

INSTRUMENTACIÓN Y LAZOS DE CONTROL EN CALDERAS

CARLOS ANDRÉS BERMEJO MARRUGO
RAFAEL EDUARDO CASTELLAR MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2011

INSTRUMENTACIÓN Y LAZOS DE CONTROL EN CALDERAS

CARLOS ANDRÉS BERMEJO MARRUGO
RAFAEL EDUARDO CASTELLAR MARTÍNEZ

Monografía presentada como requisito para optar al título de ingeniero electrónico

Director:
M.Sc Jorge Eliecer Duque

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2011

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias ___/___/_____

A **Dios**, porqué de El parte todo y nunca me suelta de su mano.

A mi **familia y amigos**, ellos siempre están apoyando y fortaleciéndome cada vez que se presentan obstáculos en este duro camino de la ingeniería.

A aquellos **maestros** que de una u otra forma hacen parte de mi formación académica y profesional.

Todos estos junto a mí, son grandes forjadores de mis metas.

Muchas gracias,

Carlos Andrés Bermejo Marrugo.

Este trabajo de grado es dedicado a **mi familia**, porque siempre estuvo presente en todo el transcurso de mi carrera apoyándome y motivándome para ser una mejor persona, gracias a mi familia por su sacrificio y consejos que me ayudaron a ser lo que soy hoy en día y aportaron todo lo necesario para continuar estos años de estudio.

A **mis compañeros y amigos** de la universidad gracias a ellos mi paso por el programa de ingeniería electrónica fue toda una travesía, con su apoyo y amistad hicieron de ese camino toda una aventura que nunca se olvidará.

Y a **todas** esas personas que de alguna manera estuvieron ahí conmigo ayudándome a continuar y alcanzar todos mis logros y metas durante mi vida.

Gracias.

Rafael Eduardo Castellar Martínez

De nuestra parte, agradecimientos especiales

A nuestro director, **M.Sc. Jorge Eliecer Duque**, por su asesoría en la estructuración del trabajo.

A los ingenieros electrónicos, **Ingrid Johana Donado Romero y Rafael Enrique Jaimes Navas**, por su fundamental apoyo y asesoría técnica en el desarrollo del trabajo.

A la **Universidad Tecnológica de Bolívar**, por su formación y colaboración.

Al Ingeniero de mantenimiento de la empresa **EMGESA S.A. ESP**, **Hermes Hernando Osorio Lugo**, por brindarnos su tiempo e información técnica del proceso de control de la caldera perteneciente a la unidad #1.

A todos los grandes maestros, participes de nuestra formación como ingenieros,

Carlos Bermejo
Rafael Castellar

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR	15
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA	17
2. LAZO DE CONTROL DE NIVEL	25
2.1. INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE NIVEL	25
2.2. OBJETIVOS DEL CONTROL DE NIVEL	27
2.3. ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE NIVEL E INSTRUMENTACIÓN	28
2.3.1 Control de nivel de tres elementos	28
3. LAZO DE CONTROL DE DEMANDA	32
3.1. INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE DEMANDA	32
3.2. OBJETIVOS DEL CONTROL DE DEMANDA	33
3.3. ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE DEMANDA E INSTRUMENTACIÓN	34
3.3.1 Control a dos elementos	34

4.	LAZO CONTROL DE COMBUSTIÓN	37
4.1.	INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE COMBUSTIÓN	37
4.2.	OBJETIVOS DEL CONTROL DE COMBUSTIÓN	39
4.3.	ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN E INSTRUMENTACIÓN	40
4.3.1	Control de combustión con límites cruzados	40
5.	LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA	47
5.1	INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE TEMPERATURA	47
5.2.	OBJETIVOS DEL CONTROL DE TEMPERATURA	48
5.3	ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE TEMPERATURA E INSTRUMENTACIÓN	49
5.3.1	Control a tres elementos	49
6.	LAZO DE CONTROL DE PRESIÓN	53
6.1	INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PRESIÓN	53
6.2.	OBJETIVO DEL CONTROL DE PRESIÓN	54
6.3.	ESTRATEGIAS BÁSICAS DE CONTROL DE PRESIÓN E INSTRUMENTACIÓN	54
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFIA	59
	ANEXOS	61

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 Esquema general de generación de vapor	14
FIGURA 2 Principio de una caldera acuotubular	18
FIGURA 3 Disposición física de los domos en una caldera	19
FIGURA 4 Control de agua alimentación de dos elementos.	20
FIGURA 5 Precalentador de aire	21
FIGURA 6 Quemadores de fuel oil #6 y gas	22
FIGURA 7 Control de agua alimentación de tres elementos.	23
FIGURA 8 Diagrama de control funcional de un sistema típico de un elemento	26
FIGURA 9 Diagrama de control funcional de un sistema típico de dos elementos	28
FIGURA 10 Control realimentado de combustible	30
FIGURA 11 Control de combustión. Combustible sigue a aire	31
FIGURA 12 Control de combustión. Aire sigue a combustible	33
FIGURA 13 Control de combustión con límites cruzados	35
FIGURA 14 Control de límites cruzados para dos combustibles	36
FIGURA 15 Diagrama funcional típico de control de presión.	38
FIGURA 16 Atemperación por spray	42

