
7.7.	Poder calorífico superior e inferior	32
8.	Eficiencia de una caldera	33
8.1.	Definición de rendimiento de una caldera	33
8.2.	Factores principales que influyen en el rendimiento	34
8.3.	Análisis de los gases de salida de chimenea	34
8.3.1.	Estudio de la composición química de los gases de combustión	34
8.3.2.	Medición de CO_2	35
8.3.3.	Medición de O_2	35
8.3.4.	Medición de CO	36
8.3.5.	Método de Orsat	36
8.4.	Temperatura de salida de gases de chimenea	37
8.5.	Medición de humos en gases de chimenea	37
9.	Control e Instrumentación	38
9.1.	Instrumentos de Control de Calderas	38
9.1.1.	Instrumentos para el Control del nivel.	40
9.1.2.	Instrumentos para el Control de la llama.	40
9.1.3.	Instrumentos para el Control de la presión.	40
9.1.4.	Instrumentos para el Control de la temperatura.	40
9.1.5.	Dispositivos Adicionales Instalados En Las Calderas	41
9.2.	Requerimientos de Control.	42
9.3.	Sistema Básico de Control y Regulación	43
9.3.1.	Control de Combustión	44
9.3.2.	Control de Nivel	44
9.3.3.	Control del Tiro	45
9.3.4.	Control de la Temperatura del Vapor	45
9.4.	Lazos de control básicos para calderas	45
9.4.1.	Sistema de seguridad y encendido (S.S.E.)	45

9.4.2. Lazos de control de nivel de domo	47
9.4.3. Lazos de control de combustión	56
9.4.4. Lazos de control de temperatura de vapor	66
9.4.5. Lazos de control de presión de hogar	67
9.4.6. Lazos de control de purga continua	71
10.Seguridad de Calderas	72
10.1. Secuencias de Seguridad	73
10.2. Inspección Periodica de Eficiencia Energetica Para Calderas	74
11.Principales Proveedores de Productos y Servicios en Colombia	75
12.Anexo Informe Visita HARINAGRO S.A	77
13.Conclusiones y Recomendaciones	80

Índice de figuras

1.	Caldera del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UPB	5
2.	Caldera Acuotubular	12
3.	Caldera Pirotubular	16
4.	Resumen de la simbología ISA.	46
5.	Lazos de control de nivel de domo.	48
6.	Cálculo de la densidad del agua.	49
7.	Lazos de Control de Nivel.	51
8.	Esquema de Tres Elementos.	53
9.	Esquema Con Dos Controles.	54
10.	Control de Nivel de Domo Con Balance Continuo de Caudales.	55
11.	Lazos de control de combustión.	58
12.	Control de la Combustión Mediante (Positioning System).	59
13.	Control de la Combustión Mediante (full parallel lead-lag metering system).	60
14.	Calibración de la Relación de Caudal de Combustibles.	63
15.	Sistema de Secuenciamiento de Combustibles	64
16.	Lazos de control de temperatura de vapor sobrecalentado.	66
17.	Lazos de control de temperatura.	68
18.	Control de Presion de hogar.	69
19.	Lazos de Control Aplicables al Control de Presión de Hogar.	70
20.	Control de Purga Continua.	72
21.	Caldera y Tablero de Control Harinagro S.A.	78

RESUMEN

TITULO: ESTADO DEL ARTE DE INSTRUMENTACIÓN Y ESTRUCTURAS DE CONTROL DE CALDERAS

Autor: Victor Javier Moreno Velasco

Facultad: Facultad de Ingenieria Electronica

Director: Hector Ramiro Perez Rodriguez

Las dos fuentes primarias de energía para la mayoría de las industrias son la energía eléctrica y la energía proveniente de la combustión de combustibles fósiles. A partir de los combustibles fósiles se genera energía térmica y ésta en conjunto con la energía eléctrica son las dos fuentes primarias de energía de las industrias en sus procesos internos. La energía térmica se le transfiere al agua para formar vapor el cual se utiliza para calentar otros fluidos u otras sustancias o para transformarla en energía mecánica al mover por ejemplo una turbina. Para generar vapor se utilizan calderas y es por esa razón que en casi toda industria existen estos dispositivos. Las calderas son máquinas de generación de vapor trascendentales en los procesos industriales, que deben ser controladas, automatizadas y operadas de manera segura. Esta es la razón de ser de este proyecto, porque para un ingeniero que se desempeñe en la industria le es indispensable saber: el principio de operación de una caldera, cómo se monitorea su funcionamiento, cómo se automatiza y controla su operación y cómo se opera en forma eficiente y de manera segura la caldera. Los aspectos mencionados se presentan en este documento el cual constituye un valioso libro de referencia para los ingenieros que se desempeñen en la industria. El proyecto describe la instrumentación empleada para la medida de las variables más importantes y presenta las principales estructuras para el control de las funciones que se llevan a cabo en una caldera, como los controles de combustión, nivel, presión y temperatura del vapor. Además de describirlas, se indica cómo se realiza la transferencia de calor, el proceso de combustión, la eficiencia y la seguridad en las calderas.

Palabras Calves: Caldera, Control, Instrumentación, Combustión, Vapor, Automatización.

SUMMARY

Title: STATE OF THE ART INSTRUMENTATION AND CONTROL
OF BOILER STRUCTURES

AUTHOR: Victor Javier Moreno Velasco

Faculty: Faculty of Electrical Engineering

DIRECTOR: Hector Ramiro Perez Rodriguez

The two primary sources of energy for most industries are electric power and energy from the combustion of fossil fuels. From fossil fuels generates heat and this in conjunction with electric power are the two primary sources of energy industries in its internal processes. The thermal energy is transferred to water to form steam which is used to heat other fluids or other substances or for conversion into mechanical energy to move such a turbine. Used to generate steam boilers and for this reason that in almost every industry there are these devices. The boilers are machines transcendental steam generation in industrial processes, which must be controlled, automated and operated safely. This is the reason for this project, because for an engineer who serves in the industry is indispensable: the principle of operation of a boiler, how it monitors its operation, how to automate and control their operation and how it operates efficiently and safely the boiler. The aspects mentioned are presented in this document which is a valuable reference book for engineers who work in the industry. The project describes the instrumentation used for measuring the most important variables and presents the main structures to control the functions carried out in a boiler, and combustion controls, level, pressure and steam temperature. In addition to describing them, shown how to perform the transfer of heat, the combustion process, efficiency and security in the boilers.

KEYWORDS: Boiler, Control, Instrumentation, Combustion, Steam, Automation.

1. INTRODUCCION

En un mundo globalizado económica, tecnológica y comercialmente se hace necesaria una adaptación industrial a estos avances como una estrategia de desarrollo y así mejorar planteamientos de competitividad a la hora de presentar una propuesta a una licitación en el campo de la instrumentación y control industrial de calderas.

No es fácil encontrar en un solo libro orientado a los ingenieros electrónicos un compendio de las tecnologías de punta en torno a los diferentes tipos de calderas existentes, su respectiva instrumentación, el control y sincronización de los equipos, sus costos y empresas proveedoras. El ingeniero electrónico tiene el conocimiento general de control e instrumentación pero no posee una guía sobre control e instrumentación aplicado a un equipo tan utilizado en la industria como lo es la caldera.

Atendiendo a esta realidad se ve necesario realizar un estudio completo sobre las calderas y crear un documento que compendie lo que se necesita conocer sobre instrumentación, automatización y control de calderas para su seguro y correcto funcionamiento.

La mayoría de las industrias utilizan calderas para el suministro de energía térmica en sus procesos. Las calderas se emplean para generar el vapor que requieren las industrias petroquímicas, de generación termoeléctrica, esterilización de instrumentos en los hospitales y esterilización de cubiertos en comedores, entre otros tipos de industrias.

Para el ingeniero electrónico en su desarrollo profesional en el campo de la instrumentación y control de calderas es de vital importancia conocer muy bien este tema para desenvolverse con éxito en este campo. Por esta razón, Se explicara detalladamente el funcionamiento de las calderas, la instrumentación que se utiliza, las estructuras de control que se están aplicando, el tratamiento de agua requerido, la seguridad y los proveedores de la tecnología actual y suministros.

2. Glosario

1. **Agua de alimentación:** Es el agua de entrada que alimenta el sistema, generalmente agua de pozo o agua de red con algún tratamiento químico como la desmineralización.
2. **Agua de calderas:** Agua de circuito interior de la caldera cuyas características dependen de los ciclos y del agua de entrada.
3. **Agua de condensado:** Es el agua que proviene del estanque condensador.
4. **Alcalinidad:** Nivel de salinidad expresada en ppm de CaCO_3 que confiere una concentración de iones carbonatos e hidróxilos que determina el valor de pH de funcionamiento de una caldera, generalmente desde 10,5 a 11.5.
5. **Anticorrosivo:** Sistema químico que brinda protección por formación de films protectivos ante iones corrosivos presentes en el agua.
6. **Antiincrustante:** Sistema químico que permite permanecer a los sólidos incrustantes en solución.
7. **Calidad del Vapor o Título:** Es el porcentaje de vapor en líquido; mezcla de vapor/agua en condiciones de saturación.
8. **Calor Específico:** Es la relación de la cantidad de calor requerida para producir una variación de 1°C en la temperatura de una masa de 1 Kg de una determinada sustancia ($\text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$).
9. **Calor Latente:** Cantidad de calor, agregado o eliminado a 1 Kg masa de una determinada sustancia, con el fin de lograr el cambio de fase de toda su masa. Esta puede ser de condensación o de vaporización.
10. **Ciclos de concentración:** Número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.
11. **Combustible:** Material que produce energía calórica al quemarse.
12. **Corrosión:** Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.
13. **Desaireador:** Sistema que expulsa los gases a la atmósfera.

14. **Desoxigenación:** Tratamiento químico que elimina el oxígeno del agua de calderas.
15. **Dispersante:** Sistema químico que mantiene los sólidos descohesionados ante un evento de incrustación.
16. **Energía:** Habilidad de realizar trabajo.
17. **Entalpía(H):** La cantidad total de energía contenida en una unidad de masa de una determinada sustancia es igual a la energía interna (E) más el producto de la presión (P) con su volumen específico (v). $H = E + P \cdot v/J$, siendo J el equivalente de trabajo mecánico en calor.
18. **Entropía (S):** Es la propiedad que describe matemáticamente la porción de energía suministrada al proceso que no puede ser convertida en trabajo útil. En otras palabras es una medición de las irreversibilidades del proceso. El proceso teóricamente de mayor eficiencia es aquel que desarrolla su trabajo a entropía constante ó isoentrópicamente.
19. **Fogón u hogar:** Alma de combustión del sistema.
20. **Incrustación:** Sedimentación de sólidos con formación de núcleos cristalinos o amorfos de sulfatos, carbonatos o silicatos de magnesio que merman la eficiencia de funcionamiento de la caldera.
21. **Índice de vapor/combustible:** Índice de eficiencia de producción de vapor de la caldera.
22. **Líquido Saturado:** Líquido que se encuentra en su temperatura de ebullición para la presión existente y que no contiene agua.
23. **Líquido Subenfriado:** Líquido a una temperatura menor a la de su punto de ebullición para la presión existente y que no contiene vapor.
24. **Purga de fondo:** Evacuación de lodos y concentrado del fondo de la caldera.
25. **Purga de superficie:** Evacuación de sólidos disueltos desde el nivel de agua de la caldera.
26. **Temperatura Absoluta:** Temperatura por debajo de la cual se detiene toda actividad molecular.
27. **Trabajo:** Habilidad de desplazar una fuerza a través de una determinada distancia (Kg - m).
28. **Vapor seco o sobresaturado:** Vapor de óptimas condiciones.

29. **Vapor húmedo o saturado:** Vapor con arrastre de espuma proveniente de una agua de alcalinidad
30. **Vapor Saturado:** Vapor que se encuentra en su temperatura de ebullición para la presión existente y que no contiene agua.
31. **Vapor Sobrecalentado:** Vapor a una temperatura mayor a la de su punto de ebullición para la presión existente y que no contiene agua. elevada.

3. Descripción de las calderas

Una caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería que está diseñado para generar vapor saturado. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia al estado de vapor. También es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o en fase vapor. Las calderas son un caso particular en el que se aplica calor a un fluido que se eleva a altas temperaturas haciendo uso de intercambiadores de calor, produciendo un cambio de fase en el fluido. Además son recipientes a presión, por lo cual son construidas en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas. En la Figura 1 se muestra una foto de la caldera existente en el laboratorio de térmicas de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Algunas de las definiciones dadas a las calderas son las siguientes: Se llama caldera a un recipiente que sirve para calentar agua. En los sistemas de calefacción, la caldera es el artefacto en el que se calienta agua mediante el calor transferido a ella por la quema de un combustible. El fluido que se produce en fase líquida caliente o en fase de vapor se distribuye por los emisores mediante una red de tuberías. En generación de energía eléctrica la caldera es una máquina industrial que sirve para producir vapor que se desplaza a velocidad y mueve una turbina que a su vez mueve un generador que produce la energía eléctrica. En sistemas de calefacción, la Caldera es un componente de un sistema de calefacción que produce agua caliente o vapor. Las calderas son muy utilizadas en la industria para aplicaciones como:

1. Esterilización (tindarización), es común encontrar calderas en los hospitales, las cuales generan vapor para esterilizar los instrumentos médicos, también en los comedores con capacidad



Figura 1: Caldera del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UPB

industrial se genera vapor para esterilizar los cubiertos.

2. Calentar otros fluidos, por ejemplo, en la industria petrolera se calientan los crudos pesados para mejorar su fluidez. También se emplea para separar el agua asociada al crudo que se extrae de un pozo petrolero.
3. Generar electricidad. Las calderas son parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

3.1. Tipos de caldera

En esta subsección se presenta una clasificación de las calderas por diferentes criterios, después se describen las calderas acuotubulares y sus diferentes tipos, luego las piro-tubulares y sus diferentes tipos y por último se describen otros tipos de calderas.[1]

Clasificación de Calderas

1. Según el combustible: para combustibles sólidos y para combustibles fluidos.

- De biomasa.
 - De carbon mineral.
 - De combustibles sólidos. En las de combustibles sólidos, el hogar consta de dos compartimentos superpuestos. En el superior, brasero, se coloca el combustible sobre una parrilla. El inferior, cenicero, recibe las cenizas del combustible. Por la puerta de éste entra el aire necesario para la combustión y los humos se extraen por un conducto (humero o chimenea) vertical, por tiro térmico. El propio tiro térmico crea en el hogar una falta de presión que aspira el aire de la combustión. La regulación de la potencia se hace abriendo o cerrando la entrada del aire.
 - De combustibles líquidos. El combustible se prepara y se quema en un quemador, en el que se mezcla el combustible con la cantidad precisa de aire y se impulsa dentro del hogar mediante un ventilador. Cuando el combustible es líquido (gasóleo) es necesario pulverizarlo para conseguir la mezcla. Los combustibles gaseosos también deben mezclarse con el aire para proveerles el oxígeno requerido para la combustión. Además hay calderas específicas para gases combustibles que tienen quemador atmosférico. El gas se deja salir por unos inyectores de modo que, por efecto Venturi, aspira aire y se mezcla con él en la proporción adecuada y se quema en unos quemadores, subdividido en pequeñas llamas, dentro de un intercambiador. Las más conocidas de estas calderas son las llamadas murales, aunque también existen en tamaños grandes.[1] La regulación de la potencia, en los dos tipos, se hace mediante la regulación del tamaño de la llama (quemadores modulantes) o mediante paradas y arranques del quemador.
 - De combustibles gaseosos.
 - De combustibles especiales.
 - De recuperación de calor de gases.
 - Mixtos y nucleares.
2. Según el modo de combustión: De combustión continua (las de combustibles sólidos, se encienden al comienzo de la jornada y se regula la potencia mediante la regulación de la entrada de aire) y de combustión intermitente (las de combustibles fluidos; se encienden a ratos, más o menos largos según la potencia demandada).
 3. Según el funcionamiento del hogar: De hogar en sobrepresión (con quemador con soplante,

para combustibles fluidos, generalmente de combustión intermitente) y de hogar en depresión, en el que el aire de combustión lo aporta el tiro de la chimenea (combustión de sólidos en general y calderas atmosféricas de gas).

4. Por la forma de construcción. Se dividen en acuotubulares y en pirotubulares y las hay con tubos verticales, horizontales e inclinados y los tubos pueden ser rectos o curvados.

5. Por la circulación del agua.

- De circulación natural: Es cuando la circulación de agua se produce de un modo natural por diferencia de densidades del agua (agua caliente y agua fría tienen diferentes densidades y se desplazan mutuamente)

Las calderas de circulación natural se clasifican a su vez en:

a) Circulación limitada son aquellas en las que el agua forma un circuito cerrado desde su entrada en la caldera hasta su salida en forma de vapor quedando limitada la circulación a la reposición de la cantidad vaporizada.

b) Circulación libre son aquellas en las que los movimientos circulatorios del agua son los naturales originados por la corriente de convección.

c) Circulación acelerada son aquellas en las que la circulación está favorecida por la disposición de los elementos que la componen, disposición que hace que la velocidad de circulación pueda alcanzar hasta los 1,2 metros.

- De circulación forzada. En éste caso el agua circula por la acción de una bomba de circulación exterior. Las calderas de circulación forzada pueden ser:

a) De un solo paso en las cuales el agua impulsada hacia los tubos vaporizadores se convierte totalmente en vapor.

b) De recirculación en las cuales solo se convierte en vapor una parte del agua que circula mientras la restante vuelve al circuito de circulación.

6. Por el mecanismo de transición de calor.

- De conveccion.
- De conducción.
- De radiación y conveccion.

3.2. Descripción de algunos tipos de calderas

- **Calderas Sencillas** Estas calderas se componen de un cilindro de planchas de acero con fondos combados. En la parte central superior se instala una cúpula cilíndrica llamada domo, donde se encuentra el vapor más seco de la caldera, que se conduce por cañerías a las máquinas. La planchas de la calderas, así como los fondos y el domo se unen por remachadura. Esta caldera se monta en una mampostería de anillos refractario, y allí se instalan el fogón carnicero y conducto de humo. En el hogar, situado en la parte inferior de la caldera, se encuentran las parrillas de fierro fundido y al fondo un muro de ladrillos refractarios, llamado altar, el cual impide que se caiga el carbón y eleva las llamas acercándolas a la caldera.

- **Calderas con Hervidores**

Este tipo de calderas surgieron bajo la necesidad de producir mayor cantidad de vapor. Los hervidores son unos tubos que se montan bajo el cuerpo cilíndrico principal, de unos 12 metros de largo por 1.50 metros de diámetro; estos hervidores están unidos a este cilindro por medio de varios tubos adecuados. Los gases del hogar calientan a los hervidores al ir hacia adelante por ambos lados del cuerpo cilíndrico superior, tal como en la caldera anteriormente mencionada. Las ventajas de estas calderas, a comparación de las otras, es por la mayor superficie de calefacción o de caldeo, sin aumento de volumen de agua, lo que aumenta la producción de vapor. Su instalación, construcción y reparación es sencilla. Los hervidores pueden cambiarse o repararse una vez dañados. La diferencia de dilatación entre la caldera y los hervidores pueden provocar escape de vapor en los flanches de los tubos de unión y, a veces, la ruptura. Esta es una de las desventajas de esta caldera.

- **Calderas de Hogar Interior** En este tipo de calderas, veremos las características de funcionamiento de la caldera con tubos hogares cornualles. Estas calderas están formadas por un cuerpo cilíndrico principal de fondos planos o convexos, conteniendo en su interior uno o dos grandes tubos sumergidos en agua, en cuya parte anterior se instala el hogar. El montaje se hace en mampostería, sobre soportes de fierro fundido, dejando un canal para que los humos calienten a la caldera por el interior en su recorrido hacia atrás, donde se conducen por otro canal a la chimenea. Su instalación se puede hacer por medio de dos conductos en la parte baja, para que los humos efectúen un triple recorrido: hacia adelante por los tubos hogares, atrás por un conducto lateral, adelante por el segundo conducto y finalmente a la chimenea. Los tubos hogares se construyen generalmente de plantas onduladas, para aumentar la su-

perficie de calefacción y resistencia al aplastamiento. Caldera de Mediano Volumen de Agua (Ignitubulares).

- **Caldera Semitubular** Esta caldera se compone de un cilindro mayor de fondos planos, que lleva a lo largo un haz de tubos de 3.^a 4" de diámetro. Los tubos se colocan expandidos en los fondos de la caldera, mediante herramientas especiales; se sitúan diagonalmente para facilitar su limpieza interior. Más arriba de los tubos se colocan algunos pernos o tirantes para impedir la deformación y ruptura de los fondos, por las continuas deformaciones debido a presión del vapor, que en la zona de los tubos estos sirven de tirantes. Para la instalación de la caldera se hace una base firme de concreto, de acuerdo al peso de ella y el agua que contiene. Sobre la base se coloca la mampostería de ladrillos refractarios ubicados convenientemente el hogar y conductos de humos. La caldera misma se mantiene suspendida en marcos de fierro T, o bien se monta sobre soporte de fierro fundido. Estas calderas tienen mayor superficie de calefacción.
- **Caldera Locomotora** Esta caldera se compone de su hogar rectangular, llamada caja de fuego, seguido de un haz tubular que termina en la caja de humo. El nivel del agua queda sobre el ciclo del hogar, de tal manera que éste y los tubos quedan siempre bañados de agua. Para evitar las deformaciones de las paredes planas del hogar, se dispone de una serie de estayes y tirantes, que se colocan atornillados y remachados o soldados a ambas planchas. Los tubos se fijan por expandidores a las dos placas tubulares y se pueden extraer por la caja de humo, cuando sea necesario reemplazarlos. Todas las calderas locomotoras se hacen de chimenea muy corta, las que producen pequeños tirajes naturales.
- **Calderas de Galloway** Reciben este nombre las calderas de uno o dos tubos hogares, como la Cornualles, provistas de tubos Galloway. Estos tubos son cónicos y se colocan inclinados en distintos sentidos, de tal manera que atraviesan el tubo hogar. Los tubos Galloway reciben el calor de los gases por su superficie exterior, aumentando la superficie total de calefacción de la caldera.
- **Locomóviles** Este nombre lo recibe el conjunto de caldera y máquina a vapor que se emplea frecuentemente en faenas agrícolas. La caldera puede ser de hogar rectangular, como la locomotora, o cilíndrico. La máquina se monta sobre la caldera, y puede ser de uno o dos cilindros. Todo el conjunto se monta sobre ruedas y mazos para el traslado a tiro. Estas calderas tienen

también tiraje forzado al igual forma que las locomotoras. Deberán estar provistas, además, de llave de extracción de fondo, tapón fusible, válvula de seguridad, manómetro, etc., accesorios indispensables para el estricto control y seguridad de la caldera.

- **Calderas Marinas** Los buques a vapor emplean calderas de tubos de humo y de tubos de agua. Entre las primeras se emplean frecuentemente las llamadas “calderas de llama de retorno” o “calderas suecas”. Este tipo de calderas consta de un cilindro exterior de 2 a 4.1/2 metros de diámetro y de una longitud igual o ligeramente menor. En la parte inferior van dos o tres y hasta cuatro tubos hogares, que terminan en la caja de fuego, rodeado totalmente de agua. Los gases de la combustión se juntan en la caja de fuego, donde terminan de arder y retoman, hacia atrás por los tubos de humo, situados más arriba de los hogares. Finalmente los gases quemados pasan a la caja de humo y se dirigen a la chimenea.
- **Semifijas** En algunas plantas eléctricas, aserraderos, molinos, etc., se emplea el conjunto de caldera y máquina vapor que recibe el nombre de “semifija”. La caldera se compone de un cilindro mayor, donde se introduce el conjunto de hogar cilíndrico y haz de tubos, apernado y empaquetados en los fondos planos del cilindro exterior. El hogar y el haz de tubos quedan descentrados hacia abajo, para dejar mayor volumen a la cámara de vapor. Todo este conjunto se puede extraer hacia el lado del hogar, para efectuar reparaciones o limpieza. El emparrillado descansa al fondo en un soporte angular, llamado “puente de fuego” y tiene también varios soportes transversales ajustables. El hogar se cierra por el frente por una placa de fundición, revestida interiormente de material refractario, donde va también la puerta del hogar y cenicero. El vapor sale por el domo de la caldera, pasa por el serpentín recalentador, se recalienta y sigue a la máquina.
- **Calderas Combinadas.** Las construidas con más frecuencia son las calderas de hogar interior y semitubular. En la parte inferior hay una caldera Cortnualles de dos o tres tubos hogares o una Galloway, combinada con una semi tubular que se sitúa más arriba. Ambas calderas tienen unidas sus cámaras de agua y de vapor, por tubos verticales. Los hogares se encuentran en la caldera inferior. Los gases quemados se dirigen hacia adelante, suben y atraviesan los tubos de la caldera superior, rodean después a esta caldera por la parte exterior, bajan y rodean a la inferior, pasando finalmente a la chimenea. El agua de alimentación se entrega a la caldera superior y una vez conseguido el nivel normal de ésta, rebalsa por el tubo vertical interior a la cámara de agua de la cámara inferior. Ambas calderas están provistas de tubos

niveles propios. El vapor sube por el tubo vertical exterior, se junta con el que produce la caldera superior y del domo sale al consumo.

3.3. Descripción de las Calderas Acuotubulares

En estas calderas los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, mientras que por su interior lo hace el agua.

Estas calderas tienen un gran espectro de producción de vapor, la cual puede variar desde una pequeña producción, en calderas compactas, hasta las grandes producciones de 1000 ton/h y presiones hasta 150 kg/cm², cómo es el caso de las centrales termoeléctricas.

En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura al salir por la parte más alta, provoque un ingreso natural del agua más fría por la parte más baja. Originalmente estaban diseñadas para quemar combustible sólido.

La producción del vapor de agua depende de la correspondencia que exista entre dos de las características fundamentales del estado gaseoso, que son la presión y la temperatura. A cualquier temperatura, por baja que esta sea, se puede vaporizar agua, con tal que se disminuya convenientemente la presión a que se encuentre sometido dicho líquido, y también a cualquier presión puede ser vaporizada el agua, con tal que se aumente convenientemente su temperatura.

Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, y gran capacidad de generación. Ver Figura 2.

Las Calderas Acuotubulares se Clasifican:

- Compactas (Hogar integral pequeño y Hogar integral grande)
- No Compactas (Tubo recto y Tubo curvo)
- Alta presión y temperatura
- Lecho fluidizado (Burbujeante, Circulante, Presurizado)

Tipos de Calderas Acuotubulares Un ejemplo de estas calderas es la caldera acuotubular STEINMÜLLER. Estas calderas mixtas o intermedias, tienen tubos adosados a cajas, inclinados sobre el hogar y un colector cilíndrico grande encima, llamado domo o cuerpo cilíndrico, en donde

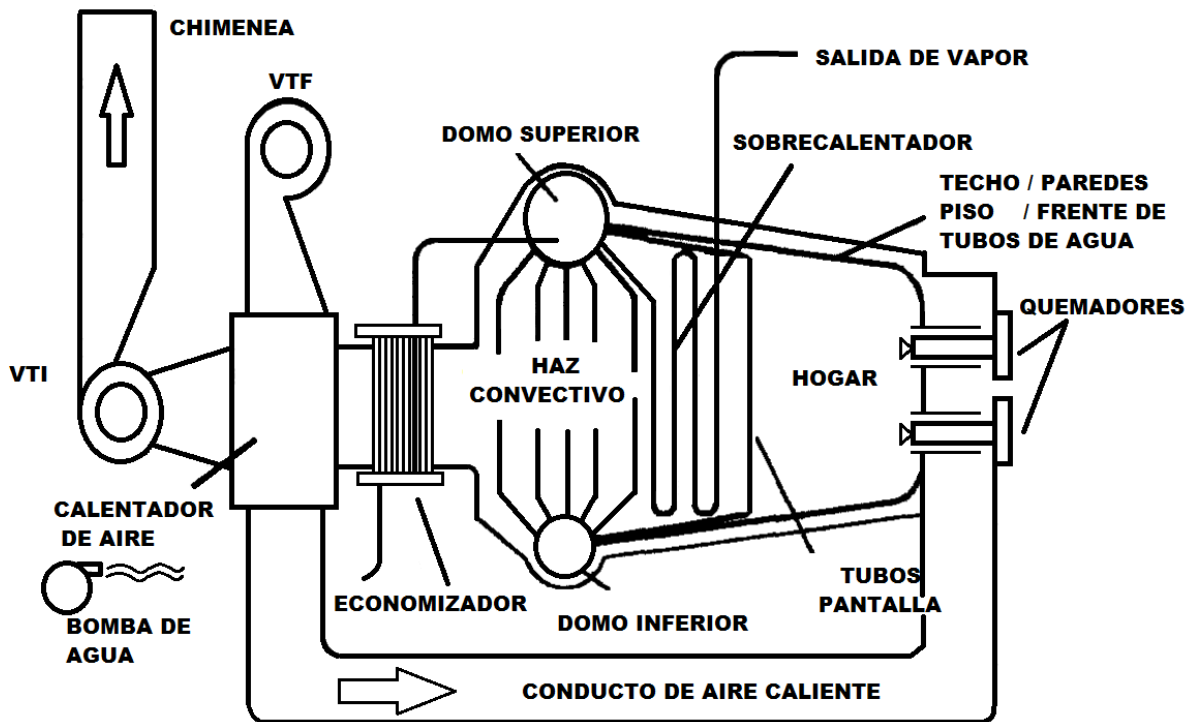


Figura 2: Caldera Acuotubular

se produce la separación del agua y el vapor. Además el vapor que se obtiene puede ser húmedo o seco, haciéndolo pasar por un sobrecalentador.

La producción de vapor de estas calderas es de unos 1500 kg/hora cada una, a una presión de régimen de 13 atm. absolutas y 300 °C de temperatura. Desde su construcción estaban preparadas para quemar carbón, pero en el año 1957 el Prof. Lorenzo Lambruschini con la ayuda de sus alumnos, le incorporó sopladores y quemadores para combustibles líquidos. En general los tubos son la parte principal de la caldera, y dos o tres accesorios llamados colectores, en donde se ubican las válvulas de seguridad, termómetros, tomas de vapor, entrada de agua, etc.

Las calderas se construyen en una amplia variedad de tamaños, disposiciones, capacidades, presiones, y para aplicaciones muy variadas.

- Calderas verticales marca OLMAR** Están formadas por un tubo de gran diámetro en su interior al que se acoplan una serie de colectores por los que circula el agua. Este tipo de calderas permiten una muy fácil accesibilidad a su interior y están especialmente diseñadas para pequeñas industrias tales como tintorerías, lavanderías, lácteos, panaderías. Las calderas

verticales OLMAR, se construyen con producciones que varían desde la obtención de 70 Kg/h hasta 1.200 Kg/h y a unas presiones comprendidas entre 2 y 14 Kg/cm². Se utilizan distintos tipos de combustibles, pero no solo los líquidos, sino que las calderas verticales OLMAR, permiten la construcción de hogares especiales para combustibles sólidos, tales como orujillo, madera, e incluso en algunos casos se fabrican con hogares mixtos para combustibles sólidos-liquidos.

- **Caldera Babcock-Wilcox** Compuesta de uno hasta tres colectores superiores de agua y vapor, unidos al haz de tubos rectos inclinados por ambos extremos y el colector inferior de impurezas. El hogar es generalmente de parrilla mecánica, utiliza como combustible hulla menuda, la cual es depositada en la tolva avanzando al interior del hogar. Una vez penetrado al hogar, se destila quemándose los gases con llama larga; el coque que resulta se sigue quemando, hasta quedar solo ceniza y escoria. Los gases calientan primeramente la parte superior del haz tubular, el recalentador del vapor, para continuar hasta dirigirse a la chimenea.

El agua se inyecta a la cámara de agua del colector superior, bajando e iniciando así su calentamiento, poniéndose en contacto con la parte menos caliente de los tubos de agua. Se junta con el vapor que allí se forma y circulan activamente, favorecidos por la inclinación de los tubos. El vapor se recibe por válvulas colocadas en la parte más alta y se recalienta en su paso por el recalentador al encender la caldera y para impedir que se fundan los tubos secos del recalentador, se inunda, abriendo la llave de vapor y la de agua, posteriormente se cierra esa llave y se elimina el agua por la llave inferior.

- **Calderas Stirling** Constan de tres colectores superiores dispuestos paralelamente entre sí, con sus cámaras de vapor interconectadas por tubos de acero. Las cámaras de agua de los dos primeros colectores están comunicadas. Los colectores superiores están conectados al inferior mediante tres haces de tubos delgados, expuestos al calor del hogar y de los gases producto de la combustión.

Consumen hulla u otro combustible sólido, como también líquidos o gaseosos. Los gases calientan sucesivamente los haces tubulares, pasando finalmente a la chimenea.

El agua es inyectada al último de los tres colectores superiores, descendiendo por el haz menos calentado, para luego ascender por los dos anteriores, junto con el vapor que se produce en ellos. El vapor es obtenido del colector central superior, colocado a mayor altura que los otros

dos, pudiendo ser enviado al recalentador que se monta sobre el primer haz de tubos. Se pueden obtener más de 80.000 Kg. de vapor por hora en esta caldera.

- **Caldera Borsig** Compuesta de un colector superior de agua y vapor, unido al inferior de agua e impurezas por un haz de tubos verticales curvados en sus extremos, de tal manera que penetren radialmente en las paredes de los colectores, para facilitar su expandidura. En un extremo superior se encuentra el recalentador de vapor.

Tiene dos clases de tubos:

1. De descenso del agua (90-12 mm. diámetro).
2. De vaporización (53,5-60 mm. diámetro).

El agua de alimentación es inyectada en forma directa a los tubos de descenso, que están provistos de un embudo, mientras que el otro embudo donde terminan esos tubos por su parte inferior, permite la precipitación de los sedimentos sobre el fondo del hervidor superior. El agua más caliente sube por los tubos de vaporización al colector superior, de donde se extrae el vapor. Sobre los tubos de descenso va un mamparo refractario, para guiar los gases producto de la combustión.

- **Caldera Yarrow y Thornycroft** Empleadas principalmente en buques de vapor. Compuestas ambas de un colector superior y de dos inferiores, unidos por dos haces de tubos. La caldera Yarrow tiene los colectores inferiores achatados para así facilitar la expandidura de los tubos. La Thornycroft tiene tubos curvos, que entran radialmente a los colectores, aumentando también su longitud y superficie y superficie de calefacción de la caldera.

Pueden quemar hulla o petróleo, en su amplio hogar, donde es quemada toda la materia volátil. Los gases suben calentando los tubos y recalentadores, que se ubican sobre ellos.

3.4. Descripción de las Calderas Piro-tubulares

En estas calderas, los gases de combustión son obligados a pasar por el interior de unos tubos, que se encuentran sumergidos en la masa de agua. Todo el conjunto, agua y tubo de gases, se encuentra rodeado por una carcasa exterior. Los gases calientes, al circular por los tubos, ceden calor, el cual se transmite a través de los tubos, y posteriormente al agua. La presión de trabajo normalmente no excede los 20 kg/cm², ya que a presiones más altas obligaría a espesores de carcasa demasiados grandes. Su producción de vapor máxima se encuentra alrededor de 25 ton/hr.

La caldera de vapor pirotubular, concebida especialmente para aprovechamiento de gases de recuperación presenta las siguientes características. El cuerpo de caldera, está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor. La circulación de gases se realiza desde una cámara frontal dotada de brida de adaptación, hasta la zona posterior donde termina su recorrido en otra cámara de salida de humos.(vea Figura 1)

El acceso al cuerpo lado gases, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. En cuanto al acceso, al lado agua se efectúa a través de la boca de hombre, situada en la bisectriz superior del cuerpo y con tubuladuras de gran diámetro en la bisectriz inferior y placa posterior para facilitar la limpieza de posible acumulación de lodos.

El conjunto completo, calorífugado y con sus accesorios, se asienta sobre un soporte deslizante y bancada de sólida y firme construcción suministrándose como unidad compacta y dispuesta a entrar en funcionamiento tras realizar las conexiones a instalación.

La caldera, una vez realizadas las pruebas y comprobaciones reglamentarias y legales por una Entidad Colaboradora de la Administración, se entrega adjuntando un Expediente de Control de Calidad que contiene todos los certificados y resultados obtenidos. Ver figura 3.

Las Calderas Pirotubulares Se Clasifican:

- Para combustibles líquidos (Calderas de hogar integral y Calderas compactas con tubo hogar).
- Para combustibles gaseosos.

Tipos de Calderas Pirotubulares

Calderas horizontales Las calderas de vapor pirotubulares OLMAR, se fabrican con producciones comprendidas entre un mínimo de 200 Kg/h y un máximo de 17.000 Kg/h y con presiones que pueden oscilar desde 8 Kg/cm² hasta 24 Kg/cm².

Cada unidad pasa por estrictos controles durante el proceso de fabricación. Los resultados de estos controles, a los que se suman los que realizan nuestros proveedores en su propio material, conforman un Expediente de Control de Calidad. De esta forma se cumple lo indicado en el Código de Construcción, así como en todas las normas oficiales en vigor, tanto nacionales como de la Unión Europea.

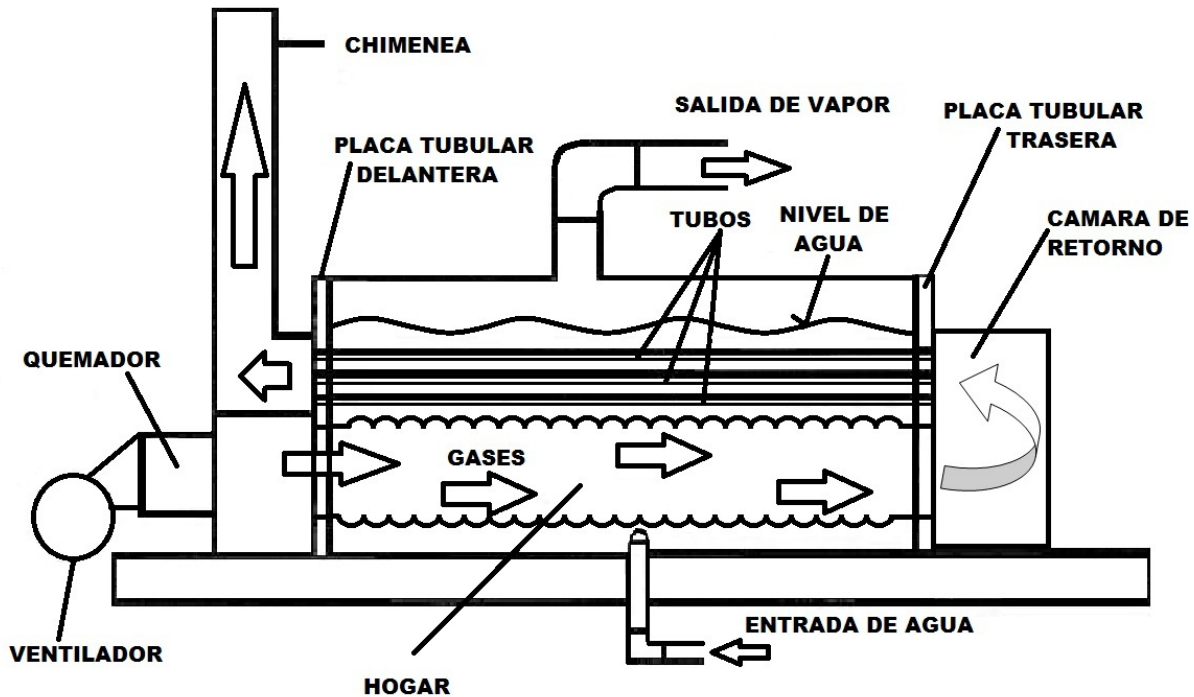


Figura 3: Caldera Pirotubular

Los procesos de soldadura están homologados y los operarios cualificados, siendo las soldaduras radiografiadas según las exigencias del Código de Diseño empleado.

A diferencia de otras calderas, cuya parte trasera solo es asequible por el interior del hogar, la caldera de vapor OLMAR dispone en la parte de atrás de una puerta abisagrada y de apertura total que deja al descubierto todo el interior. La facilidad de manipulación y la total accesibilidad, permiten al operario realizar las tareas de limpieza y mantenimiento desde el exterior y lo que es muy importante, incluso inmediatamente después de haber detenido el quemador.

4. Transferencia de calor en calderas

Se debe definir cuáles son aquellos medios a través de los cuales se produce la transferencia de calor desde la fuente caliente, que son los gases, a la fuente fría, que son el agua y vapor.

Básicamente existen tres diferentes maneras en la cual viaja el calor. Estas son conducción, convección y radiación.[2]

4.1. Conducción

Es la forma de transferencia en la cual el calor se propaga a través de un punto a otro dentro de un determinado material, o a través de otro contiguo a éste. Para entender este fenómeno basta recordar que agregar calor implica producir una mayor actividad molecular en la materia. Esta actividad se puede interpretar como vibraciones de sus moléculas. Dicha vibración excita a las moléculas adyacentes, lo que se traduce en un flujo de calor en sentido de la zona de mayor a menor temperatura. La capacidad de un material que define si es buen conductor de calor, se denomina “Conductividad Térmica” y está expresada en $\text{Kcal/h } ^\circ\text{C m}$. Los gases y vapores son malos conductores, los líquidos mucho mejores y los metales son los mejores. A su vez, la conductividad térmica es función de la temperatura del material.

4.2. Convección

Es la forma de transferencia del calor por medio del desplazamiento de los fluidos de un sitio a otro. Este fenómeno puede presentarse de dos formas distintas: convección natural o forzada.

4.2.1. Convección natural

Cuando una porción de fluido se calienta, experimenta un aumento de su temperatura y en consecuencia su densidad se reduce.

Esto genera un desequilibrio natural de fuerzas respecto a aquella porción de masa que aún no ha experimentado dicha variación de temperatura. El resultado de este desequilibrio térmico motiva que la porción de masa más liviana ascienda, alejándose de la fuente de calor, mientras la más pesada o sea la de menor temperatura, descienda, creándose por consiguiente lo que conocemos como transferencia de calor por medio de la circulación natural.

4.2.2. Convección forzada

Cuando a un fluido al que se lo calienta, se lo fuerza a circular por medios mecánicos, por ejemplo: una bomba, un ventilador, etc., se está ante la presencia de lo que se conoce como la transferencia de calor por medio de la circulación forzada.

4.3. Radiación

Todos los cuerpos irradian energía. La radiación, a diferencia de la conducción o convección, no necesita medio físico para trasladarse; viaja tanto a través de la materia, como a través del vacío. Su forma de propagación es similar a la de la luz, o sea por ondas electromagnéticas.

Puede presentarse como radiante luminoso o no luminoso. Un cuerpo sometido a radiación es calentado sólo del lado expuesto. El otro lado, el que está a la sombra, no sufrirá, por efecto de la radiación, variación alguna de su temperatura. La cantidad de calor irradiado por un cuerpo depende en alguna medida de su forma, tamaño y composición, pero fundamentalmente es directamente proporcional a su temperatura absoluta ($T_{abs} = \text{Temp.}^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}\text{C}$) elevada a la cuarta potencia. Esto significa que si la temperatura absoluta de un cuerpo aumenta al doble, el calor irradiado por éste será ahora de 16 veces la anterior. Es importante destacar que dos cuerpos enfrentados irradian ambos calor de acuerdo a cada una de sus temperaturas absolutas, pero el calor neto transferido del cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, será la diferencia algebraica entre ambos.

4.4. Nucleate boiling

Los tubos de pared de agua del hogar están diseñados para que en su interior se desarrolle el fenómeno que se conoce como “nucleate boiling”, cuya particularidad se debe a que siempre aparecen, entre la interfase agua-tubo, burbujas de vapor mezcladas con agua, de manera tal que este último actúe como un refrigerante para el tubo debido a su buena conductividad.

Si por alguna anomalía el fenómeno del “nucleate boiling” desapareciera, debido por ejemplo a un aumento excesivo de la carga térmica, se formaría una película de vapor entre el tubo y la masa de agua. La conductividad de esta película es mala comparada con la del agua, y en consecuencia el calor aportado atraviesa dicha película con dificultad, provocando un aumento de temperatura en la pared del tubo. Si esta temperatura llegara a superar a la máxima de diseño del material del tubo a la presión de operación, sería factible la rotura del mismo.

La desaparición del “nucleate boiling” también puede ocurrir si se presentara un aumento considerable de la presión, pues a medida que ésta aumenta, la formación de la película de vapor tiende a desplazar a la mezcla agua/burbujas de vapor.

4.5. Film boiling

En cambio, en el diseño de los tubos del sobrecalentador ya se contempla el fenómeno de aparición de esta película de vapor, “film boiling”, como interfase tubo-vapor. Desde ya las exigencias térmicas con respecto al material de estos tubos es alta, en comparación con las del resto de la caldera.

5. Propiedades físicas del vapor

Si calentamos dentro de un recipiente cerrado y rígido, una masa de agua, partiendo desde una presión (atmosférica) y una temperatura determinada, ésta se calentará hasta una temperatura dada, (99°C), a partir de la cual comenzará el proceso de ebullición, con la consiguiente liberación de vapor.

El vapor así liberado comenzará a llenar rápidamente todos los espacios disponibles dentro del recipiente. A la presión atmosférica, 1 K de vapor ocupa 1,750 veces más volumen que el mismo peso en agua. Debido a que el recipiente es rígido y que ya no existe más espacio disponible, la liberación de más vapor comenzará a comprimir a la masa de vapor ya existente resultando un aumento en la presión de éste. De seguir suministrando calor, la presión seguirá aumentando significativamente hasta que la totalidad de la masa de agua se haya convertido en vapor. Este aumento en la presión irá acompañado de un leve aumento de temperatura. A partir de ahí, el aporte de más calor traerá aparejado un aumento menos significativo en la presión, pero de mayor importancia en la temperatura del vapor. Describiremos a continuación algunos conceptos relacionados con la terminología que se necesita conocer.

Volumen específico y Densidad Es el volumen ocupado por unidad de masa de un material y está expresado en m^3/K . La densidad es la inversa del volumen específico y se expresa en K/m^3 .

Entalpía del líquido La cantidad de calor necesario para llevar el agua desde su temperatura inicial de referencia (0°C) hasta su temperatura de ebullición se conoce como la entalpía del líquido y está expresado en $Kcal/Kg$.

Temperatura de saturación Cuando el agua entra en ebullición ambos, agua y vapor poseen la misma temperatura. A esta temperatura se la conoce como, temperatura de saturación. Para cada presión de ebullición sólo existe una temperatura de saturación y viceversa. Durante el proceso

de ebullición y a pesar del agregado de calor, la temperatura tanto del agua como la del vapor se mantienen iguales y constantes; esta última condición es verdadera siempre y cuando mantenga constante la presión.

Entalpía de evaporación El calor suministrado durante el período de ebullición, es utilizado para producir estrictamente el cambio de fase de líquido en vapor. La cantidad de calor necesario para llevar toda la masa de líquido a estado de vapor se conoce como la entalpía de evaporación, está expresado en Kcal/Kg y su valor depende de la presión.

Entalpía del vapor saturado Si a la entalpía de evaporación se le suma la del líquido, tendremos lo que se llama entalpía del vapor saturado y está expresada en Kcal/Kg Es la cantidad total de calor que se debe suministrar a un Kilogramo masa de agua desde la temperatura de referencia (0°C) para transformarlo totalmente en vapor.

Vapor sobrecalentado En tanto el vapor y el agua estén en contacto, sus temperaturas se mantendrán iguales. Si lográramos separar el vapor del agua y continuáramos suministrando calor a la primera, estaríamos en presencia de lo que se conoce como vapor sobrecalentado.

Entalpía del vapor sobrecalentado La cantidad de calor necesario para convertir un Kilogramo masa de agua a 0°C en vapor sobrecalentado a una presión y temperatura determinada se llama entalpía de vapor sobrecalentado y estará expresada en Kcal/Kg. Esta entalpía como así también su temperatura irá en aumento según se siga suministrando calor.

Punto crítico A medida que se aumenta la presión llegaremos a un punto en el cual el agua cambia de estado sin entrar en ebullición. A este punto se lo conoce como punto crítico y se encuentra a 374°C a una presión de 225 Kg/cm² Abs.