FIGURA 17	Atemperación por intercambiador de calor	43
FIGURA 18	Control de temperatura a un elemento	45
FIGURA 19	Control en cascada de temperatura de vapor a dos elementos	47
FIGURA 20	Control de temperatura de vapor a dos elementos	50
FIGURA 21	Control de temperatura de vapor a tres elementos	51
FIGURA 22	Alternativa de control de temperatura de vapor a tres elementos	52
FIGURA 23	Control de temperatura de vapor con caudal de spray	53
FIGURA 24	Control de tiro con ganancia variable y feedforward	55
FIGURA 25	Control de tiro con ganancia variable y feedforward	56

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama general de caldera de vapor	61
Anexo B. P&ID del Lazo de Control de Combustión y Demanda	63
Anexo C. P&ID del Lazo de Control de Presión Hogar	65
Anexo D. P&ID del Lazo de Control de Temperatura de Vapor Final	67
Anexo E. P&ID del Lazo de Control de Nivel del Domo	69
Anexo G. Listado con la Instrumentación y Elementos de Campo	71

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se ha enfocado en el tema de calderas, especialmente en *acuotubulares*, de tipo de tubos de agua, se explica su funcionamiento, aplicación, el diseño que realmente la caracteriza y su desarrollo tecnológico. Se expondrá la descripción del proceso de generación de vapor en la caldera, además de una explicación detallada de la caldera a la que se limita esta monografía.

En las unidades siguientes, se recopilarán las diferentes técnicas y estrategias de control aplicables a las condiciones de trabajo de la caldera objeto, para tener un sistema autónomo, seguro y confiable, considerando las normas vigentes; ISA para el control de calderas tipo domo con combustibles fósiles además de la norma NFPA 85 dedicada a la protección contra incendios en calderas.

Por otra parte, luego de las estrategias necesarias para el control de las diferentes variables en el proceso, se expondrá un diagrama P&ID, donde se podrá apreciar la implementación de la estrategia de control y la manera en que se interrelacionan las variables.

1. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR

1.1. INTRODUCCIÓN

La generación industrial de vapor es el proceso mediante el cual se produce vapor a presiones por encima de la atmosférica, a partir de la energía de un combustible, o de energía eléctrica. El vapor producido será posteriormente utilizado en diferentes funciones de la fábrica, tales como aporte de calor en procesos o movimiento de máquinas

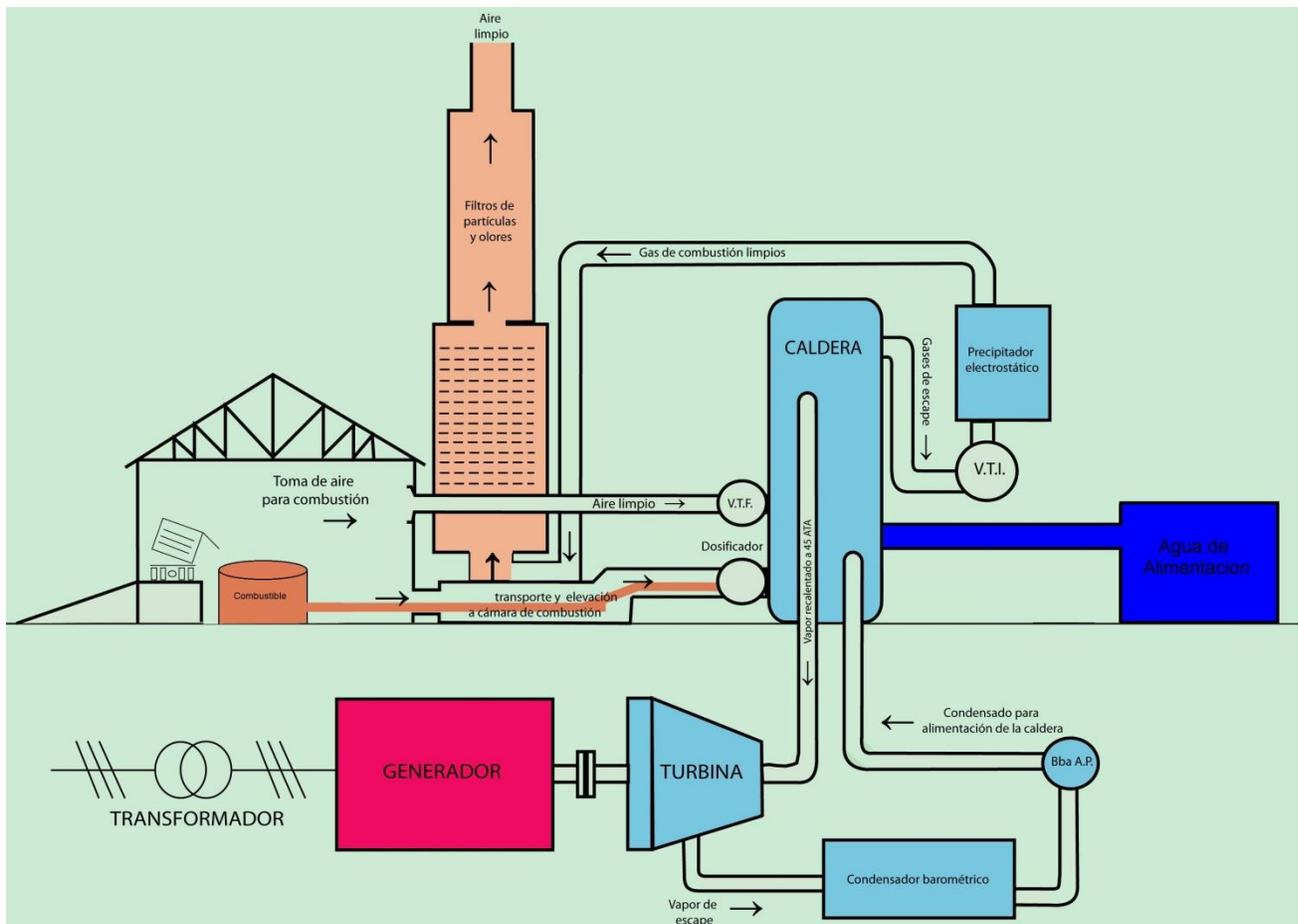
Los sistemas de vapor tienen hoy en día un uso muy extenso en aplicaciones diversas, tales como generación de energía mecánica y eléctrica, como agente calefactor en servicios comerciales e industriales, y como materia prima en determinados procesos entre otros. El vapor es utilizado de forma general como fuente de calor o para generar potencia mecánica. En las plantas térmicas el vapor se expande en una turbina, su energía es transformada en potencia mecánica, y esta a su vez en potencia eléctrica. En los procesos industriales el vapor es utilizado como fuente de calor para múltiples aplicaciones. En los sistemas de energía total, o esquemas de cogeneración, el vapor se utiliza para la producción combinada o secuencial de energía eléctrica y térmica, lo cual incrementa la eficiencia global del sistema.