Tablas de vapor Debido a que las propiedades del vapor y el agua están definitivamente fijadas por la naturaleza, éstas pueden ser medidas y tabuladas. A esta documentación se la conoce más comúnmente por “Tablas de vapor de agua”. Allí se encuentran datos como ser: volumen específico, entalpía, entropía y viscosidad, todas estas variables en función de la temperatura y la presión.

6. Tratamiento de Agua Para Calderas

La vida útil de una caldera de vapor de agua esta asociada directamente con la calidad del agua con la que se alimenta. Una caldera que opera sin un apropiado control de las propiedades del agua de alimentación pone en riesgo su inversión.

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. Un buen tratamiento de agua es necesario para que una caldera opere de forma segura y confiable.

El agua es el fluido de trabajo de los sistemas de vapor y una de las sustancias naturales más abundantes; sin embargo, nunca se encuentra en estado puro, adecuado para la alimentación directa de una caldera. Por lo común en estado natural, el agua se encuentra turbia, con materias sólidas en suspensión fina.

Incluso cuando está clara, el agua natural contiene soluciones de sales y ácidos que dañan con rapidez el acero y los metales a base de cobre de los sistemas de vapor.

Según los elementos que la acompañan, podríamos considerar las mismas en dos grandes grupos: Elementos Disueltos y Elementos en Suspensión, esto lo constituyen los minerales finamente divididos, como las arcillas y los restos de organismos vegetales o animales; y la cantidad de sustancias suspendidas, que son mayor en aguas turbulentas que en aguas quietas y de poco movimiento.[3]

Es importante destacar que es necesario añadir a las descritas, los residuos que las industrias lanzan a los recursos fluviales procedentes de distintos procesos de producción.

Constituyen los elementos disueltos en el agua, las sustancias orgánicas, los gases disueltos, las sales minerales y la sílice, aunque ésta también suele aparecer como elemento en suspensión en forma de finísimas partículas o coloides.

Las aguas pueden considerarse según la composición de sales minerales presentes, en:

- **Aguas duras:** Importante presencia de compuestos de calcio y magnesio, poco solubles, principales responsables de la formación de depósitos e incrustaciones.
- **Aguas Blandas:** composición principal está dada por sales minerales de gran solubilidad.
- **Aguas Neutras:** Componen su formación una alta concentración de sulfatos y cloruros que no aportan al agua tendencias ácidas o alcalinas, o sea que no alteran sensiblemente el valor de pH.

- **Aguas Alcalinas:** Las forman las que tienen importantes cantidades de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio, las que proporcionan al agua reacción alcalina elevando en consecuencia el valor del pH presente.

6.1. Problemas derivados de la utilización del agua en calderas

Los problemas mas frecuentes presentados en calderas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Problemas de Corrosión
- Problemas de incrustación

Ocasionalmente se presentan:

- Problemas de ensuciamiento y/o contaminación.

Algunos problemas causados por las impurezas en el agua de alimentación son:

- Formación de costras
- Corrosión
- Priming (formación de burbujas de aire)
- Adherencia del vapor al cilindro (de minerales volátiles)

Algunos parámetros importantes del agua de alimentación son:

- pH
- Dureza
- Concentración de oxígeno y del dióxido de carbono
- Silicatos
- Sólidos disueltos
- Sólidos suspendidos
- Concentración de materia orgánica

Las instalaciones que producen el agua de alimentación de la caldera usan un surtido de tratamientos de agua tales como:

- Ósmosis inversa
- Intercambio iónico
- Dosificación química

Los problemas más frecuentes en lo referente a la calidad del agua y que influyen en la operación de la caldera son:

- **Formación de depósitos:** La incrustación es indeseable ya que al formar una capa en los tubos y demás componentes del equipo, evitan la transmisión efectiva del calor. Esto conduce a una baja eficiencia en la producción de vapor, disminuyendo la cantidad de vapor producido por unidad de calor generado, y también causa desgaste del tubo y accesorios por fatiga térmica ya que se requiere de mayor temperatura del metal en la parte expuesta a la flama, que cuando no existe incrustación y este desgaste térmico afecta también la vida útil del equipo.

Los depósitos se producen por sólidos suspendidos que el agua pueda contener y principalmente por formación de depósitos de sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio, en mezclas complejas con otros componentes como sílice, bario, etc.

Para evitar la formación de incrustaciones se deben remover los sólidos coloidales y materia suspendida que el agua contenga y ablandamiento o suavización del agua cruda antes de integrarla a la caldera.

- **Corrosión por Oxidación del metal:** Los principales componentes de la caldera son metálicos. Los agentes que atacan el fierro y lo disuelven son los gases corrosivos como oxígeno y bióxido de carbono. También la acidez del agua causa corrosión por lo que el pH debe mantenerse entre 9.0 y 11.5.

El control del oxígeno disuelto es uno de los puntos críticos en la operación de la caldera. Las picaduras o áreas de desgaste localizadas en ciertas partes de los tubos de la caldera ocurre por la acción corrosiva del oxígeno.

En el condensador del sistema, el bióxido de carbono se suma a la acción corrosiva del oxígeno y destruyen en poco tiempo el tanque del condensador si no son removidos estos gases.

- **Fragilización cáustica:** Si la alcalinidad a la fenolftaleína que es la que se encuentra en forma de carbonatos es muy alta, pueden presentarse problemas de fragilización del metal. Esta pérdida de elasticidad, también puede ocurrir por frecuentes shocks térmicos en la caldera, al complementar sin calentamiento previo el agua de repuesto para compensar por las pérdidas por fugas de vapor o por purgas de la caldera.
- **Formación de Espumas:** Esto ocurre cuando hay presencia de materia orgánica o de una gran cantidad de sólidos disueltos en el agua de la caldera. Para evitar la formación de espumas, se purga la caldera cuando en el agua se alcanza un cierto nivel preestablecido de sólidos disueltos. Otra acción preventiva consiste en tener un tratamiento externo del agua de alimentación para evitar la presencia de sólidos suspendidos de naturaleza orgánica, así como de grasas y aceites del equipo de proceso que puedan contaminar el agua.

6.2. Procesos de Tratamiento

Un buen operador de calderas puede controlar y compensar por los efectos indeseables del agua de proceso en la caldera. La adición de productos químicos como antiespumantes, secuestrantes de metales corrosivos, neutralizadores de gases corrosivos, modificadores de alcalinidad y pH, etc. Pueden exitosamente solucionar los problemas de daños y desgaste anormal de la caldera.

Sistema de tratamiento de agua de caldera con agua desmineralizada.

El concepto de desmineralizar el agua que se alimenta a una caldera tiene la gran ventaja de poder emplear una sola formulación o adición de sustancias químicas que protejan la caldera de la acción corrosiva e incrustante del agua de proceso, independientemente de la procedencia y calidad del agua.

Proceso de Ablandamiento Tradicional:

En el proceso de ablandamiento con resinas catiónicas, el calcio y el magnesio son intercambiados por iones sodio. En el proceso de ablandamiento la salinidad o contenido de sales disueltas en el agua no disminuye, de hecho se incrementa ligeramente ya que un equivalente de calcio Ca^{+2} pesa 20 gramos y un equivalente de sodio Na^{+} pesa 23 gramos.

Ablandamiento Con Membranas:

Para que el agua pueda ser procesada por membranas, previamente deberá tener un adecuado tratamiento externo, para garantizar la ausencia de sólidos y coloides en el agua a alimentar a la caldera. En el proceso de membranas, si éstas son de osmosis inversa, las sales son removidas y

el permeado o producto solo contiene trazas de sales disueltas. En el proceso de membranas se remueven del agua de alimentación a la caldera componentes indeseables como: calcio, magnesio, fierro y otros metales, carbonatos y bicarbonatos, cloruros, sulfatos, etc., por lo que estos ya no precipitan en el calentamiento y evaporación del agua en la caldera.

En el ablandamiento por membranas la salinidad disminuye debido a que no es una reacción de intercambio, sino un proceso de tamizado a nivel atómico y molecular que separa los iones en dos corrientes, una que es el producto sin iones disueltos y un rechazo que acarrea los iones que ya no contiene el agua producto y que originalmente contenía el agua de alimentación a la membrana.

Al no tener sales el agua de alimentación no se requiere de las frecuentes purgas y la consiguiente reposición del agua desechada. Esto conduce a menor gasto de productos químicos y a menores pérdidas de calor por el agua caliente que se desecha en la purga.

El agua desmineralizada es altamente corrosiva, por lo que es necesario neutralizar ésta y agregar sustancias químicas que suban el pH y tengan una acción protectora con el metal con el que estarán en contacto en la caldera.

6.3. Esquema de tratamiento:

El esquema de tratamiento para un sistema de caldera con agua desmineralizada consiste en lo siguiente: el agua de la fuente de suministro pasa a través de un filtro de multimedia para remover partículas suspendidas y posteriormente por un filtro de micro filtración de 5 micrones que remueve las partículas de finos del agua a alimentar a la membrana.

El agua de rechazo en las membranas puede tener un uso secundario, como en riego, limpieza de maquinaria y equipo, se puede integrar al agua de servicios generales, reinyectarse en el pozo, o como última opción desecharse al drenaje.

El agua producto sin sales pasa por una membrana Liquicel que remueve los gases disueltos entre ellos el oxígeno y bióxido de carbono, que son altamente corrosivos en las condiciones de operación de las calderas.

El agua producto de las membranas y que ya no contiene sales se alimenta a la caldera pero antes se agrega un reactivo especialmente formulado que reacciona químicamente con el oxígeno residual del agua de proceso en la caldera, y lo convierten a una forma no corrosiva.

También se deberá agregar una formulación para incrementar el pH del agua de alimentación y proteger el metal de la acción corrosiva del agua y componentes traza que pudiese haber en el agua que se procesa en el ciclo de calentamiento y evaporación en la caldera.

Este esquema de tratamiento tiene las siguientes ventajas:

1. Protege la caldera de la corrosión.
2. No hay forma de tener incrustaciones por precipitación de sales insolubles y sólidos suspendidos
3. No hay formación de espuma en la caldera, lo cual afecta la calidad del vapor y causa problemas de operación en la caldera.
4. La formulación del producto que protege la caldera, no esta sujeta a variables en la composición del agua o a criterios del operador. Siempre es un mismo esquema de tratamiento independientemente de la naturaleza y calidad del agua de suministro o fuente de abastecimiento.

Para un efectivo tratamiento de agua

El agua cruda contiene componentes iónicos que forman incrustaciones como calcio, magnesio y sílice que causan corrosión tales como oxígeno disuelto, dióxido de carbono, etc. Estos componentes pueden precipitar como incrustación sobre las paredes interiores de la caldera o causar corrosión. Esto reducirá la eficiencia térmica y puede causar ruptura en los tubos de la caldera. Los productos químicos efectivamente resuelven estos problemas y de este modo se logra una operación segura, ahorrando energía y operando económicamente la caldera.

6.4. Químicos para la Caldera:

Los químicos para caldera tienen dos funciones: prevenir la incrustación y ajustar el pH del agua de la caldera para inhibir la corrosión. Hoy en día se prepara muchas clases de químicos para caldera para seleccionar el tratamiento más adecuado de acuerdo a la condición de operación.

1. Secuestrador de oxígeno:

El secuestrador de oxígeno es un químico el cual secuestra el oxígeno disuelto en agua por una reacción de reducción y de este modo inhibe la corrosión causada por éste. Se preparan varios tipos de secuestradores de oxígeno basados en hidrazina, sulfito, glucosa, etc.

2. Dispersante de lodos:

Para prevenir la acumulación de lodos y los problemas de incrustación, el dispersante de lodos es frecuentemente utilizado. El dispersante de lodos está basado en un polímero sintético el

cual mantiene la superficie caliente siempre limpia, con objeto de lograr la máxima eficiencia de la caldera. Especialmente apropiado para la dispersión del óxido de hierro para prevenir la corrosión secundaria.

3. Inhibidor de corrosión para líneas de condensado:

Desde el punto de vista del ahorro de energía, se debe dar atención a la recuperación de condensado. El inhibidor de corrosión para líneas de condensado es necesario. Las aminas volátiles son típicamente utilizadas como inhibidores de corrosión para controlar el pH de condensado. De este modo el hierro total del agua condensada será reducido y la tasa de recuperación de los condensados aumentada.

4. Químicos multifuncionales para caldera

Los químicos multifuncionales para caldera tienen efectos para inhibir la formación de incrustación, ajuste del pH, inhibición de corrosión, secuestrador de oxígeno y dispersión de lodos con un solo producto líquido. Los líquidos multifuncionales permiten la operación a altos ciclos de concentración economizando los costos totales de la operación. Permiten una operación segura y continua eliminando los paros para mantenimiento y sus respectivos costos.

14. Agentes limpiadores para resinas de intercambio iónico. El hierro contenido y la materia orgánica en el agua cruda se depositará y cubrirá sobre la superficie de las resinas de intercambio iónico como óxido de hierro. Los agentes limpiadores efectivamente removerán la cubierta de óxido de hierro de la resina y contribuirán para alargar la vida de uso.

5. Inhibidor de corrosión para caldera fuera de servicio

Estos químicos previenen la corrosión durante el periodo que esté fuera de servicio la caldera. Este es un tratamiento químico para guardar la caldera tanto en estado húmedo como en seco.

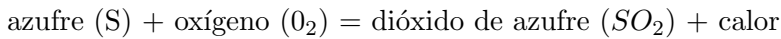
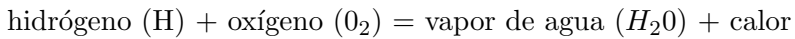
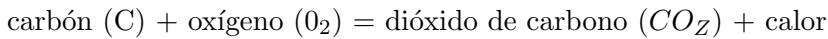
7. Combustión

7.1. Fundamentos básicos de la combustión

Básicamente se define como combustión al proceso de quemado de un determinado combustible. Desde el punto de vista químico se refiere a la reacción química de la oxidación de un combustible en presencia de oxígeno, resultando de ésta una fuerte liberación de calor y en la gran mayoría de

los casos radiación luminosa. Esta reacción se auto-sustenta a partir de cierta temperatura. Para que dé comienzo una combustión se le deberá suministrar a la mezcla aire-combustible energía proveniente de una fuente externa, de manera tal que eleve la temperatura en algún punto de su masa por encima de un determinado valor. A este valor se lo denomina temperatura de inflamación.

Una vez iniciado el proceso de combustión, éste se propagará de una molécula a otra, generando por sí solo (en condiciones normales) la energía necesaria para elevar el resto de su masa a la temperatura de inflamación, sin la necesidad de aportes energéticos externos. Este proceso prevalecerá mientras el calor proveniente de la reacción sea mayor que el cedido al medio que lo rodea. La mayoría de los combustibles utilizados en la industria, están compuestos fundamentalmente por carbón, hidrógeno y pequeñas cantidades de azufre. Como resultado de la combustión de estos tres elementos básicos se obtienen las siguientes reacciones:



Cuando la combustión se realiza en laboratorio utilizando proporciones exactas de mezcla combustible/oxígeno, obtenemos como productos de la combustión solamente dióxido de carbono, vapor de agua y dióxido de azufre (si hay azufre presente). En este tipo de ensayo de laboratorio se obtiene lo que llamaremos: combustión perfecta o estequiométrica.

La máxima temperatura de llama para un determinado combustible se obtiene mediante una combustión perfecta. Si utilizamos más oxígeno del requerido para una combustión perfecta, este exceso no reaccionará en la combustión, reduciendo la temperatura de llama, y en consecuencia este exceso aparecerá como producto final de la combustión. En cambio, si la combustión se realiza con menor porcentaje de oxígeno de lo necesario, aparecerán como productos de la combustión, sumados a los nombrados anteriormente: monóxido de carbono (CO), hidrógeno gaseoso (H_2), compuestos hidrocarburos (CXHY), sulfhídrico (H_2S) y carbón (C). Estos compuestos son el resultado de una combustión imperfecta e incompleta y producen contaminación ambiental.

7.2. Combustibles

En las calderas se puede quemar una gran variedad de combustibles que van desde gas natural hasta materiales de desecho. Pero sin embargo son tres los combustibles más importantes a nivel industrial: gas natural, fuel oil y carbón.

Las calderas que queman combustibles líquidos y/o gaseosos generalmente trabajan con pre-

siones dentro del hogar por encima de la atmosférica. Poseen un ventilador de tiro forzado que inyecta aire a los quemadores. A este tipo de circuito aire-gases se lo denomina de hogar presurizado. En cambio, en las calderas que queman combustibles sólidos, las presiones dentro del hogar se encuentran por lo general por debajo de la atmosférica. Poseen un ventilador de tiro forzado que inyecta aire a los quemadores y otro de tiro forzado, antes de la chimenea, que es el responsable de producir la presión sub-atmosférica dentro del hogar. A este tipo de circuito aire-gases se lo denomina de tiro balanceado.

7.2.1. Quemado de combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos más utilizados incluyen gas natural, gas de alto horno, gas de refinería, butano, propano, etc. Estos combustibles son fáciles de quemar pues ya se encuentran vaporizados y sólo requieren ser mezclados con el aire en las proporciones adecuadas.

El quemado de estos combustibles no producen tanto ensuciamiento de las superficies térmicas como el caso del quemado de líquidos o sólidos

7.2.2. Quemado de combustibles líquidos

Los combustibles líquidos más utilizados son el fuel oil, gas oil, diesel oil, tar, alquitrán, etc. Estos combustibles deben ser atomizados por alguno de los métodos que ya se han mencionado.

El fuel oil N° 6 es el más utilizado entre los combustibles líquidos. Pero éste, a la temperatura ambiente, se hace demasiado viscoso para ser bombeado y transportado por cañerías. Por tal motivo se lo debe calentar y filtrar previo al quemado.

Las pastillas de atomización para el quemado de estos combustibles se diseñan en base a un rango preestablecido de viscosidad. Si el precalentado es muy alto, la viscosidad del fuel oil disminuirá por debajo de lo recomendado causando pulsaciones ruidosas e inestabilidad de la llama. Por lo contrario, si la temperatura de calentamiento es demasiado baja, la viscosidad será más alta de la recomendada y traerá aparejado una atomización incorrecta con desprendimiento de partículas demasiado grandes para poder quemarse completamente, resultando en la formación de cenizas.

Las cenizas de los combustibles fósiles pueden contener azufre, trazas de metal como ser níquel, sodio y vanadio. El contenido de estos elementos no debe tomarse a la ligera, pues son potenciales causantes del ensuciamiento, depósitos y problemas de corrosión de los tubos.

7.2.3. Quemado de combustibles sólidos

Algunos de los combustibles sólidos más utilizados son: carbón, turba, madera, girasol, bagazo, desperdicios, etc. Los combustibles sólidos necesitan mayores tiempos y espacios para que se desarrolle la combustión completamente. Esta es una de las razones principales de la desmedida proporción en el volumen del hogar, para aquellas calderas que queman sólidos, si lo comparamos con aquellas de la misma producción pero para combustibles líquidos o gaseosos.

Existen quemadores especialmente diseñados para quemar carbón finamente pulverizado en suspensión con aire, pero para ello se debe previamente preparar el combustible, pulverizándolo externamente con maquinaria pesada.

En la generalidad de las aplicaciones se queman fragmentos pequeños. Estos se arrojan mediante el uso de esparcidores o cintas transportadoras sobre el piso del hogar (grilla) sobre el cual se produce la combustión. En estos casos se le inyecta aire primario desde la parte inferior del piso y aire secundario a presión desde los laterales del hogar. En este tipo de calderas encontraremos diferentes clases de mecanismos que posibilitan eliminar en forma manual o automáticamente, las cenizas que se depositan sobre la grilla.

Otro método consiste en utilizar hogares ciclónicos, en los cuales se inyectan de forma tangencial los fragmentos de combustible en suspensión con aire, aprovechando de esta forma la característica inherente del movimiento en tirabuzón, lo que retarda el quemado de dicho combustible.

7.3. Aire atmosférico

El oxígeno requerido para la combustión proviene del aire atmosférico que está compuesto por una mezcla de oxígeno, nitrógeno y pequeñas proporciones de dióxido de carbono, vapor de agua, argón y otros gases inertes. Desde el punto de vista de la combustión, el aire seco está compuesto en peso por 23.15 % de oxígeno (O_2) y 76.85 % de nitrógeno (N_2). Como resultado de esto y para proveer a la combustión de 1 Kg de oxígeno, tendremos que suministrar 4.32 Kg de aire seco de los cuales 3.32 Kg corresponden al nitrógeno y gases inertes.

El nitrógeno prácticamente no interviene en la reacción de combustión, pero posee mucho peso respecto a la eficiencia de la caldera. Sucede que parte del calor proveniente de la combustión es utilizado para calentar al nitrógeno, que se escapará por la chimenea a la misma temperatura que el resto de los gases de combustión sin aporte energético alguno. Esto último se traduce en menores temperaturas de llama, si es comparado con las temperaturas de llama que se obtendrían utilizando

oxígeno puro. Se denomina aire teórico a la cantidad de aire a suministrar de manera tal de obtener una combustión perfecta. Cabe mencionar que existe un valor de aire teórico distinto para cada combustible, que dependerá de la composición química del mismo.

7.4. Exceso de aire

La combustión en equipos reales ocurre en tiempo y volúmenes limitados. Si se pretende que la combustión sea completa (combustión perfecta), hemos de tener en cuenta que cada molécula de combustible se combine con su correspondiente de aire. Es obvio que esto no puede realizarse dentro de un equipo térmico real. Pero si a las moléculas de combustible le ofrecemos un excedente en aire, aumentaremos la probabilidad de que se combinen todas las moléculas de dicho combustible. También se hace evidente que este excedente de aire no formará parte de la reacción. A esta cantidad de aire por encima de la teórica se la denomina exceso de aire.

Asimismo este exceso, a pesar de atentar contra el rendimiento de la caldera, es de vital importancia en lo que a seguridad se refiere. Se hace indispensable contar con un aumento de éste durante los períodos transitorios debido a variaciones del estado de carga.

7.5. Exceso de aire vs. monóxido de carbono

De lo expuesto anteriormente parece obvio que se debería limitar al mínimo el exceso de aire, pero al disminuir éste, comenzará a aparecer monóxido de carbono (CO), índice de una combustión incompleta. Además del aspecto contaminante del CO, está la relación con el rendimiento de la combustión, pues el calor liberado por la reacción: $2C + O_2 = 2CO$, representa sólo la tercera parte del que se podría obtener si todo el carbono se hubiese convertido en CO_2 . Pero en la práctica no es técnicamente posible operar un quemador con 0% de CO en los gases de combustión.

Por ejemplo quemando gas natural, los niveles de CO pueden en algunos casos reducirse hasta alrededor de 0.004% en peso,

dependiendo del exceso de aire, de la configuración del quemador y del tamaño del hogar, pero este valor nunca llega a ser cero. Las relaciones pueden resumirse en dos:

1. A menor exceso de aire, mayor producción de CO y viceversa.
2. A mayor volumen de hogar (mayor distancia entre llama y tubos de agua), menor producción de CO y viceversa.

Como se puede apreciar, los requisitos de bajo O_2 (bajo exceso de aire) y bajo CO son objetivos contradictorios. Se puede tener uno o el otro, pero no ambos al mismo tiempo.

7.6. Exceso de aire vs. óxidos de nitrógeno

En la carrera por obtener los máximos rendimientos posibles de una caldera, se han introducido modificaciones en el diseño del hogar y de sus quemadores, de manera tal que trabajaran con excesos de aire muy reducidos, logrando consecuentemente altas temperaturas de llama. Pero a estas temperaturas, el oxígeno excedente se combina con el nitrógeno proveniente del aire y/o del combustible dando lugar a la formación de grandes cantidades de monóxido de nitrógeno (NO).

La oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) a dióxido de nitrógeno (NO_2), sólo representa al 10% del total de NO_X producido y tiene lugar en la atmósfera debido a la influencia de la radiación solar. Ambos son considerados contaminantes ambientales. Las altas temperaturas de los gases cumplen el papel de catalizador de dicha reacción. La formación del NO tiene lugar a altos estados de carga, cuando se presentan dos condiciones simultáneamente: alta temperatura y exceso de aire.

Los métodos de reducción de NO_X se basan fundamentalmente en controlar la combustión de tal manera que estas dos últimas condiciones no se presenten simultáneamente. Existen varios métodos relacionados con la reducción del NO_X , algunos involucran técnicas de quemado en etapas, nuevos diseños de conjunto hogar/ quemadores, aumento en la superficie del hogar, etc.

A continuación mencionaremos dos de los métodos más utilizados:

1. A La formación del NO_X puede reducirse por medio del pasaje de aire secundario al hogar, disminuyendo la temperatura de los gases a la salida del quemador.

Esta solución, obviamente, trae consigo una disminución en el rendimiento de la caldera, debido al calor que se lleva dicha masa de aire secundario.

2. Otra forma de resolver dicho problema consiste en hacer recircular gases de salida de caldera, mezclándolos con el aire a quemadores. Este método desde el punto de vista del rendimiento es notablemente mejor que el anterior, pero involucra mayor costo de equipamiento y control.

7.7. Poder calorífico superior e inferior

La cantidad de calor neto generado producto de una combustión completa para un combustible determinado es constante y se lo denomina poder calorífico. Se lo puede determinar en laboratorio

directamente mediante la medición del calor generado con el auxilio de un calorímetro o estimarlo matemáticamente mediante el análisis químico de la composición de dicho combustible. Está expresada en Kcal/Kg para combustibles sólidos y líquidos o en $Kcal/Nm^3$ para combustibles gaseosos.

Como fuera mencionado anteriormente, como producto de la combustión del compuesto hidrógeno se obtiene calor y vapor de agua. Este vapor de agua contiene un calor latente de vaporización, que se aprovechará sólo si puede ser intercambiado con el proceso antes de evacuarse a la atmósfera. Para esto deberíamos enfriar los productos de la combustión prácticamente hasta la temperatura de condensación del vapor de agua a la presión atmosférica, con el fin de que este vapor se condense, devolviendo de esta forma su carga térmica al proceso.

Al calor de la combustión que libera un determinado combustible que tiene en cuenta al calor latente de vaporización, se lo denomina Poder Calorífico Superior.

En realidad, los productos de la combustión nunca se enfrían hasta la temperatura de condensación del vapor de agua, sino por lo contrario, se procura evitar toda condensación debido a las propiedades corrosivas de la combinación del H_2O , SO_2 y SO_3 productos de los gases de combustión, Estos al combinarse forman ácido sulfúrico (H_2SO_4), que se deposita sobre las superficies de los equipos provocando la corrosión de éstos. A esta temperatura límite de condensación del vapor de agua la llamaremos temperatura de rocío. Al calor de la combustión que libera un determinado combustible que no tiene en cuenta dicho calor latente de vaporización se lo denomina Poder Calorífico Inferior.

8. Eficiencia de una caldera

8.1. Definición de rendimiento de una caldera

Definición de rendimiento de una caldera:

$$\text{Rendimiento Térmico} = \frac{\text{Calor Transf. Agua y vapor}}{\text{Calor útil del combustible}}$$

El calor transferido al agua y al vapor es igual al producto del caudal de vapor generado por la diferencia entre la entalpía del vapor que se genera y la del agua que ingresa.

El calor útil del combustible es igual al producto del poder calorífico inferior por el gasto de combustible.

8.2. Factores principales que influyen en el rendimiento

Existen algunos parámetros indicativos que tienen relación directa con la eficiencia de una caldera: análisis de los gases producto de la combustión y la temperatura de salida de gases de chimenea.

Las pérdidas importantes son:

1. Pérdidas por gases secos. (5 %)
2. Pérdidas por sobrecalentamiento del vapor de agua en los gases. (1 %).
3. Pérdidas por combustión incompleta. (0 %)
4. Pérdidas por convección y radiación. (0.5 %)

Los valores entre paréntesis corresponden a pérdidas en base al poder calorífico inferior, tomados de una caldera acuotubular con

calentador de aire, de 120 T/h, 35 Kg/cm², 400°C, quemando gas natural a máxima carga continua.

8.3. Análisis de los gases de salida de chimenea

Las pérdidas más grandes sin lugar a dudas son las correspondientes a los gases secos que se evacuan por la chimenea. Estos gases aún contienen una importante carga térmica que no ha de ser aprovechada.

8.3.1. Estudio de la composición química de los gases de combustión

La composición que surge del análisis de los gases producto de la combustión se utiliza como indicador para evaluar la eficiencia de la combustión. Por lo general sólo se evalúan aquellos compuestos que intervienen en el cálculo de rendimiento, como ser CO_2 , CO, O_2 , N_2 .

Los porcentajes de CO_2 y CO son parámetros que nos indican si se ha llevado a cabo la totalidad de la combustión; en cambio, los porcentajes de CO_2 y O_2 son indicadores del exceso de aire presente en ésta.

Estaremos en presencia de una combustión óptima cuando se obtenga como resultado del análisis en los gases de combustión, en todo momento y a través de los distintos estados de carga, el mayor porcentaje posible de CO_2 , utilizando el menor exceso de aire (mínimo O_2), y con la aparición

de cantidades despreciables de CO. Esta regla deberá predominar en la calibración de un lazo de combustión.

8.3.2. Medición de CO_2

El CO_2 es representativo del exceso de aire sólo cuando se quema completamente un único combustible cuya relación carbono/ hidrógeno se mantiene constante y en cuyos gases de combustión no exista CO. En otras palabras, el CO_2 medido no es representativo del exceso de aire para las siguientes condiciones:

1. En combustiones de combustibles de composición variable.
2. Cuando se combinan más de un combustible a la vez.
3. Cuando se está cerca de la combustión estequiométrica, motivo por el cual podemos tener mayor presencia de CO de lo normal

8.3.3. Medición de O_2

La medición del O_2 en los gases de combustión, es una indicación directa del exceso de aire. Entre la franja del 0 al 15% de exceso de aire, el % O_2 es independiente del tipo de combustible o de las variaciones en la composición de los mismos.

Sin embargo, esta medición por sí sola no puede inferir:

1. Mezclado deficiente de combustible/aire.
2. Condiciones deficientes en el hogar.
3. Combustión incompleta.

para lograr una combustión eficiente deberá existir en el diseño quemador/hogar condiciones apropiadas que determinen: tiempo de permanencia de los gases en el hogar, la temperatura de llama y por último una turbulencia impartida a la mezcla aire/combustible.

la relación aire/combustible, lejos de mantenerse constante, varía a través de todo el estado de carga según las características inherentes de cada diseño conjunto ventilador/ quemador/hogar. Esta curva característica deberá ser determinada empíricamente mediante el análisis de gases a través de los diferentes estados de carga, para luego ser volcado al caracterizador correspondiente al lazo de control de combustión.

Una vez fijadas las condiciones óptimas de O_2 con mínimo CO, éstas pueden sufrir perturbaciones que seguramente restarán eficiencia a la combustión, como por ejemplo, variaciones en el poder calorífico del combustible, desgaste en las boquillas de los quemadores, cambios en el tamaño de las partículas de los combustibles sólidos, variaciones en los estados de carga, ensuciamiento del quemador/hogar, etc.

Esta caída de eficiencia en la combustión traerá aparejado, en los gases de combustión, un aumento de CO, aún con una presencia considerable de exceso de O_2 . Esto último nos indica que la medición de oxígeno por sí sola no representa la calidad de la combustión, sino que sólo indica cuál ha de ser la relación aire/combustible correcta.

8.3.4. Medición de CO

La medición de CO no es representativa del exceso de aire, pero sí es un excelente índice de la calidad de la combustión. Su medición es índice de:

1. Mezclado deficiente del combustible con el aire.
2. Condiciones deficientes en el hogar: mala turbulencia, bajas temperaturas, incorrecta selección de quemador.
3. Combustión incompleta.
4. Mal funcionamiento del quemador: desgaste u obturación de boquillas, registros rotos, etc.
5. Emisión de humos.

8.3.5. Método de Orsat

El método más utilizado para el análisis de los productos de la combustión es el de (Orsat).

Este método consiste en hacer pasar de forma progresiva un volumen predeterminado de gases de muestreo, por tres diferentes reactivos en solución. Cada uno de ellos posee la particularidad de absorber un solo compuesto: solución alcohólica de potasa para CO_2 , cloruro cúprico en solución amoniaca) para CO y pirogalato sódico para O_2 .

Estos reactivos experimentan un aumento en su volumen que es directamente proporcional al volumen absorbido de dichos productos de combustión, pudiendo leerse directamente en una escala graduada la proporción de cada uno de estos compuestos.

El porcentaje en volumen del N_2 presente en la muestra se infiere por diferencia con los resultados anteriores. La gran desventaja de este método consiste en ser manual y por lo tanto no reflejar los resultados en tiempo real.

Existen instrumentos que en forma automática y en tiempo real nos brindan estos mismos resultados, pudiendo incorporar éstos al lazo de control de combustión.

8.4. Temperatura de salida de gases de chimenea

La temperatura neta de los gases de chimenea resulta de la diferencia entre la temperatura de salida de gases de chimenea y la temperatura ambiente. Una temperatura neta alta de gases indica que se está desaprovechando calor. Una buena práctica recomienda mantener esta temperatura lo mínimo posible sin llegar a la del rocío del vapor de agua. Temperaturas muy altas de gases de chimenea iguales o superiores a 200°C indican una de las siguientes condiciones:

1. Excesivo caudal de aire.
2. Excesivo ensuciamiento de las superficies de calefacción.
3. Deficiente regulación del aire.
4. Sub-dimensionamiento de las superficies de calefacción.
5. Sub-dimensionamiento del volumen del hogar.

8.5. Medición de humos en gases de chimenea

La medición de humos en la chimenea puede utilizarse para estimar la limpieza de la combustión. Productos de combustión con mucho humo pueden indicar alguna de estas condiciones:

1. Deficiencia en el aire de combustión.
2. Deficiencia en la viscosidad del combustible.
3. Deficiencia en las presiones de suministro del combustible.
4. Deficiencia en la pastilla de atomización.
5. Relación incorrecta aire-combustible. O Pérdidas excesivas de aire de combustión.

9. Control e Instrumentación

9.1. Instrumentos de Control de Calderas

Todas las conexiones de tuberías y válvulas sirven para un propósito en la operación y mantenimiento y la mayoría están regidas por la Sección I del código ASME[4] por lo que respecta a tamaño e instalación. El Código requiere como mínimo:

- Manómetro de presión.
- Válvulas de seguridad
- Nivel de agua de vidrio.
- Grifos de nivel.
- Válvula de corte en la línea de vapor.
- Válvulas de corte en la línea de alimentación de agua.
- Válvulas de purga de la caldera.

Adicionalmente al mínimo antes citado, se necesitan además:

- Las bombas de alimentación de caldera y/o inyectores de agua.
- Los cortes de combustible por bajo nivel de agua en las calderas alimentadas automáticamente.
- Los dispositivos de seguridad de la combustión.

Válvula de seguridad: Evita que la presión de la caldera suba por encima del valor de ajuste librando de la presión del vapor excesiva y protegiendo contra los riesgos de la sobrepresión.

Válvula de corte del suministro de vapor: Es la válvula instalada en la salida de vapor de la caldera para cortar el flujo de vapor.

Manómetro de presión de vapor: Indica la presión de vapor en la caldera en libras por pulgada cuadrada o kilogramos por centímetro cuadrado.

Sifón del manómetro de vapor: Dispositivo instalado entre el manómetro de vapor y la caldera para dar un sellado de agua, de modo que el vapor vivo no entre en el manómetro produciendo una falsa lectura o daño al mismo.

Columna de agua: Es el dispositivo en fundición o acero forjado hueco conectado a la parte superior de la cámara de vapor de la caldera y a la parte superior del espacio de agua. El nivel de agua de cristal y los grifos de prueba de agua están instalados en la columna.

Nivel de agua de cristal y conexiones: Sirven para mostrar el nivel de agua en la caldera.

Grifos de prueba del nivel de agua: Sirven para comprobar el nivel de agua en la caldera; cuando debiera estar fuera de servicio temporalmente el nivel de vidrio.

Válvula de drenaje bajo la columna de agua Proporciona un medio para nivelar diariamente bajo la columna de agua y controlar el nivel de agua para mantener limpias la cámara y líneas de modo que el agua se controle y certifique con precisión en el cristal. También proporciona un medio de probar el dispositivo de corte por bajo nivel de agua.

Válvulas de purga de la caldera: Sirven para extraer el agua de la caldera y a su vez remueven los lodos acumulados en el fondo de ésta (purga de fondo). Las purgas tienen un tiempo entre 5 y 15 segundos así como una frecuencia durante el día (entre 4 y 8 horas) dependiendo de las especificaciones del químico encargado del tratamiento del agua de la caldera. Pueden ser de tipo manual o automático.

Bombas de alimentación de agua para la caldera: Dependiendo de la potencia y tipo de caldera se emplean bombas centrífugas de una o varias etapas, controladas manual o automáticamente por los controles de nivel de la caldera, cuando el nivel de agua en ésta es inferior del nivel normal.

Bombas de alimentación de combustible: Son bombas especializadas para el transporte del combustible desde el tanque de almacenamiento hasta el quemador de la caldera. Es necesario instalar filtros de combustible tanto en la succión como en la descarga para evitar taponamientos o averías en las bombas y boquillas del quemador.

Precalentadores de combustible: Su función principal es la de disminuir la viscosidad del combustible líquido para facilitar su atomización en el proceso de combustión. Son empleados generalmente en calderas de Fuel Oil o crudo de castilla. Pueden funcionar con resistencia eléctrica o serpentín de vapor.

Líneas de atomización de combustible: Son empleadas para vaporizar el combustible y dividirlo en partículas más pequeñas para facilitar su combustión. Existen dos formas: Empleando aire comprimido por medio de compresores o utilizando vapor de la caldera.

Ventiladores de tiro inducido: proveen la presión diferencial en el hogar para asegurar el flujo de los gases de la combustión a través de los tubos de la caldera y su salida por la chimenea.

9.1.1. Instrumentos para el Control del nivel.

- Control vertical usando flotante, uno muy conocido (MOBREY).
- Medidor capacitivo.
- Medidor ultrasónico.

9.1.2. Instrumentos para el Control de la llama.

La fotocelda es la encargada de chequear que la llama este presente, si detecta un fallo desconecta la caldera, indicando mediante una señal de alarma lo ocurrido. Esto evita que se acumule en el hogar de la caldera combustible, pudiendo provocar explosiones peligrosas en su interior.

9.1.3. Instrumentos para el Control de la presión.

- Se emplean los presostatos de ajuste fijo.
- Los presostatos de modulación.
- Transmisores de presión.

9.1.4. Instrumentos para el Control de la temperatura.

- Pirómetro de temperatura máxima del fluido térmico
- Pirómetro de temperatura de humos en la chimenea.

- Pirómetros de primera y segunda llama (pirómetro de trabajo)

9.1.5. Dispositivos Adicionales Instalados En Las Calderas

Ciclones: Proporcionan una mayor limpieza a los humos de la combustión que son lanzados a la atmósfera, cumpliendo así con las normas actuales del medio ambiente.

Celda de presión del hogar: Este dispositivo que regula la velocidad del ventilador inducido, se encarga de mantener una presión negativa en el hogar en un rango constante de 3 - 6 mm H₂O por debajo de la presión atmosférica, para garantizar que los gases de la combustión hagan su recorrido en el interior de la caldera y salgan por la chimenea. Sustituye el uso de suiches de presión.

Celda de presión diferencial del nivel de agua: Recibe una señal de alta presión (vapor) y otra de baja (agua). Por medio de vasos comunicantes la diferencia de presiones es traducida por una celda que convierte dicha señal manométrica a señales de corriente (4-20 mA). Esta señal es enviada a un Variador de Velocidad o un PLC que aumenta o reduce la velocidad del motor que maneja la bomba de alimentación de agua de la caldera.

Celda de presión de vapor: Sirve para controlar la velocidad de la parrilla y el ventilador forzado a través de sus variadores de velocidad. Esta celda recibe una señal de presión de vapor de la caldera y la convierte en una señal de 4 - 20 mA. Si la presión es muy baja, acelera la velocidad del ventilador y la parrilla.

Celda de medición de vapor: Es empleada para medir permanentemente el consumo de vapor en la planta. Su principio de funcionamiento es similar a la celda de presión diferencial y se emplea una placa orificio instalada a la salida de vapor de la caldera y un pirómetro en el tablero de conexiones.

Sistemas de modulación: Consiste en un motor modulador de alto torque y bajas revoluciones que por medio de un sistema de palancas, abre o cierra las compuertas que permiten el paso de aire de un ventilador (forzado o inducido). El porcentaje de apertura de dichas compuertas está limitado por un control proporcional instalado en la caldera que constantemente está sensando la presión de ésta.

Purga continua y tanque toma muestras: La purga continua es el mecanismo que permite extraer del agua de la caldera los sedimentos de sales solubles, eliminando así la dureza del agua. El tanque toma muestras se utiliza para obtener en un recipiente cierta cantidad de condensado para su posterior análisis químico.

Dosificador de productos químicos para el agua de caldera: se encarga de suministrar la cantidad adecuada y necesaria de productos químicos al agua que se entrega a la caldera en las condiciones recomendadas de PH, dureza, sólidos disueltos y gases.

Sopladores de hollín: Se encargan de limpiar los tubos de fuego de la caldera utilizando el vapor que genera la misma. Su objetivo principal es la limpieza parcial de los tubos de fuego ayudando a reducir la acumulación de cenizas. Pueden ser de accionamiento manual o automatizado y están ubicados en la parte lateral de la caldera y/o en la parte trasera de la misma.

Tablero de conexiones automatizado: Posee un PLC que se encarga de operar la caldera dependiendo de las señales que recibe y la demanda de vapor de la planta. Cuenta con una terminal de diálogo, donde el operador ingresa parámetros de configuración y a su vez informa los diferentes estados de la caldera mientras ésta funciona (estados de emergencia, soplados, purgas, flujo de vapor, etc.)

9.2. Requerimientos de Control.

La función del sistema de regulación de la caldera es adecuar la producción de vapor a la demanda (carga eléctrica). El vapor requerido debe suministrarse a presión y temperatura constantes y con consumo mínimo de combustible. Cuando varían las condiciones de carga eléctrica, varía la cantidad de vapor y el sistema de regulación debe intervenir para adaptar la rata de quemado de combustible a las nuevas condiciones

La caldera ha de funcionar de manera que se cumplan las siguientes condiciones:

- El flujo de vapor debe suministrarse en forma continua.
- La presión de vapor a la entrada de la turbina debe permanecer constante.
- La temperatura debe ser constante.
- La caldera debe adaptarse rápidamente a las fluctuaciones de carga que se produzcan.

- Desde el punto de vista económico el proceso de combustión debe desarrollarse de manera que, sin dejar de tener en cuenta las exigencias técnicas, el flujo de vapor necesario sea producido con una cantidad de combustible lo más pequeña posible.
- Para la protección y seguridad de la planta el nivel de agua en el tambor y la presión del hogar deben permanecer en sus valores adecuados (por ejemplo, 0.53 cm y -16 mm H₂O respectivamente).

Además de cumplir con las anteriores condiciones de operación, el sistema de regulación debe llenar los siguientes requisitos:

- Exactitud: La regulación ha de ser tan sensible que actúe con pequeñas variaciones. La tolerancia que se admita en la magnitud a controlar no debe ser rebasada ni con carga constante ni con carga oscilante.
- Manejo: El paso del modo manual a automático debe efectuarse de manera sencilla y sin brusquedad. El valor teórico y el valor leído de la magnitud a controlar deben ser mostrados claramente.
- Operación: El sistema debe diseñarse de tal forma que la planta pueda ser operada y conservada en buen estado por personal poco experto.

9.3. Sistema Básico de Control y Regulación

La caldera puede considerarse como un proceso diseñado para producir vapor. El procedimiento para establecer el sistema de control consiste en determinar las variables de control, las magnitudes de ajuste y las entradas de perturbación. Además es de suma importancia determinar las relaciones que existen en las variables de entrada y de salida, tanto en estado estacionario como durante los transitorios.[5]

La caldera tiene cuatro sistemas o losos básicos de control que son:

- Control de combustión.
- Control de nivel.
- Control del tiro.
- Control de temperatura de vapor.

9.3.1. Control de Combustión

Este sistema regula los flujos de combustible y aire para mantener el balance energético. El objetivo principal es suministrar la cantidad de calor necesario para suplir la demanda de vapor. La variable más representativa del balance de entrada y salida de energía es la presión de vapor de la caldera; su variación refleja cambios en casi todas las variables del sistema de control. Por lo tanto, la presión se constituye en la variable controlada y el flujo de combustión la magnitud de ajuste, El flujo de vapor, condicionado a las variaciones de carga, constituye la entrada perturbadora.

El sistema de control debe mantener adicionalmente, una relación aire/combustión específica para, que la combustión se realice en forma óptima. Una insuficiencia de aire dará por resultado que el combustible suministrado no se quemara completamente; demasiado aire ocasiona pérdidas de calor que se fugan con los gases de escape que son liberados a la atmósfera demasiado caliente. Un exceso de aire requiere también mayor consumo de potencia en los ventiladores. Ambas situaciones son perjudiciales y ocasionan una baja en la eficiencia de la planta. Para obtener la relación aire/combustible adecuada se determina el aire teórico requerido para que exista combustión completa, y según las características del carbón se adiciona un exceso de aire que garantice una combustión óptima.

La planta se opera generalmente con un exceso de aire del 30 % del aire teórico. La variable de control está representada por el exceso de aire que se determina midiendo el porcentaje de oxígeno contenido en los gases de escape.

9.3.2. Control de Nivel

El sistema de control de nivel regula el agua de alimentación para mantener el nivel de agua en el tambor en los límites permisibles, y al mismo tiempo suministrar la cantidad de agua necesaria para producir el vapor demandado por la turbina.

Para mantener el nivel constante el flujo de agua debe ser igual al flujo de vapor producido por la caldera. Es muy importante que el nivel de agua permanezca dentro de un rango adecuado. Si el nivel es muy bajo, el tambor y los tubos evaporadores se recalientan y se dañan. Si el nivel es muy alto, al agua o partículas que floten en el tambor llegan hasta los sobre calentadores y la turbina produciendo un choque térmico y una fuerte erosión en los álabes de la turbina.

La variable controlada la constituye el nivel; la magnitud de ajuste, el agua de alimentación y la entrada de disturbio, el flujo de vapor.

9.3.3. Control del Tiro

El tiro se refiere a la presión que existe en el hogar de la caldera, más específicamente, en la zona de combustión. La depresión producida por el ventilador de tiro inducido (IDF) y la presión del ventilador de tiro forzado (FDF) tienen que estar ajustados entre sí, tal que, en los tiros de la caldera exista una determinada distribución de presión. Una distribución aceptada es mantener una depresión de varios mm de agua (-16 mm Ag) a través del tercio superior del hogar. Esta depresión impide la salida de la llama por las paredes laterales y mantiene la misma en el centro del hogar.

9.3.4. Control de la Temperatura del Vapor

Existen calderas cuya producción es vapor saturado, de tal forma que la temperatura del vapor viene marcada por la presión de operación, pues son variables directamente relacionadas. También existen calderas en las que el vapor es sobrecalentado de forma ligera para su mejor conducción o consumo, pero que se dimensionan de forma que las modificaciones en la temperatura del vapor no sean importantes de cara al consumidor. Sin embargo, hay gran cantidad de calderas en las que el vapor generado ha de estar a una cierta temperatura, que asegure el correcto funcionamiento de sus consumidores. En estos casos, en los que normalmente el grado de sobrecalentamiento es mayor, la imposibilidad de diseñar la caldera para que en todas las cargas requeridas produzca el vapor a la temperatura deseada, obliga a controlar ésta de forma que se mantenga dentro de los márgenes de operación deseados.[6]

9.4. Lazos de control básicos para calderas

La simbología a utilizar será ISA-S5.1-84. [7] en la cual se definirán los diversos lazos de control, seguridad y encendido. Ver figura 4.

9.4.1. Sistema de seguridad y encendido (S.S.E.)

Así como el sistema de control regulatorio se define como un sistema modulante que acomoda sus señales de salida de manera tal de mantener las variables a controlar dentro de estrechos márgenes, lo contrario sucede con el sistema de seguridad y encendido de una caldera que consta esencialmente de un sistema ON-OFF que permite mantener la caldera en servicio, sin importar su estado de carga, sólo si todas las condiciones que tengan que ver con su seguridad sean correctas.

El S.S.E., en presencia de una condición insegura, inicia una parada, que en todos los casos

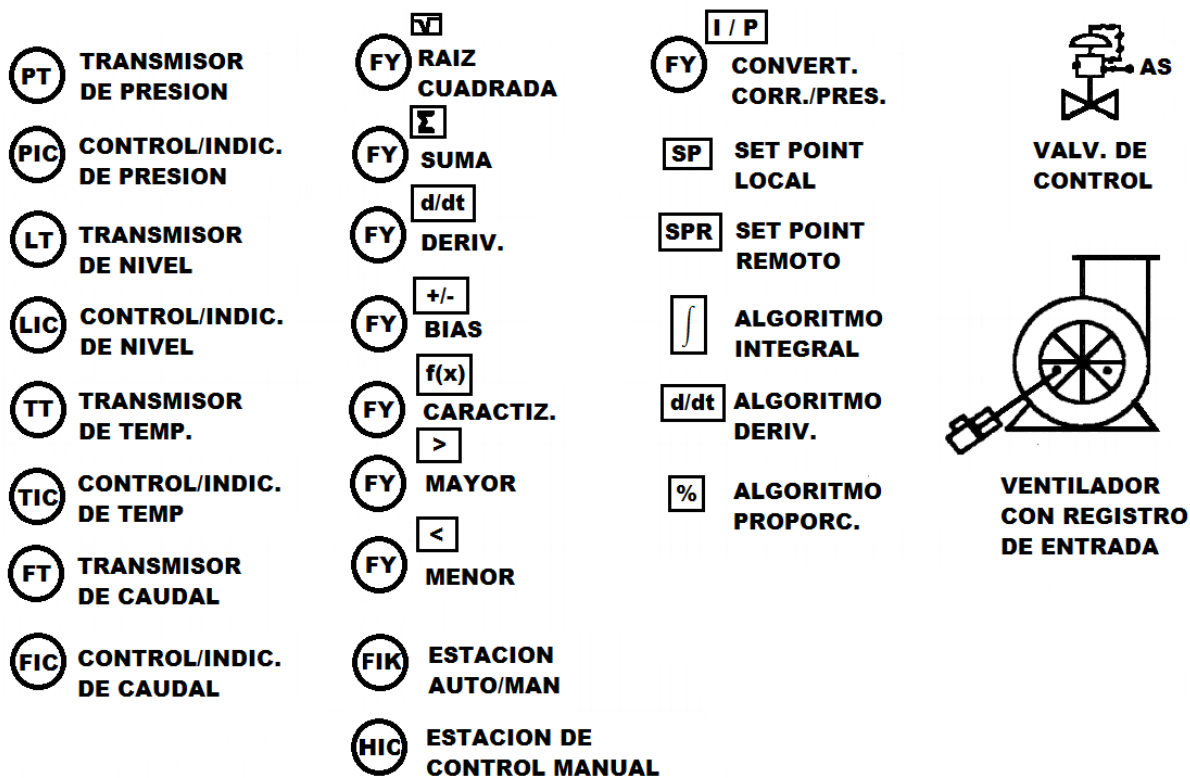


Figura 4: Resumen de la simbología ISA.

significa el corte de combustible, ya sea parcial por quemador, sectorizada por colector de combustible o total por emergencia. Este sistema también es el responsable de llevar a cabo todas las verificaciones necesarias durante el momento de la puesta en marcha como así también durante la parada.

Estas metas son llevadas por un programador ya sea mediante el uso de programadores mecánicos, lógica a reté o mediante el uso de programadores lógicos de control (PLC). Cualquiera sea la tecnología a utilizar, ésta deberá ser concebida de manera tal que en él no exista un único punto de falla que no permita, ante un estado de emergencia, llevar a la caldera a una condición segura.

Esta condición es fundamental y no sólo depende del elemento programador, sino de todo el conjunto. Esto involucra sensores, válvulas de corte de combustible, detectores de llama e instalación mecánica y eléctrica.

9.4.2. Lazos de control de nivel de domo

Estos pueden ser de:

1. **Un elemento:** Medición de nivel de domo.

Se utiliza en calderas pequeñas o en procesos que no contemplen variaciones importantes de carga y presiones constantes en colector agua alimentación. Está diseñado para mantener el nivel correcto en todo momento. No compensa los efectos del falso nivel, variaciones bruscas en la demanda y variaciones de presión a través de la válvula de control, esto último debido tanto a variaciones de presión en el domo, como del colector de agua de alimentación. Ver figura 5.

2. **Dos elementos:** Medición de nivel de domo y caudal de vapor.

Se utiliza en calderas pequeñas y grandes, procesos que contemplen variaciones importantes de carga pero no contempla variaciones de presión en colector agua alimentación. Está diseñado para mantener el nivel correcto en todo momento. Compensa los efectos del falso nivel y las variaciones bruscas en la demanda pero no así las variaciones de presión a través de la válvula de control. Ver figura 5.

3. **Tres elementos:** Medición de nivel de domo, caudal de vapor y de agua.

Es uno de los sistemas de control de nivel más completos. Se utiliza en calderas pequeñas y grandes, procesos que contemplen variaciones importantes de carga y variaciones de presión en colector agua alimentación. Está diseñado para mantener el nivel correcto en todo momento. Compensa los efectos del falso nivel, las variaciones bruscas en la demanda y las variaciones de presión a través de la válvula de control. Ver figura 5.

Para la correcta calibración del transmisor de presión diferencial se deberá tener en cuenta los siguientes factores:

1. El domo contiene una mezcla compuesta de dos fases, agua y vapor en sus estados de saturación.
2. La densidad del agua y del vapor varían considerablemente con la temperatura de saturación o la presión.

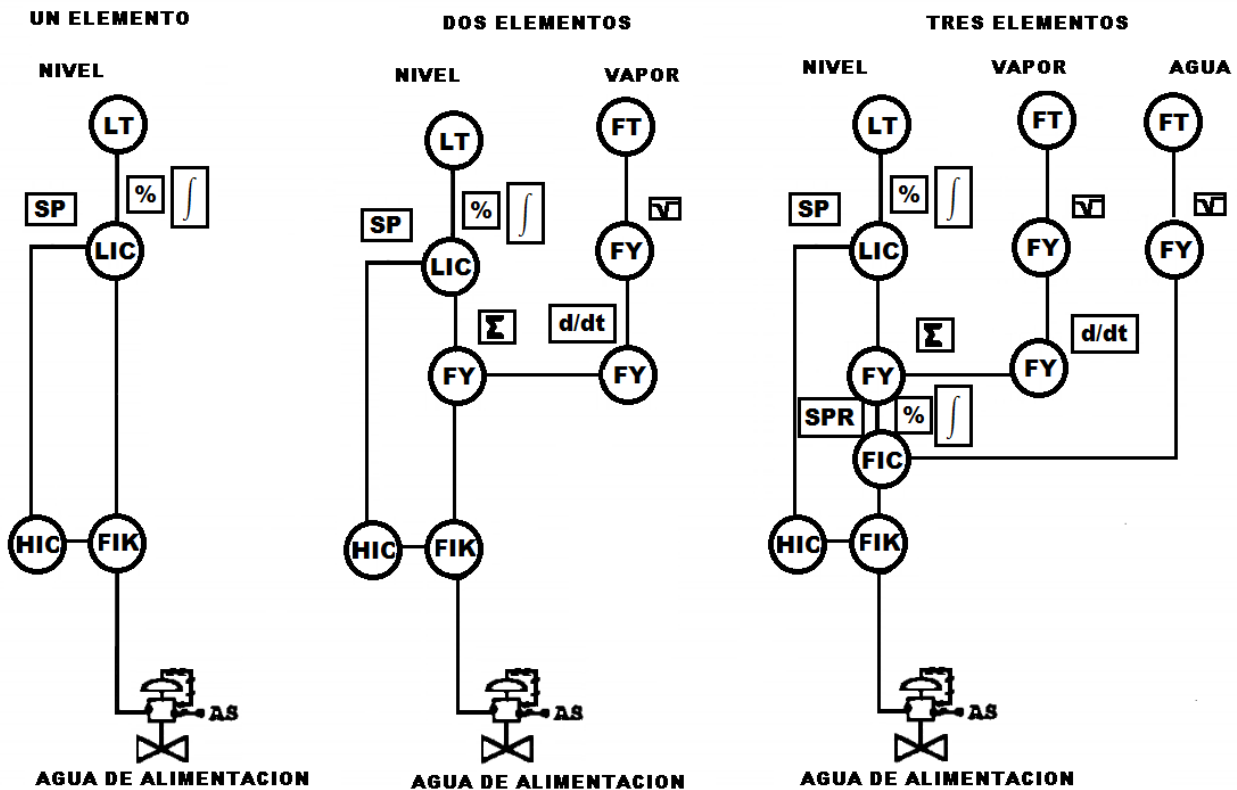


Figura 5: Lazos de control de nivel de domo.

3. Cuando las presiones son altas ($>60 \text{ Kg/cm}^2$), el peso del vapor por sobre el agua no debe ignorarse.

Para el cálculo de la densidad del agua perteneciente a la pierna de referencia, ésta se estimará con una temperatura de aproximadamente 35°C , pero a la presión del domo. Se deberá contar con los medios para asegurar que la temperatura no varíe considerablemente. Ver figura 6.

Notese que la salida del instrumento de presión diferencial es máxima cuando el nivel equivale a **hmin** y mínima cuando es igual a **hmax**. Con el fin de no perderla visión de la realidad, se hace necesario implementar una supresión de cero. Esto implica asignar al **hmin** el 0% de la señal de salida, de manera que un aumento de nivel corresponda a un aumento en la señal del instrumento. De esta forma el valor correspondiente a la supresión de cero equivaldrá al valor de **hmin**.

La medición del nivel del domo con transmisores de presión diferencial tiende a ser bastante ruidosa. Esto se debe a las grandes masas que circulan dentro del mismo y que generan turbulencia. Se deberá tener extremo cuidado con la selección del valor del rango **hmax - hmin**. Un rango muy

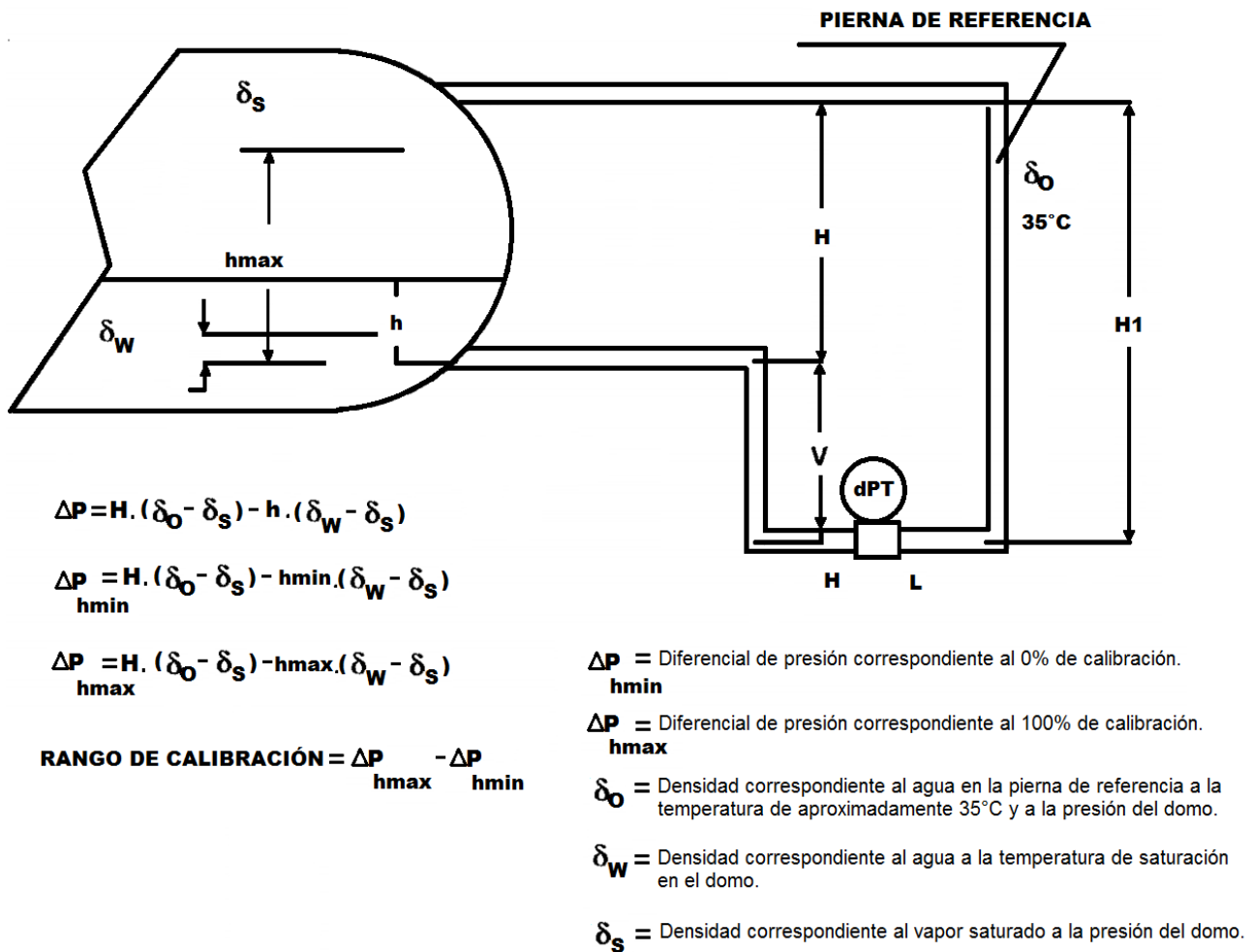


Figura 6: Cálculo de la densidad del agua.

pequeño arroja mediciones muy ruidosas que tienden a deteriorar la precisión y la estabilidad del control. El rango **hmax - hmin** más comúnmente utilizado es de aproximadamente 750mm. Valores mayores son aceptables, pero menores a éste deberán ser evitados.

Para la correcta selección del transmisor se deberá tener en cuenta si éste soporta la presión estática y si es capaz de aceptar la supresión de cero y el valor del rango de calibración. La medición de nivel de domo con transmisores de presión diferencial, representa la medición de diferencias prácticamente despreciables de presión estática, comparado con la presión reinante dentro del domo.

Existen comúnmente grandes fuentes de error que pueden ser eliminadas si la instalación es la correcta, por ejemplo:

1. El valor de presión estática, empleado para los cálculos, debe coincidir con la que está presente en el domo. Si ésta varía mucho, se deberá implementar una compensación por presión de domo.
2. Deberá ser eliminado de las líneas de los instrumentos todo contenido de aire o gases mediante el purgado de éstos.
3. La correcta localización de las tomas de nivel es un factor crítico. Estas generalmente obedecen satisfactoriamente a estándares de diseño de los fabricantes de generadores de vapor. El no cumplimiento, desviación o modificación de la ubicación de éstas, puede causar grandes errores de medición debido a los efectos de succión y presión dinámica creados por los patrones de flujo presentes en gran parte del domo.
4. La distancia de recorrido de cañería entre el domo y el transmisor debe ser cuidadosamente estudiada, particularmente cuando ésta es muy larga. La línea que se dirige a la pierna de referencia, como así también la que se dirige a la toma de alta, deberán mantenerse a las mismas temperaturas. Se deberá evitar que alguna de ellas pase cerca de fuentes indeseables de calor, evitando de esta manera corrimientos en la medición debido a variaciones en la densidad de una línea respecto a la otra. Se deberá implementar un calentamiento a vapor o eléctrico de estas líneas en aquellas instalaciones donde la temperatura ambiente puede llegar a valores bajo cero.

En la Figura 7.A podemos observar un esquema de control de nivel de domo de un elemento. Este tipo de control se utiliza generalmente en unidades pequeñas. Sus resultados son satisfactorios en aquellas instalaciones que no poseen grandes variaciones en la demanda. En este tipo de controlador de acción proporcional, el ruido proveniente de la medición debe filtrarse, de manera que puedan utilizarse ganancias altas (banda proporcional baja). Las constantes de tiempo utilizadas para estos filtros rondan en el orden de 1 a 2 segundos, ya que la constante de la propia medición está en el orden de 1/2 segundo o más.

En aquellas instalaciones donde las variaciones en la demanda son frecuentes y/o rápidas, se deberá incorporar al lazo de control un elemento llamado (Feedforward), que significa anticiparse a la acción. Esta implementación puede realizarse en la configuración de dos o tres elementos. Desde el punto de vista de la performance de control, el utilizar dos o tres elementos depende de la característica del elemento final de la operación.

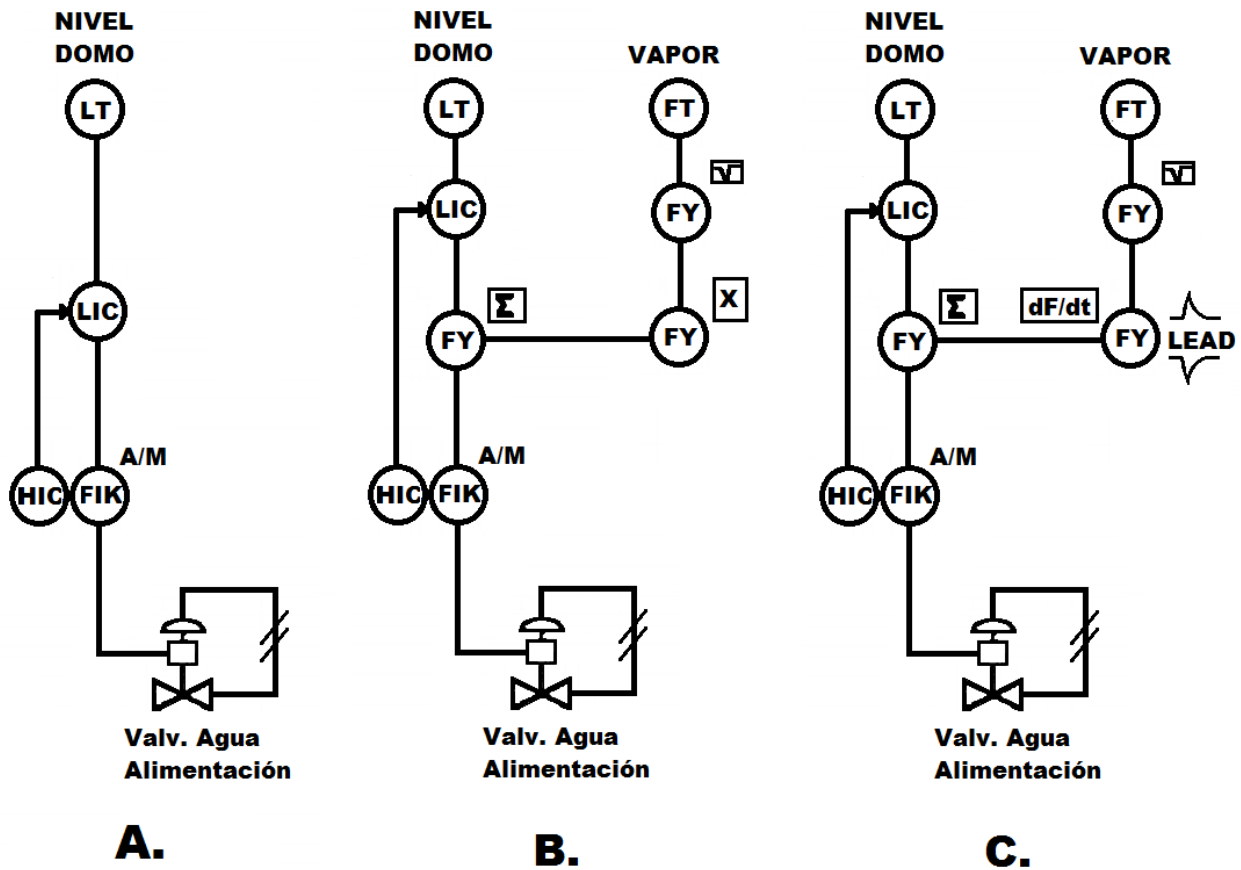


Figura 7: Lazos de Control de Nivel.

En la Figura 7.B puede verse un esquema de control de nivel de dos elementos. El caudal de vapor es utilizado como indicador de demanda en la configuración feedforward, la que actúa directamente sobre el elemento final de control. Esta configuración asume que existe repetitibilidad y una relación lineal entre el caudal de vapor y la señal correspondiente a la demanda del sistema de regulación de agua y por ende al caudal de agua. SI esta relación es cierta, el agregado de un tercer elemento no aporta ninguna ganancia. Existen varios tipos de sistemas de regulación de agua de alimentación que se utilizan normalmente. Una válvula de control es generalmente lo más utilizado en unidades pequeñas y medianas.

La característica de la válvula de control correctamente seleccionada presenta una relación razonablemente lineal. Como la caída de presión a través de la válvula de control generalmente disminuye a medida que la carga de la caldera aumenta, una válvula con una característica lineal

presenta un comportamiento instalado no lineal. Es común utilizar una válvula con una característica de igual porcentaje, la que exhibirá un comportamiento instalado prácticamente lineal.

Una configuración alternativa al lazo de dos elementos se muestra en la Figura 7.C. En este esquema, la influencia feedforward se aplica a través de una unidad de función derivativa. Si no se producen variaciones en la demanda, esta señal no afectará al elemento final de control, siendo éste comandado únicamente por el controlador de nivel. Pero cuando se produce, por ejemplo, un aumento en la demanda, esta unidad derivativa implementará una acción correctiva, aumentando rápidamente la señal al elemento final de control. A medida que la demanda se estabilice en un nuevo valor, esta unidad disminuirá lentamente su acción correctiva hasta llegar a cero, actuando a partir de ahí solamente el controlador de nivel.

Esta forma operativa es similar a lo implementado manualmente por un operador de caldera. En unidades medianas a grandes se utilizan sistemas basados en la regulación de la velocidad de la bomba de alimentación sin el uso de válvula de control. Estos sistemas de regulación presentan una relación no lineal entre la velocidad de la bomba y el caudal de agua.

Otro factor importante son los problemas relacionados con la no repetitibilidad en la relación posición del elemento final de control y el caudal de agua. El motivo más frecuente de esta no repetitibilidad se presenta cuando existe un único colector de agua que alimenta a varias calderas. Las variaciones de demanda de cada una de las calderas generan variaciones de presión en este colector, que a su vez genera variaciones de caudal para una misma posición del elemento final de control. En suma, para estos dos últimos casos no es adecuado un esquema de control de dos elementos sino de tres.

Mediante el agregado de un tercer elemento, la medición del caudal de agua de alimentación, se pueden solucionar las dificultades en el control provocadas por la no repetitibilidad y no linealidad. Puesto que la constante de tiempo de la medición de agua es relativamente rápida, se puede implementar un controlador con acción Proporcional + Integral. El modo proporcional se sintoniza a fin de obtener estabilidad en la región de máxima ganancia del proceso, mientras el modo integral provee reposición rápida en regiones donde la ganancia del proceso es baja.

Existen varios tipos de esquemas de tres elementos. En la Figura 8, el vapor y el agua son continuamente comparados y la señal correctiva, correspondiente a la diferencia de éstos, se suma a la señal proveniente del nivel de domo. La señal resultante ingresa como setpoint remoto al controlador de nivel Proporcional + Integral. El controlador de nivel interpreta un cambio en el caudal de agua o en el de vapor, como una variación de nivel y actúa como tal a fin de eliminar la

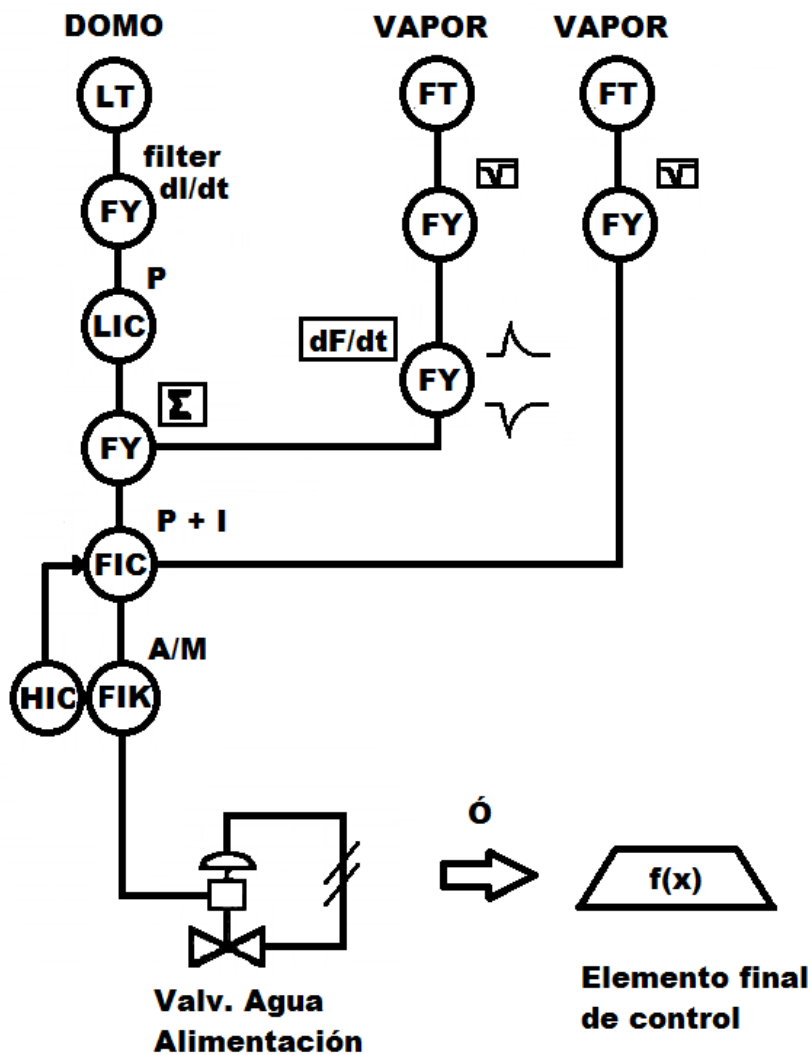


Figura 9: Esquema Con Dos Controles.

En la figura 9 podemos ver un esquema con dos controladores. Este lazo es uno de los más comúnmente utilizados en las calderas del tipo industrial, Aquí el caudal de vapor induce un efecto anticipatorio, (feedforward), como setpoint remoto al controlador de agua. El controlador de nivel posee acción solamente Proporcional.

Este sistema proporcionará un control satisfactorio en aquellas unidades que posean domos relativamente grandes en relación a su producción, tal es caso de unidades de baja presión. Los comentarios de este sistema son:

El controlador de agua es sintonizado para responder a una dinámica relativamente rápida, mientras el controlador de nivel se sintoniza para una respuesta más lenta. El caudal de vapor es comparado con el de agua.

Cuando ambos caudales son iguales, la salida de este comparador se encuentra a media escala. Cualquier modificación en el caudal de vapor es inmediatamente sentido por el controlador de agua, como una discrepancia en la relación actual de caudales. Este controlador efectuará la corrección necesaria a fin de restablecer dicha relación. La señal de salida del controlador de nivel ingresa como setpoint remoto al controlador de agua. Puesto que el controlador de nivel posee acción Proporcional + Integral, el nivel de domo se mantendrá, durante carga estable, en su valor deseado independientemente del estado de la relación entre los caudales de vapor y agua. En este lazo se debe prevenir el efecto de la realimentación positiva (Windup) del controlador de nivel que se presenta cuando el lazo se pasa a manual.

En resumen, este lazo contempla las siguientes ventajas:

1. Compensa las no linealidades del elemento final de control.
2. Al disponer de dos controladores separados, nivel y caudal de agua, ofrece una excelente dinámica de respuesta.
3. Durante los estados de carga constante, no existe corrimiento de nivel debido a los desbalances de caudal de vapor y de agua.

9.4.3. Lazos de control de combustión

La función de estos lazos es la de mantener un correcto balance energético, según sea requerido por la demanda de carga del consumo energético. Esto se traduce en mantener la presión en el colector de vapor lo más cercano al valor deseado.

Estos lazos pueden ser:

1. **Posicionales o Paralelos sin medición:** Sólo medición de presión de vapor.

Se utilizan en calderas pequeñas de un solo quemador, sin medición de aire o combustibles. Su ventaja fundamental es su bajo costo y su buena respuesta ante las variaciones de carga. La relación aire/combustible es fija para un estado de carga determinado y por lo tanto no es precisa. Esta relación se ve afectada por variaciones de presión y temperatura en el colector de combustible y por las variaciones de presión en el hogar como así también atmosféricas y

por lo tanto éstas afectarán a la presión de vapor. Los cambios de carga pueden dar como resultado mezclas ricas; en consecuencia, no se puede garantizar la seguridad durante los transitorios. Ver figura 11.

2. **Paralelos con medición y límites cruzados:** Medición de presión de vapor, caudal de combustible y aire.

Se utiliza en calderas pequeñas y grandes con uno o más quemadores. La respuesta ante variaciones en la demanda no es tan rápida como en el sistema paralelo sin medición. Se puede caracterizar la relación aire/combustible a través de todo el estado de carga, por lo tanto esta relación se mantiene precisa en todo momento. Esta relación no se ve afectada por variaciones en la presión y temperatura en el colector de combustible, por las variaciones de presión en el hogar o las atmosféricas y por lo tanto éstas no afectarán a la presión de vapor. Los cambios de carga nunca dan como resultado mezclas ricas, pues durante los transitorios el combustible sigue al aire y en consecuencia se puede garantizarla seguridad en todo momento. Si por algún motivo, ajeno al lazo de control, disminuye el caudal de aire, el combustible lo seguirá reforzando la seguridad del sistema. Ver figura 11.

Los lazos de control de combustión deben cumplir las siguientes funciones:

1. **Mantener el suministro energético (combustibles)** según lo demande el sistema de control de balance energético.

2. **Mantener la correcta relación combustible/aire.**

Esta relación debe mantenerse en valores definidos por la eficiencia de la unidad, asegurando de minimizar la producción de contaminantes. Generalmente esta relación, lejos de mantenerse constante, varía a través de todo el estado de carga de la caldera, siendo necesario caracterizar el sistema de control con una curva que se ajuste a cada caldera en particular. Esto último se realiza empíricamente por medio de ensayos durante la puesta en marcha de la unidad.

3. **Mantener las condiciones de seguridad dentro del hogar.**

Durante el arranque, carga continua, transitorios y paradas, las condiciones del hogar deben ser controladas a fin de prevenir la posibilidad de acumulación de mezcla rica de combustible en alguna zona dentro de la unidad. Un sistema de seguridad y encendido trabajando en con-

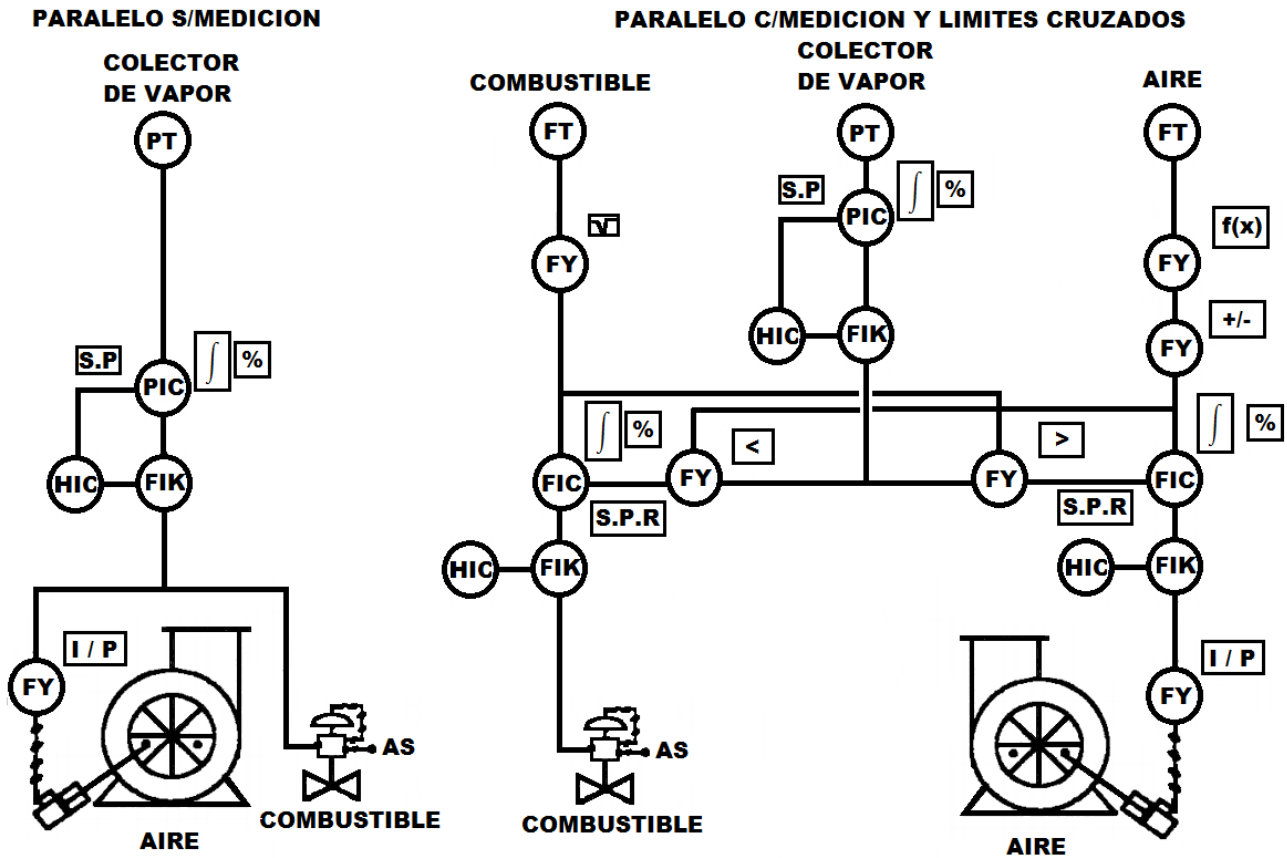


Figura 11: Lazos de control de combustión.

junción con el lazo de control de combustión, deberá asegurar en todo momento la seguridad operativa que exige este tipo de instalación.

4. Mantener la presión de hogar en unidades de tiro balanceado.

En pequeñas instalaciones o en unidades que queman combustibles que no pueden ser medidos, se utiliza para el control de la combustión un sistema llamado positioning system, Ver figura 12. En este sistema ni el combustible, ni el aire son medidos, por lo tanto la relación aire/combustible se fija mediante una relación existente entre sus elementos finales, la que se define empíricamente durante la calibración inicial.

La señal proveniente del lazo de control de balance energético directamente posiciona la válvula de combustible y el damper de aire. Se deberá caracterizar, empíricamente, el actuador de aire de manera tal de lograr que el comportamiento de éste garantice una relación aire/combustible

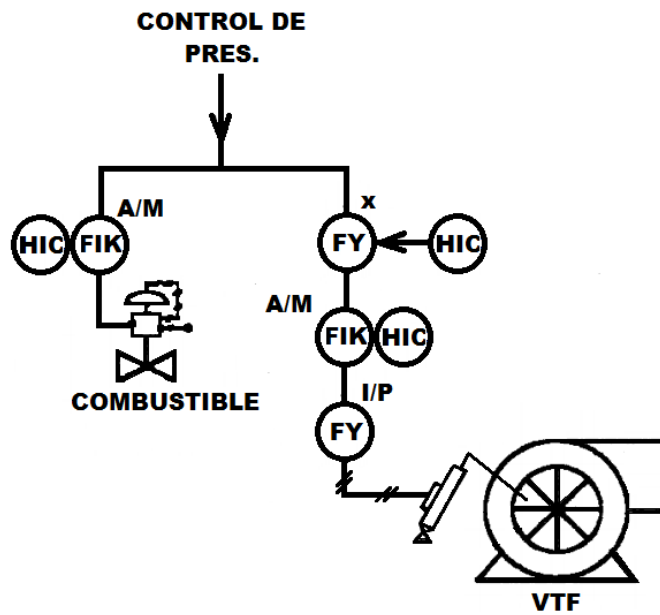


Figura 12: Control de la Combustión Mediante (Positioning System).

adecuada a través de todo el rango de regulación.

Se prevé una estación de ajuste manual que permita realizar ajustes finos de la relación aire/combustible.

Este lazo presenta cuatro ventajas y tres desventajas:

Ventajas:

1. Es un sistema sencillo, fácil de implementar y confiable.
2. Posee una respuesta prácticamente instantánea.
3. La relación de control de carga máximo respecto al mínimo es grande y prácticamente limitada por los elementos finales de control y/o los equipos de combustión.
4. Su implementación es económica.

Desventajas

1. Las relaciones aire/combustible no son precisas, ya que no se está midiendo nada. Es insensible a las variaciones de las características que afectan al aire o al combustible, por ejemplo variaciones en la temperatura, presión del combustible, cambios en las condiciones atmosféricas,

etc. Si estas condiciones no se mantienen constantes terminarán por afectar significativamente la relación aire/combustible.

2. Este sistema no puede ser aplicado a una caldera con quemadores múltiples. La salida de servicio de un quemador haría que cambien las condiciones de contrapresión en la válvula de combustible, variando significativamente el caudal de combustible y consecuentemente la relación aire/combustible.
3. Durante las variaciones en la demanda, este sistema puede producir mezclas ricas en combustible y potencialmente explosivas.

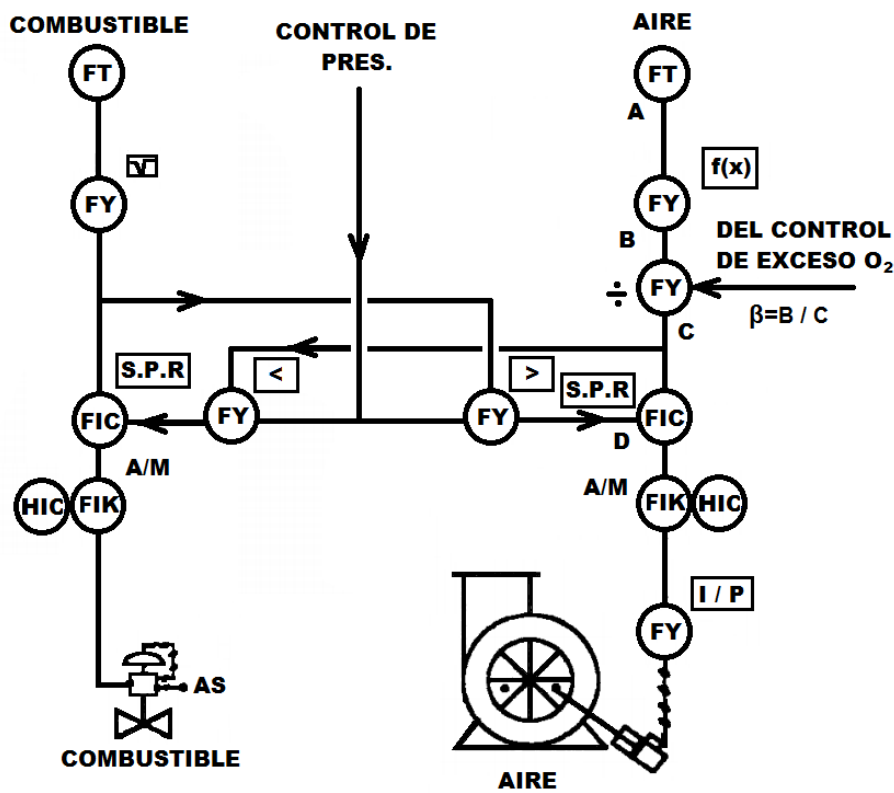


Figura 13: Control de la Combustión Mediante (full parallel lead-lag metering system).

Una manera de salvar todas estas desventajas, es mediante el uso de los sistemas denominados de Full parallel lead-lag metering systems, Ver figura 13. Aquí son medidos aire y combustibles, efectuándose un ajuste fino del aire en función del análisis de oxígeno contenido en los gases de combustión. Todos los ajustes que efectuará este lazo, lo hará en base a estas mediciones. En este

sistema, la señal proveniente del control del balance energético es aplicado, en paralelo, como valor deseado remoto, a dos controladores esclavos totalmente independientes entre sí:

uno de aire y otro de combustible. Este lazo provee a través de todo el rango de control de la caldera, un control preciso, estable y seguro del suministro de energía y de la relación aire/combustible.

Analicemos en detalle el comportamiento de este lazo ante tres diferentes comportamientos de la demanda energética:

1. Demanda energética estable

Los controladores de aire y combustible que proporcionan acciones Proporcional + Integral, continuamente actúan sobre los elementos finales de control de manera de satisfacer el valor deseado remoto fijado por el sistema de control del balance energético. Por lo tanto, la demanda energética, setpoint de aire, medición de aire, setpoint de combustible y medición de combustible son iguales. Los dos lazos están en paralelo. Este lazo compensará por variaciones en la presión, temperatura de combustibles, cambios en las condiciones atmosféricas, etc.

2. Aumento de la demanda energética

Se produce un aumento de la señal proveniente del control del balance energético. El selector de baja rechazará esta señal creciente, aceptando sólo la medición de aire. La demanda de combustible (setpoint remoto) se mantiene en el mismo valor e igual al de la medición de aire. Al mismo tiempo el selector de alta rechaza la medición de combustible y acepta la señal creciente. La demanda de aire (setpoint remoto) toma el mismo valor de la demanda energética. Esto lleva a un aumento, primero en el caudal de aire y lo sigue el caudal de combustible, COMBUSTIBLE SIGUE AL AIRE.

3. Disminución de la demanda energética

Se produce una disminución de la señal proveniente del control del balance energético. El selector de baja aceptará esta señal decreciente y rechazará la medición de aire. La demanda de combustible (setpoint remoto) toma el mismo valor de la señal de demanda. Al mismo tiempo el selector de alta rechaza la señal de demanda energética y acepta la medición de combustible. La demanda de aire (setpoint remoto) se mantiene en el mismo valor e igual al de medición de combustible. Esto lleva a una disminución, primero en el caudal de combustible y lo sigue el caudal de aire, AIRE SIGUE AL COMBUSTIBLE.

De este análisis se pueden enunciar las siguientes ventajas:

- Durante un aumento en la demanda, el combustible no puede ser aumentado hasta tanto no se sence un aumento real de aire. Esto garantiza las condiciones de seguridad dentro del hogar al no permitir la aparición de mezclas ricas en combustible. o Durante una disminución en la demanda energética, el aire no puede ser disminuido hasta tanto no se sence una disminución real de combustible. Esto nuevamente garantizará las condiciones de seguridad en el hogar.
- Ante una eventual disminución en el caudal de aire, este sistema llevará al combustible a un valor equivalente a la disminución producida por el aire. Esto nuevamente garantiza las condiciones de seguridad en el hogar.
- Ante un eventual aumento en el caudal de combustible, este sistema llevará al aire a un valor equivalente al aumento producido por el combustible. Esto nuevamente garantiza las condiciones de seguridad en el hogar.

En la gran mayoría de las aplicaciones que involucran la medición de caudal de aire, éste se infiere a través de la caída de presión a través de algún componente de la caldera, por ejemplo caja de quemadores, haz convectivo, calentador de aire, etc.

Al no ser elementos primarios de medición diseñados a tal fin, la relación de la caída de presión con el caudal volumétrico no obedece a una función cuadrática, como en el caso de una placa orificio, un anubar, pitot, venturi, alerón, etc.

Esta relación caída de presión vs. caudal volumétrico deberá **caracterizarse** durante la puesta en marcha. Esto se realiza mediante el ensayo de por lo menos 9 estados de carga diferentes, que parten desde el 20 % con intervalos de 10 %. Se deberá contar con un analizados de gases de combustión, por ejemplo analizados de Orsat.

A continuación describiremos de qué forma se lleva a cabo esta caracterización, ver Figura 13. Ante todo deberemos llevar la caldera a máxima carga continua, a fin de recalibrar el transmisor de aire para que su salida esté cercana al 100 %. El sentido de esto es aprovechar al máximo el rango del instrumento, asegurando le máxima apreciación posible a bajos estados de carga. En cada punto se deberá lograr las máximas condiciones de eficiencia, estabilidad y condiciones correctas de combustión. Estas están definidas por: máximo porcentaje de dióxido de carbono, mínimo contenido de oxígeno y cantidades despreciables de monóxido de carbono.

El caracterizador inicialmente llevará a una relación lineal $A=B$. Con el lazo de control de oxígeno en manual, se irá ingresando las diferentes señales de corrección, $\beta=B/C$, a través de la

función división, a fin de lograr para cada punto las máximas condiciones de eficiencia de combustión. Denominamos «A», «B» al valor de las señales antes y después del caracterizador, «C» al valor de la señal después de la función división y «D» al valor de la señal correspondiente al setpoint remoto del controlador de aire.

Si por ejemplo para un determinado estado de carga se detectara un alto contenido de oxígeno, se deberá jugar con la corrección de oxígeno hasta lograr las condiciones de máxima eficiencia. Cuando se logre esto, se deberá registrar los valores de «B», «C» y «D» y la correspondiente caída de presión. Como $A=B$ y debido a la condición de estabilidad $C=D$, determinamos que $\beta=B/D$ y por lo tanto A y $B=\beta \times D$ serán los dos pares de puntos correspondientes a aquel estado de carga que introduciremos al caracterizador al finalizar los ensayos.

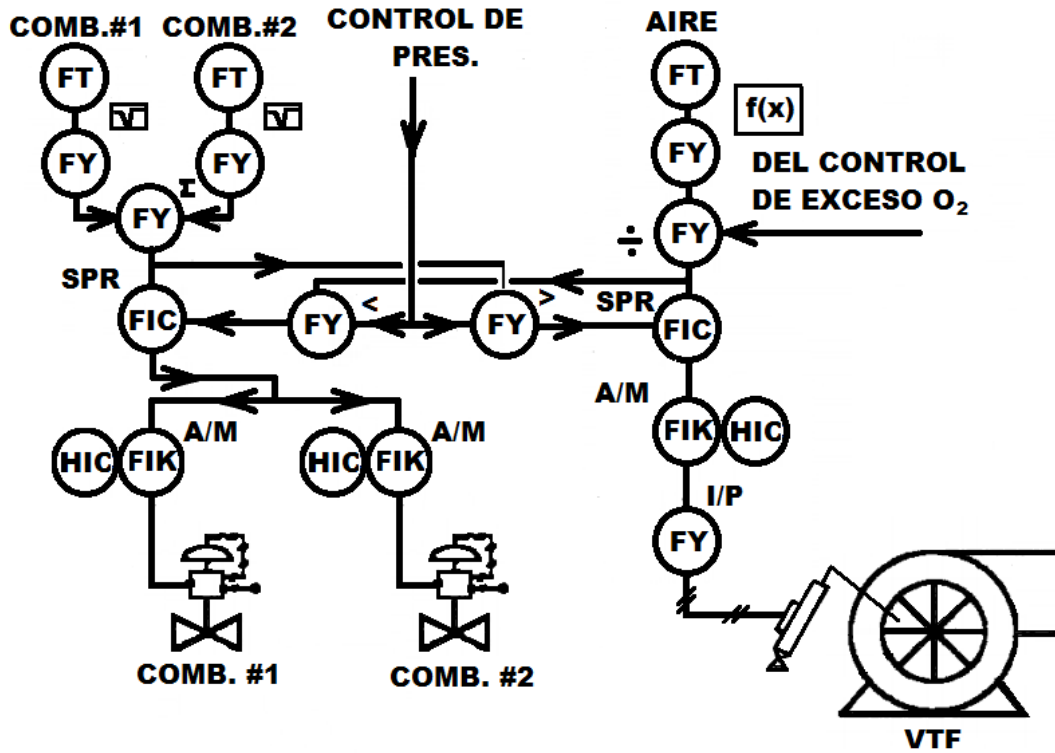


Figura 14: Calibración de la Relación de Caudal de Combustibles.

Cuando se requiere quemar más de un combustible al mismo tiempo, toda suma, resta o cálculos que afectan a éstos, deberán realizarse sobre una base energética en Kcal. Esto puede realizarse conociendo de antemano el poder calorífico de cada uno de los combustibles, de manera tal de realizar una correcta calibración que contemple las relaciones de caudal de combustibles entre sí.

La Figura 14 representa una aproximación sencilla y económica. Este sistema puede ser utilizado en todos los casos donde cualquiera de los dos combustibles puede quemarse con todas las combinaciones posibles:

- comb. ≠ 1 en automático / comb. ≠ 2 en automático.
- comb. ≠ 1 en manual / comb. ≠ 2 en automático.
- comb. ≠ 1 en automático / comb. ≠ 2 en manual.
- comb. ≠ 1 en manual / comb. ≠ 2 en manual.

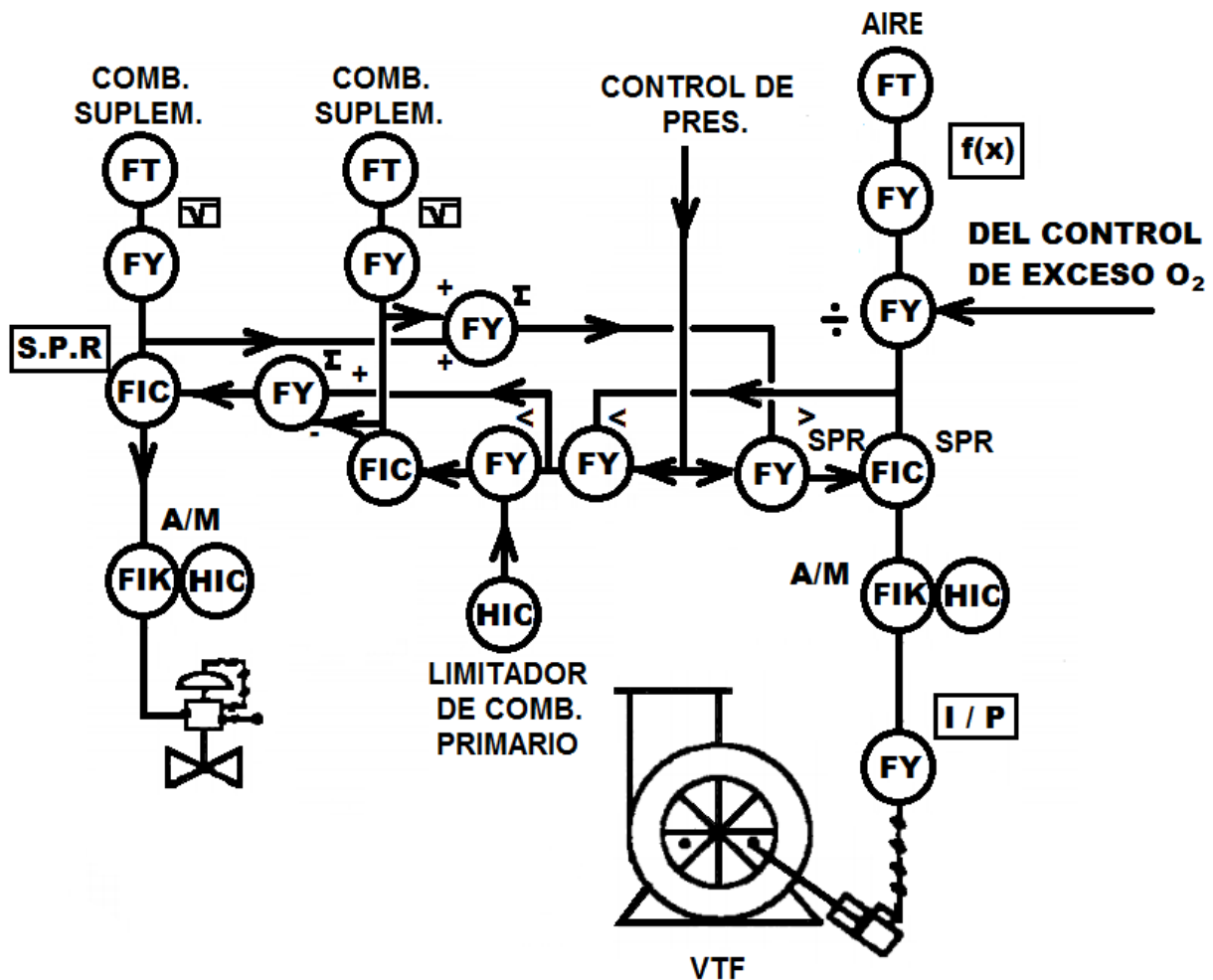


Figura 15: Sistema de Secuenciación de Combustibles .

Para la opción de quemar ambos combustibles en automático se deberá tener en cuenta las modificaciones en el ajuste dinámico de los controladores, ya que éste es muy diferente de cuando se quema un solo combustible en este modo.

La Figura 15 representa un sistema que quema un combustible primario (preferencia) hasta un cierto valor. La configuración de este sistema de secuenciamiento de combustibles es común cuando a un combustible primario (preferencia) se lo permite regular en modo automático y en paralelo con otro combustible secundario, pero hasta un cierto valor a partir del cuál sólo aumenta el combustible secundario. Este valor puede estar fijado por razones operativas y/o económicas.

En este sistema, la señal de demanda energética se transmite primero como setpoint remoto al controlador del combustible primario hasta que se alcance el valor límite prefijado por el selector de baja. A medida que siga aumentando la demanda energética, un sumador calcula la diferencia entre la demanda energética y el caudal de combustible primario. El resultado de aquel cálculo es enviado como setpoint remoto al controlador del combustible secundario. El resultado de aquel cálculo es enviado como setpoint remoto al controlador del combustible secundario. Si llevamos el límite de combustible primario a 0%, se podrá quemar el 100% del combustible secundario.

Muchos combustibles, particularmente productos de procesos y/o desechos, no son posibles de medir o poseen características que varían tanto que hacen que la medición de éstos sea totalmente irrelevante como un indicador del suministro energético. En los lazos de control de combustión, el parámetro más importante es el gradiente de liberación energética.

Si bien lo que se mide es un caudal volumétrico (m_3/hora), éste se transforma en (Kcal/hora) multiplicando el caudal volumétrico por su poder calorífico (Kcal/ m_3). Esto último tiene sentido sólo si se mantiene constante dicho poder calorífico.

En aquellas aplicaciones donde el poder calorífico no se mantiene constante, se deberá implementar algún tipo de compensación. En el caso de combustibles de hidrocarburos gaseosos, existe una cierta relación que liga al poder calorífico con la densidad. La compensación por densidad en la medición de caudal en algunas instalaciones donde son frecuentes grandes variaciones en su composición, arroja resultados satisfactorios.

En aquellas instalaciones en las que el caudal es difícil de medir, se lo puede inferir dentro de un margen acotado de error. Un ejemplo de esta indicación de caudal, es el caso del quemado de carbón pulverizado donde se infiere el caudal por medio de la velocidad del tornillo alimentador.

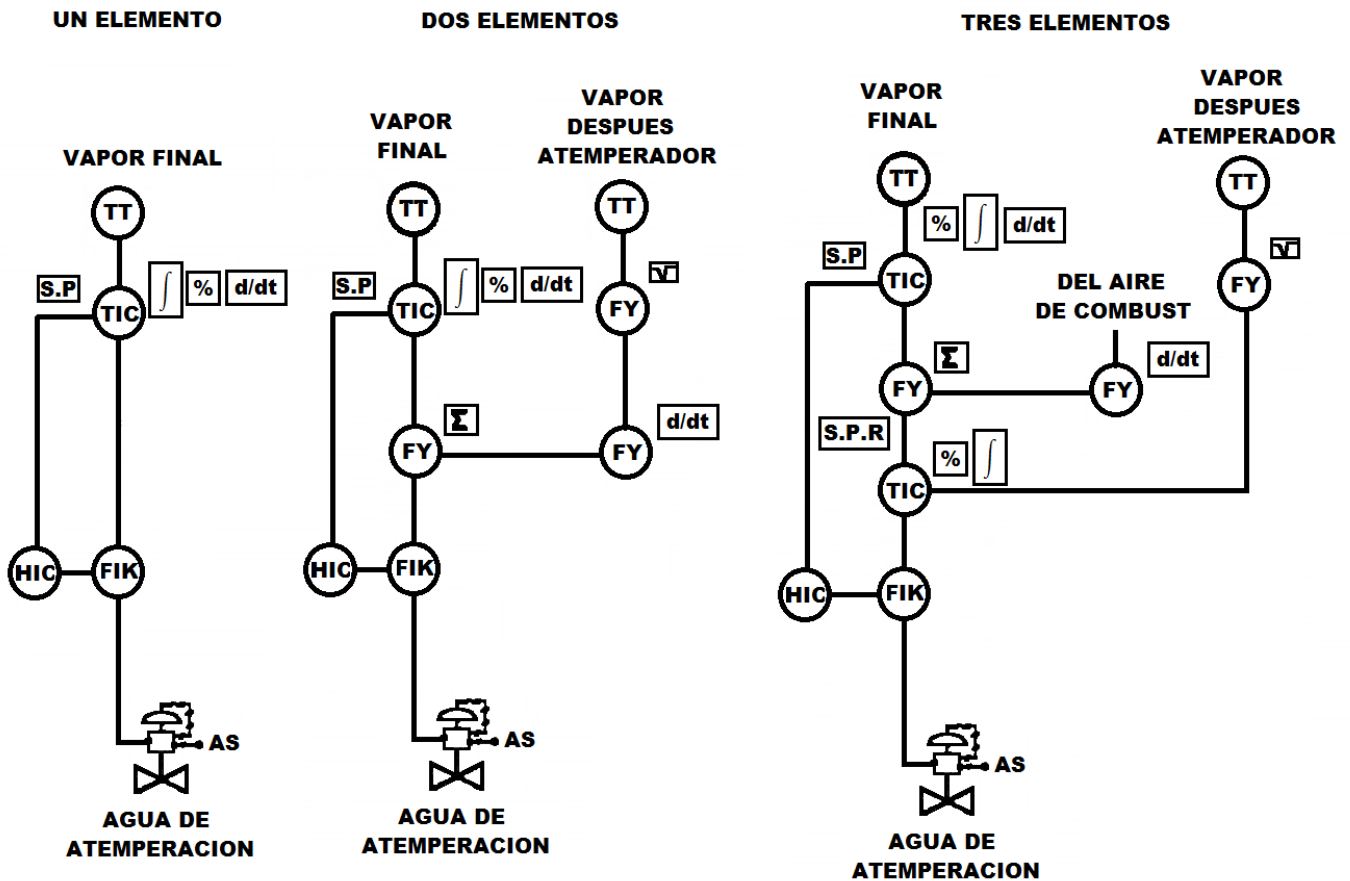


Figura 16: Lazos de control de temperatura de vapor sobrecalentado.

9.4.4. Lazos de control de temperatura de vapor

Estos pueden ser de:

1. **Un elemento:** Medición de temperatura final de vapor.

Se utilizan generalmente en calderas pequeñas sin atemperador intermedio. Mantiene la temperatura final de vapor en el valor deseado. No compensa por variaciones bruscas en la demanda. Se ve afectado por variaciones en el caudal de aire, presiones en el colector de agua a atemperar. Ver figura 16.

2. **Dos elementos:** Medición de temperaturas de vapor después de atemperar y final.

Se utilizan generalmente en calderas pequeñas y grandes con atemperador intermedio. Mantiene

la temperatura final de vapor en el valor deseado. Compensa por variaciones bruscas en la demanda. Se ve afectado por variaciones en el caudal de aire, presiones en el colector de agua a atemperar. Ver figura 16.

3. **Tres elementos:** Medición de caudal de aire, temperaturas de vapor después de atemperar y final.

Se utilizan generalmente en calderas pequeñas y grandes con atemperador intermedio. Mantiene la temperatura final de vapor en el valor deseado. Compensa por variaciones bruscas en la demanda. No se ve afectado por variaciones en el caudal de aire, pero sí en las presiones en el colector de agua a atemperar. Ver figura 16.

El control de atemperación por inyección es el control de temperatura mas usado en los diferentes tipos de calderas industriales.

En la Figura 17.a podemos observar un lazo de control de temperatura de un elemento. Este esquema es utilizado en aplicaciones donde las variaciones de carga son infrecuentes y/o lentas.

En la Figura 17.b vemos un sistema convencional cascada de dos elementos. Este sistema regula la inyección de agua de atemperación de acuerdo a la temperatura final de vapor. El controlador de temperatura final, de acción Proporcional + Integral + Derivativo, recibe como variable medida a la temperatura de salida del vapor sobrecalentado y la compara con su setpoint.

La señal de corrección de éste ingresa como setpoint remoto al controlador de caudal de atemperación, de acción Proporcional + Integral, que tiene como variable medida a la temperatura de salida del atemperador. En este lazo se debe prevenir el efecto de realimentación positiva “Windup” del controlador de temperatura final, que se presenta cuando el lazo se pasa a manual o cuando se supera alguno de los límites de control de la válvula.

Uno de los principales factores que inciden en la variación de la temperatura del vapor sobrecalentado son las variaciones en el caudal de aire de combustión.

9.4.5. Lazos de control de presión de hogar

Este tipo de lazo se aplica a calderas de tiro balanceado o sea con presión sub-atmosférica en el hogar.

1. **Un elemento:** Medición de presión en el hogar.

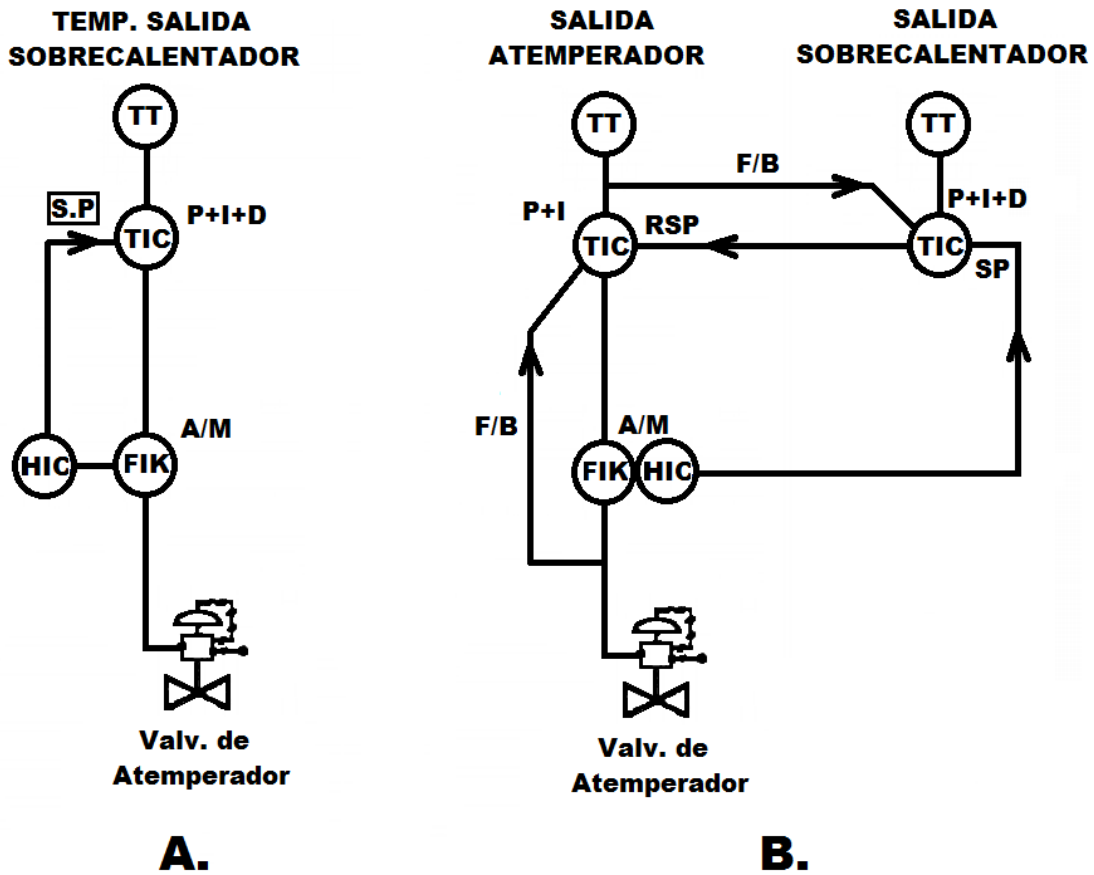


Figura 17: Lazos de control de temperatura.

Su principal función es la de mantener esta presión dentro de rangos estrechos. Se ve afectado por las pulsaciones debido en parte por la propia combustión y otro tanto por la operación de los ventiladores. También lo afecta las variaciones de caudal de aire producto de los cambios realizados por el controlador de aire perteneciente al lazo de combustión.

Estos fenómenos pueden eliminarse implementando estrategias de control más complejas. Ver Figura 19.b.

La Figura 18 representa esquemáticamente la relación entre dos variables cuyas respuestas están acopladas. Si aplicáramos lazos separados de control de caudal y presión de hogar, aparecerá entre los dos controladores una interacción.

Si por ejemplo, (ver Figura 18) el controlador de aire realizara una modificación en la posición del damper correspondiente al ventilador de tiro forzado, este efecto se traduciría inmediatamente

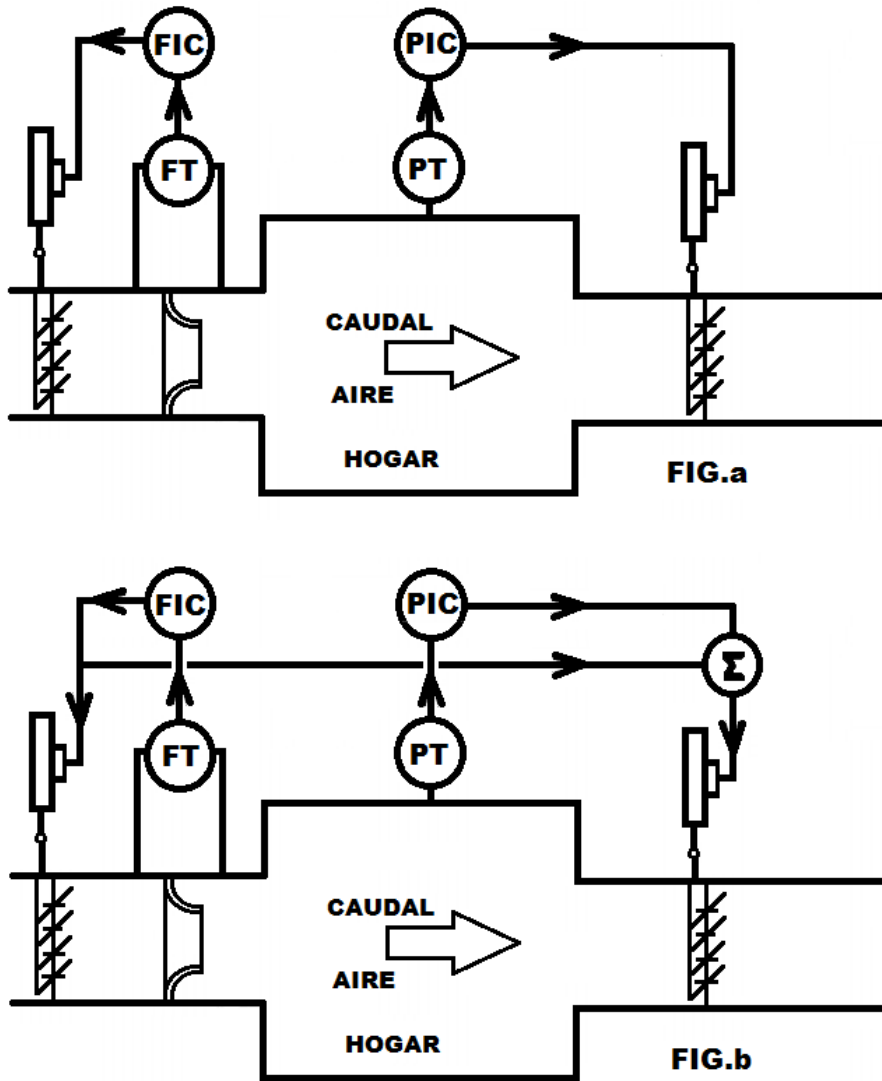


Figura 18: Control de Presion de hogar.

como una perturbación de presión en el hogar. En forma similar si el controlador de presión de hogar efectuara algún cambio sobre el registro de salida de gases, se traduciría inmediatamente en una perturbación sobre el caudal de aire.

Estas dos variables poseen prácticamente las mismas constantes de tiempo a pesar de no ser independientes. Si realizáramos la sintonización de estos dos lazos por separado con el fin de responder a sus propias variables, uno u otro controlador podrá ser puesto en automático.

Si ambos controladores se pasaran a automático, ante la menor perturbación se iniciaría un ciclo que persistiría en el tiempo. A fin de frenar este ciclo, generalmente se procede a desintonizar

al controlador de presión, reduciendo de esta forma la velocidad de respuesta de un controlador respecto al otro. A pesar de que el ciclo se ha vuelto estable, también es cierto que éste, ante una perturbación, tardará demasiado tiempo en reponer la estabilidad. Al desintonizar el controlador de presión, lo que se logró fue canjear estabilidad por disminución en la velocidad de respuesta del lazo.

Existen muchas unidades que son controladas con esquemas como en la Figura 18.b, pero en todos los casos, si se desea poner en automático ambos controladores, se deberá desintonizar alguno de éstos. Esto es aceptable en procesos en los que no son frecuentes variaciones de carga o éstas son lentas.

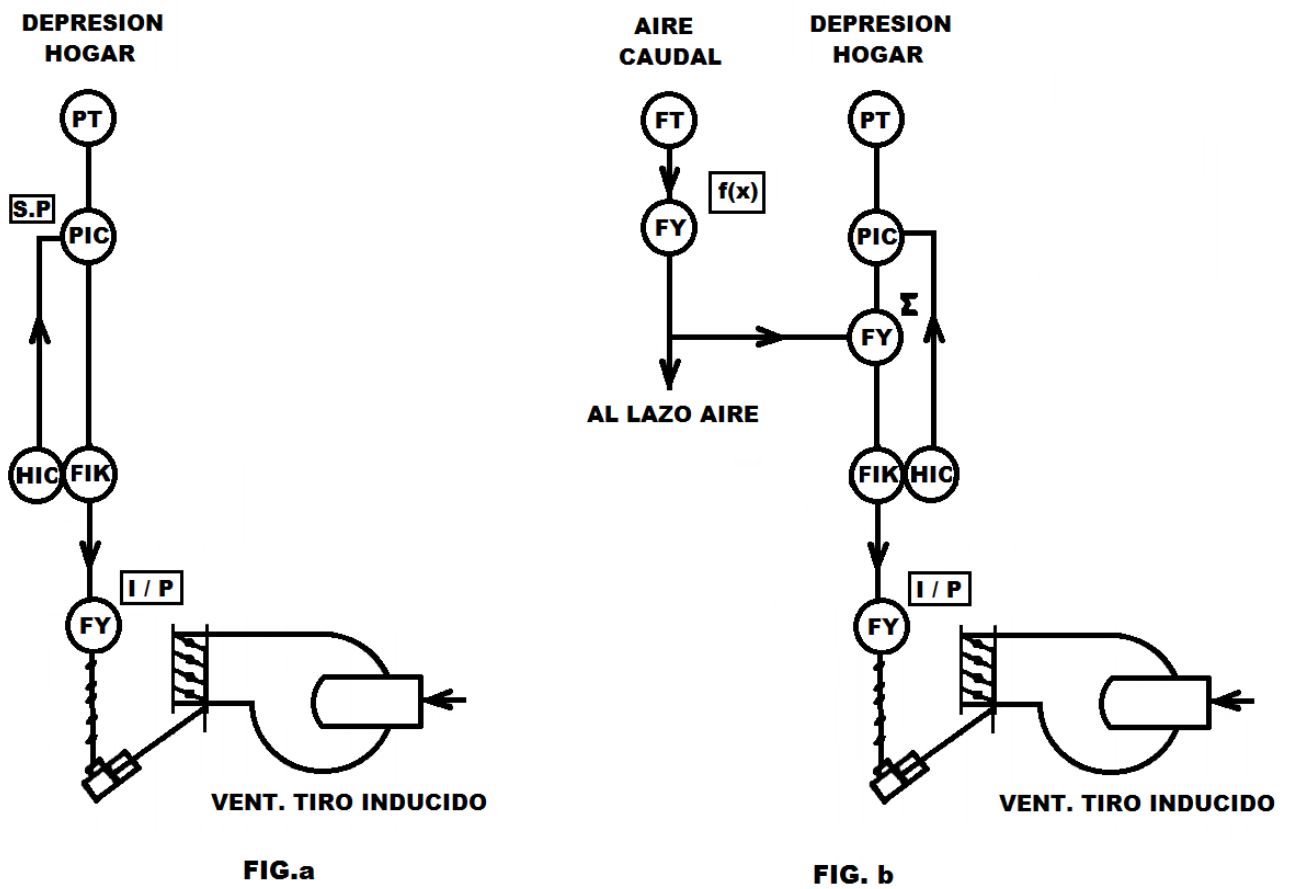


Figura 19: Lazos de Control Aplicables al Control de Presión de Hogar.

Una técnica utilizada para retener estabilidad sin sacrificar velocidad de respuesta del lazo, es acoplando entre sí ambos lazos de control, ver Figura 19.a, En este caso, ambos registros son

operados en paralelo por el controlador de caudal de aire. Aquí, cuando el controlador de aire realiza un ajuste a fin de modificar el caudal, al mismo tiempo lo hace sobre la presión del hogar, anulando de esta forma el fenómeno de acople cíclico. Por supuesto que esto exige de una cuidadosa caracterización de la relación de señales de ambos registros vs. posición de éstos. De esta manera el controlador de presión podrá sintonizarse nuevamente a fin de lograr la estabilidad y velocidad de respuesta requeridas por el proceso. En las Figuras 19.a y 19.b podemos observar los lazos de control aplicables al control de presión de hogar. Otras técnicas de acople de variables es por ejemplo controlando una tercera variable que posea una relación directa con la presión en el hogar o con el caudal de aire.

9.4.6. Lazos de control de purga continua

Su principal función es la de mantener la concentración de sólidos disueltos en el domo dentro de rangos estrechos.

1. Un elemento: Medición de conductividad de agua de domo.

Generalmente, con este tipo de estrategia alcanza para asegurar un correcto control, ya que las variaciones de la conductividad suelen ser lentas.

No obstante, en aplicaciones críticas se suele incluir en el lazo, compensación por caudal de vapor. Ver Figura 20.a.

En muchas aplicaciones de pequeñas calderas, la conductividad del agua de caldera es controlada manualmente. Si se desea un control ajustado de la conductividad en el agua de caldera, deberá implementarse una estrategia que contemple el efecto Feedforward. La conductividad del agua de caldera es la variable medida que ingresa al controlador de conductividad, ver Figura 20.b.

Puesto que los sólidos que ingresan al domo lo hacen a través del agua de alimentación, es aceptable la utilización de ésta como señal feedforward. Cuando cambia el caudal de agua de alimentación, también lo hace el setpoint remoto del controlador de purga continua.

La relación actual de agua/concentración que se establece, caracteriza los ciclos normales de concentración, siendo distinta para cada aplicación.

Por ejemplo, si la señal de sólidos que ingresa por el agua de alimentación está normalmente fijada en 300 microsiemens, esto indica 10 ciclos de concentración ó 10 % de purgado continuo. Esto significa que por cada 1 litro de agua de alimentación que ingresa en el domo, deberemos purgar 0.1

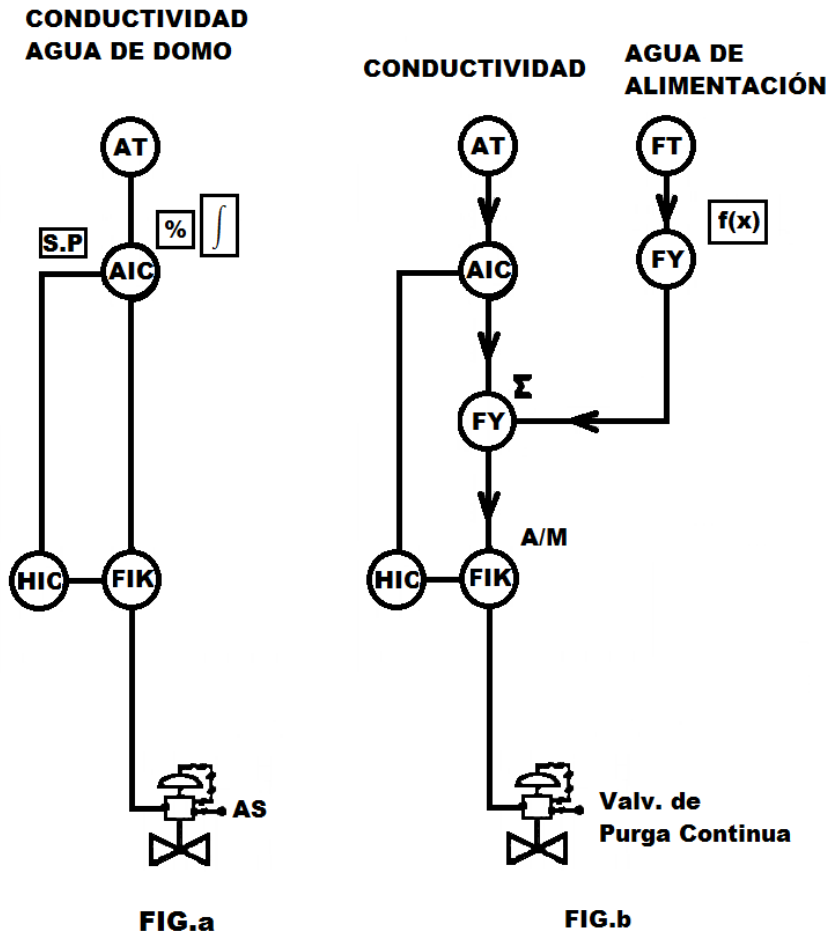


Figura 20: Control de Purga Continua.

litros. Se deberá realizar la caracterización de la señal de salida del controlador de conductividad a fin de lograr una respuesta lineal de la válvula de control.

10. Seguridad de Calderas

Existen hoy en día en todo el mundo muchas Normas o Estándares relacionados con la seguridad que poco a poco, sobre todo en los últimos años, están convergiendo hacia un único Estándar mundial que sea aceptado por todos o casi todos los países. Existen diversidad de Asociaciones, Instituciones u Organismos públicos y privados cuya misión, entre otras, es la elaboración de Normas, enfocadas hacia distintos aspectos de la seguridad (proceso, sistema electrónico, instrumentación, Software/hardware, etc.) y dependiendo de los intereses que defienden. En el caso de las Calderas

también existen varias Normas o Estándares aplicables, y con poco margen de error podemos decir que la más utilizada a nivel mundial es la americana NFPA (National Fire Protection Association). Desde el punto de vista de la funcionalidad del sistema de seguridades de caldera se utiliza cada vez más la nueva IEC 61508.

La función del sistema de seguridades de caldera y manejo de quemadores es la de vigilar la caldera y poner o quitar de servicio de una forma segura los quemadores. De acuerdo con todas las señales procedentes de la instrumentación de campo (transmisores de presión, temperatura, nivel, finales de carrera, etc.) y, si es el caso, de las procedentes de otros sistemas o equipos auxiliares, el BMS se encargará de ejecutar las acciones necesarias (cierre de válvulas de combustible, etc.) para evitar sobrepasar los límites de funcionamiento considerados aceptables para la caldera o el proceso, llevando a la caldera a una situación de seguridad desde la cual se podrá reiniciar su puesta en servicio. Además de la vigilancia continua del estado general de la caldera, el BMS se encargará de ejecutar, de una forma segura, todas las secuencias de encendido y apagado de los quemadores e ignitores [8].

10.1. Secuencias de Seguridad

1. **Disparos de 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 combustible, así como la desenergización del relé MFT.
2. **Barrido o Purga de Caldera:** Después de cualquier disparo de caldera se debe realizar un barrido del hogar y de todos sus conductos asociados, con el objetivo de evitar que una posible atmósfera rica en combustible, debida a pequeñas fugas o a inquemados, pueda causar una explosión en el caso de un encendido.
3. **Rearme de Caldera:** Una vez que el barrido ha sido finalizado y no hay ninguna condición de disparo, se ha de rearmar el relé MFT. Esta acción produce el reset de todas las memorias de disparo, tanto a nivel software (PLC) como hardware (relé MFT), lo que permitirá el encendido del quemador. El relé MFT es un relé de seguridad que es manejado por el PLC además de ser desenergizado directamente por los pulsadores de disparo de emergencia. La tensión a todas las válvulas de corte combustible se establece a través de sus contactos de forma que si el relé MFT está desenergizado no es posible la apertura de dichas válvulas.
4. **Encendido y apagado de los quemadores e ignitores:** Estas secuencias se encargarán de

la puesta en servicio de los quemadores, asegurando que todos los permisivos necesarios para ello se van cumpliendo adecuadamente. Asimismo, 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 (pérdida de llama, alta/baja presión de combustible etc.), cortando inmediatamente la aportación de combustible al hogar.[9]

10.2. Inspección Periodica de Eficiencia Energetica Para Calderas

El nivel de eficiencia energética de una caldera es función tanto de la combustión que se genera en su seno como del aparato que conforma la caldera, y envuelve la combustión y trata de extraer y transferir hacia el agua la energía que es capaz de generar el combustible antes de que sus gases de combustión salgan por el conducto de evacuación o chimenea.

A la hora de establecer los criterios para definir el procedimiento de inspección de calderas desde el punto de vista de su eficiencia energética, se debe tener presente que:

- Combustión y Caldera están íntimamente correlacionados: la eficiencia de la transmisión de energía del combustible al agua es función, por un lado, de la calidad de la combustión y , por otro, de la capacidad y efectividad de la caldera como intercambiador de calor. Ambos factores dependen, a su vez, del estado de mantenimiento y conservación de la combustión - por su grado de puesta a punto -, y del nivel de limpieza de la superficie libre de intercambio, afectada por incrustaciones y hollines que puedan aislar su capacidad de transmisión de calor.
- Esta correlación alcanza su máxima eficacia si el quemador asociado a la caldera cumple sus distintos cometidos:
 1. Proporcionar el combustible a la cámara de combustión en condiciones de ser quemado.
 2. Aportar el aire necesario a la cámara de combustión.
 3. Mezclar íntimamente el aire y el combustible.
 4. Encender, mantener la llama y quemar la mezcla.
 5. Adaptar la llama a la geometría de la cámara de combustión.
 6. Desplazar los productos de la combustión hacia la salida de los humos.[10]

11. Principales Proveedores de Productos y Servicios en Colombia

COLMAQUINAS S.A. es una empresa Colombiana con 50 años de experiencia en el desarrollo de la industria del país, en este proceso la empresa se ha desempeñado en sectores de la industria como el sector petrolero, el petroquímico, plantas cementeras, plantas termoeléctricas, plantas de biocombustible, sector minero, sector azucarero, sector papelerero y el sector de alimentos y bebidas. Colmaquinas ha vendido calderas de 1.000 caballos a diferentes presiones de operación, utilizadas en Colombia en el sector lechero y en Perú en el sector pesquero. Entre los repuestos ofrecidos se encuentran aislamientos, bombas, compresores, controles, control de nivel de agua, electrodos, prefabricados, quemadores, transformadores, válvulas, tuberías, maniobra y control entre otros. Además poseen una amplia gama de Calderas, fabricadas y ensambladas en fábrica, para ser transportadas al lugar de su instalación de tipos compactas, convencionales, piro-tubulares, acuo-tubulares, equipos auxiliares, partes, calentadores de agua y una caldera de alta eficiencia diseñada por Colmaquinas llamada “caldera 50 plus” pensando en los clientes que necesitan ahorro y mayor eficiencia de operación. Estas son las compañías más representativas en la que Colmaquinas ha prestado sus productos y servicios:

Corpaul, Hino, Frito Lay, Inacril, Del Llano, Belcorp, Chevron Texaco, Barval, Multidimensionales, Rascheltex, Gas Natural (Postobón), Papelsa, Hospital Pablo Tobón Uribe, Hospital Manuel Uribe Angel. En Colombia tienen sedes en Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla y Bucaramanga.

VR INGENIERÍA es una empresa Colombiana fundada en 1987 que diseña y fabrica bienes de capital para los sectores industrial y petrolero. Entre las líneas de productos están: calderas, intercambiadores de calor, recipientes a presión y otros equipos de proceso para ahorro y recuperación de energía y control de emisiones.

Las calderas VR han sido diseñadas con criterios que garantizan su confiabilidad, duración, fácil mantenimiento y limpieza. Las partes sujetas a presión están construidas de acuerdo al código ASME vigente y se suministran instalaciones automatizadas que requiere una mínima intervención humana. Entre sus productos están Calderas para combustibles líquidos y gas, Calderas recuperadoras de calor, calderas para combustibles sólidos y calderas de fluido térmico. Sus clientes más representativos son Bavaria - Cerveza, Olefinos - Mexico, Extractora del Sur Casanare y Metapetroleum. Su sede es en Bogotá D.C.

CALDERAS CONTINENTAL LTDA es una de las compañías pioneras y líderes de Colombia en la fabricación de calderas de vapor y equipos complementarios. Fundada en el año 1967 con la tecnología y asistencia técnica permanente para la fabricación de calderas de vapor pirotubulares de la firma norteamericana Continental Boiler Co. de Pensilvania con lo cual inicio la fabricación de calderas desde 10 hasta 800 BHP, con presiones hasta de 250 Psig, para operar con combustibles líquidos (ACPM Fuel Oil No. 6 y crudo de castilla) y gaseosos (metano y propano y LPG). Posteriormente iniciamos la investigación y desarrollo para calderas de combustibles sólidos. En su Catalogo de productos se encuentran calderas de vapor de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos, calderas de recuperación, calderas de agua caliente, calderas de aceite térmico, equipos complementarios y equipos para control de emisiones. Sus clientes más representativos son: AVIDESA S.A., CLINICA DEL COUNTRY, ECOPETROL ICP, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, HOSPITAL EL TUNAL, BAVARIA PRODUCTORA DE JUGOS, PIMPOLLO S.A, PASTAS LA MUÑECA, CARREFOUR entre otras más. En Colombia tienen sedes en Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla y Bucaramanga.

COLOMBIANA DE CALDERAS - COLCALDERAS es una empresa dedicada a la planeación, venta, montaje y mantenimiento de equipos para los procesos industriales de pequeñas, medianas y grandes empresas nacionales y fronterizas dedicadas a la producción de bienes o servicios en los procesos de caldeo y similares; satisfaciendo sus expectativas de eficiencia, eficacia y calidad a través de nuestro talento humano y técnico. Procurando así una excelente rentabilidad para el crecimiento de la empresa y sus colaboradores. Entre los productos y servicios ofrecidos se encuentran: Venta de Calderas, Reparación de Calderas, Mantenimiento de Calderas, Mantenimientos preventivos y correctivos, Modernización de calderas, salas de calderas, Automatización de Calderas para funcionamiento a Gas Natural, Propano o combustible, Alquiler de Calderas, Compra de Calderas, Asesoramiento técnico y diagnósticos, Venta y Reparación de equipos industriales, Ingeniería, Estudios técnicos de proyectos, Montajes industriales, Equipos de presión, Intercambiadores de calor, Tanques estacionarios, Hornos, Marmitas, Autoclaves, Quemadores, controladores, mostradores, Repuestos y suministros, Instalaciones eléctricas, Instalaciones mecánicas, Redes de vapor y condensados, Aislamientos térmicos, Mantenimientos preventivos, correctivos y reparación de equipos de caldeo, Tratamientos de agua para calderas, equipos de suavización y lavados químicos, Automatización para funcionamiento a GAS NATURAL o PROPANO, Instrumentación y planos. Sus Clientes más representativos son: GASEOSAS HIPINTO BUCARAMANGA, GASEOSAS POS-

TOBON, LABORATORIOS BAYER DE COLOMBIA FITO - SANIDAD, LECHESAN BUCARAMANGA, UNILEVER ANDINA S.A., ESCUELA DE CADETES GENERAL SANTANDER, INCOLACTEOS, entre otras más. Su sede es en Bogotá D.C.

CALDERAS COLOMBIA (THERMODYNAMICS & ENGINEERING LTDA T&E)

es una empresa de ingeniería térmica que ofrece productos y servicios especializados para los sistemas de generación de vapor. Entre sus productos se encuentran calderas pirotubulares - verticales - biomasa - carbón - madera - acuotubulares, desaireadores y tanques de purga, suavizadores y tratamiento de agua, quemadores y boiler manager, lavadores de gases, economizadores, tanques, bombas, tubería y accesorios, distribuidores de vapor, estructuras y plataformas, instrumentación entre otras. Sus clientes más representativos son: Cepcolsa, gasNatural, Hocol, Preflex, Cafam, Aceites manuelita S.A. entre otras. Su sede es en Bogotá D.C.

Otras Empresas importantes en Colombia que distribuyen equipos de instrumentación, realizan capacitaciones y desarrollan proyectos de ingeniería son: ISATECK, DISICO S.A, COMPUTEQUIPOS, CALDERAS JCT, SEITA, ECI y TECNIK LTDA.

12. Anexo Informe Visita HARINAGRO S.A

HARINAGRO S.A es una empresa dedicada al procesamiento de productos y subproductos avícolas y grasas de origen animal. Para realizar este procesamiento uno de los elementos más importantes es la CALDERA ya que se necesita vapor seco para la cocción de los alimentos. Esta empresa usa una caldera pirotubular de tres pasos y el tipo de combustible que emplean es el carbón ver 21. Al hablar de tres pasos se quiere decir que la llama ó calor entra a la caldera por medio de los tubos de circulación se devuelve y sale.

Este proceso se lleva a cabo gracias a dos ventiladores de tiro forzado e inducido. El ventilador de tiro forzado se encarga de impulsar la llama generada por el carbón previamente encendido mediante un arco de ignición por el juego de tubería que hay internamente en la caldera, el ventilador de tiro inducido se encarga de extraer esta llama de la tubería para que esta tenga una salida, el proceso de quemado de combustible y el control de los ventiladores deben estar armonizados ya que de eso depende que el carbón tenga un quemado óptimo y no se desperdicie la energía de este; además de esto también dependen las emisiones ya que si el carbón tiene un mal proceso de quemado el humo resulta ser negro y si por el contrario el quemado es óptimo el humo tiene un color blanco.



Figura 21: Caldera y Tablero de Control Harinagro S.A.

Al realizar este proceso de entrada y salida de la llama por medio del juego tuberías se garantiza una transferencia de calor al agua que circula alrededor de estos tubos y se genera vapor, normalmente este vapor tiene niveles de humedad pero lo ideal es que este sea totalmente seco, para tratar de lograr esto se tiene una válvula de purga que se encarga periódicamente de liberar el exceso de agua que no fue evaporada y por ende disminuir la humedad del vapor. El sistema posee un PLC Mitsubishi el cual se encarga de realizar un control PID de variables como nivel, presión, temperatura, y velocidad de los ventiladores. Además de esto el sistema posee una pantalla HMI en la cual se visualizan las variables mencionadas y se establece el set point de cada una de ellas. Este sistema permite realizar el control manual y automático de dichas variables.

Para censar el nivel del agua de la caldera se emplea un sensor de nivel warrick el cual se encarga de enviar dicha señal al panel de control, Aparte de este sensor también posee un sensor de nivel de tipo flotador; también se censa el nivel de la tolva de combustible usando un sensor de tipo electrodo para evitar que la caldera se quede sin carbón, esta tolva es llenada por medio de una banda transportadora vertical compuesta por un motor y cangilones que transportan el carbón de la zona de descargue a la tolva. El proceso de dosificación de carbón que ingresa a la caldera se hace manualmente por medio de una compuerta que deja pasar cierta cantidad de combustible.

El control que emplean los ventiladores se hace por medio de variadores de frecuencia marca Danfoss que manejan la velocidad del mismo; el agua usada en la caldera debe tener niveles de dureza y PH específicos para que su evaporación sea óptima y no se presenten incrustaciones, también se hace un reproceso del agua para que al ingresar el líquido del tanque de almacenamiento tenga una temperatura entre 90° y 100° centígrados para que se gaste la menos energía calentándola y que su ebullición sea instantánea.

El carbón que se emplea en esta caldera debe tener un nivel bajo de azufre y ser de 2 o 3 pulgadas debido al tamaño de la parrilla viajera que lo ingresa a la caldera. El carbón al quemarse totalmente se abre automáticamente una guillotina controlada por un preóstato que libera las cenizas y residuos producto del quemado del carbón. En la parte de seguridad se tienen alarmas de bajo y alto nivel, válvulas de purga que liberan presión y dos válvulas de emergencia que se disparan cuando se tenga una presión excesiva, también para lograr tener un funcionamiento óptimo y seguro de la caldera se deben realizar periódicamente un proceso de mantenimiento.

Para realizar el proceso de mantenimiento de la caldera ésta se debe apagar un día antes para que se enfríe para esto se encienden los ventiladores para que el proceso sea más rápido, se desocupa totalmente el tanque, y posteriormente se hace lavado, revisión de borneras, motores, que no existan incrustaciones, se revisa la parrilla la cual es la que más sufre daño ya que esta siempre en contacto con la llama, se calibran las válvulas de seguridad y se ajustan todos los sensores y transmisores.

CONTACTOS:

- Ing. Ferney González ITALCOL. Email: ferneygonzalez@italcol.com

- Ing. Pedro Gómez HARINAGRO S.A. Email: pedrogomez@harinagro.com

13. Conclusiones y Recomendaciones

En este proyecto se describieron las calderas, la instrumentación utilizada y los controles más importantes que se deben implementar para su operación segura.

- Al adquirir equipos y elementos de medición se debe solicitar a sus fabricantes o proveedores los respectivos certificados de calibración realizados en laboratorios acreditados que garanticen su correcta medida ya que en procesos que controlan temperatura, nivel, presión y combustión se requiere un alto nivel de exactitud y precisión para garantizar un desarrollo óptimo y seguro del proceso.
- Un avance tecnológico muy importante es la capacidad de una caldera para comunicarse con los sistemas de gestión, que ahora son comunes en las instalaciones comerciales y tecnológicas más recientes que incluyen la conexión directa de una caldera a un ordenador, la información de lectura de las diferentes variables aparece en su totalidad, con palabras claras y comprensibles, en lugar de desplazarse por la pantalla simple de una caldera para leer varios puntos de datos, la computadora portátil muestra todos los puntos de datos principales en una sola página. Además facilita el control de elementos de forma remota, esto garantiza un proceso de automatización integrado.
- El agua nunca se encuentra en estado puro, esto quiere decir que no sirve como alimentación directa en una caldera ya que pueden contener materias sólidas y ácidos que dañan los materiales y la instrumentación en la misma, por eso para tener una larga vida útil en una caldera se recomienda implementar un óptimo tratamiento de agua que garantice la calidad de la misma.

Referencias

- [1] A. D. Figueroa Arias, “Tendencias tecnológicas en el control e instrumentación de calderas,” 2008. Tesis Facultad de Ingeniería Mecánica,.
- [2] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Atlacomulco 500-5to. piso, Industrial Atoto 53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México.: Prentice Hall, 4a. edición ed., 1999.
- [3] J. A. P. y. P. S. J. C. González Bauza, “Tratamientos externos e internos del agua para calderas,” *Dpto. de Ingeniería de Procesos. E.T.S.I.I. de Las Palmas de Gran Canaria*, Junio 2000.
- [4] T. A. S. of Mechanical Engineers, *AN INTERNATIONAL CODE 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code*. Three Park Avenue, New York, NY 10016-5990: The American Society of Mechanical Engineers, USA, 2007 ed., 2007.
- [5] G. F. J. Gilman, *Boiler Control Systems Engineering*. 67 Alexander Drive, P. O. Box 12277, Research Triangle Park NC 27709 U.E.: ISA - The Instrumentation, systems, and Automation Society, 2005.
- [6] R. Bayona Pabón and N. P. Gutiérrez B., “Modelo y simulación del sistema de control de generación de vapor y turbina en centrales termoeléctricas,” 1989. Tesis Departmaneto de Electricidad y Electrónica,.
- [7] A. Creus Solé, *Instrumentacion industrial*. Pitágoras 1139, Col. Del Valle 03100, México. D.F.: Alfaomega macombo grupo editor, 6a. edición ed., 1998.
- [8] P. P. Díaz, “Programación y control de obra. mantenimiento técnico y general caldera. b2952 gerencia complejo barrancabermeja ecopetrol s.a.,” 2009. Tesis Facultad de Ingeniería Electrónica,.
- [9] D. la Sen Sanz. Alberto, G. M. Salvador, and B. Lino.José, *Control Y Seguridades De Calderas*. Hotel Meliá Av. de América Madrid: FI Controles S.A., 2000.
- [10] A. T. E. de Climatización y Refrigeración (ATECYR), *Guía técnica sobre procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas*. C/ Madera, 8E-28004-Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007.