El elemento central en un sistema de vapor lo constituye el generador de vapor o caldera de vapor, el cual tiene la función de transferir al agua, la energía en forma de calor de los gases producto de la combustión de la sustancia combustible, para que esta se convierta en vapor.

El generador de vapor está constituido por un conjunto de superficies de calentamiento y equipos, integrados en un esquema tecnológico para generar y entregar vapor en la cantidad, con los parámetros, calidad y en el momento requerido por los equipos de uso final, en forma continua y operación económica y segura, a partir de la energía liberada en la combustión de un combustible orgánico.

Las calderas constituyen un elemento esencial en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales al proporcionar la potencia o el calor necesario para el proceso, dependiendo sus resultados productivos y económicos en gran medida de la confiabilidad, seguridad y eficiencia con que operen las calderas recae, por tanto, sobre el personal de operación y supervisión del departamento de generación de vapor una gran responsabilidad que requiere del conocimiento y actualización continua en las técnicas y procedimientos para garantizar la estabilidad y seguridad en el suministro de vapor según los requerimientos del proceso, con el menor consumo de combustible, con el menor gasto y el mínimo impacto ambiental. El esquema general de la producción de vapor en la industria se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema general de generación de vapor.



Fuente: Greenwatts.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR

El proceso se inicia con la alimentación de agua, la cual no es agua común y corriente, debido a que esta genera corrosión, formación de costras, *priming*, entre otros, para esto el agua pasa por una serie de procesos con el fin de obtener agua desmineralizada o agua *demi*¹ a la cual se le quitan los minerales y las sales. Luego, esta agua *demi* se hace pasar por tubos dentro de la caldera que conforman el recinto del hogar, llamado *water walls tubs*. El recinto posee aberturas para los quemadores y la salida de gases de combustión. El líquido ingresa a la caldera hacia el domo superior el cual se encuentra en la parte más alta de la caldera, luego desciende al domo inferior, estando en el domo inferior pasa unos colectores los cuales están conectados directamente con los tubos dentro de la caldera por esto el termino *acuotubular*², y el agente térmico, en este caso el calor, se encuentra por fuera de los tubos en el lugar llamado *hogar*, en donde se realiza la mezcla entre el aire, el combustible y la chispa para así realizar la combustión.

El combustible usado es fuel oíl #6³ y adicional a este se emplea gas natural, su uso puede ser individual o combinado dependiendo de cuál sea la necesidad. Dentro del hogar el calor es transferido a los tubos de pared y sobrecalentador primario por convección y a los sobrecalentadores secundario por radiación, son los dos procesos de transferencia de calor que se dan dentro de la caldera para obtener el vapor. El aire requerido para la combustión proviene de un ventilador de tiro forzado, el cual succiona el aire del medio ambiente, este cuenta con unas compuertas a las cuales se puede establecer un porcentaje de apertura desde la central de mando, teniendo en cuenta la cantidad de aire fresco necesario para la combustión.

Debido a que la caldera es de presión negativa es necesario la succión de los gases que genera la combustión por medio de un ventilador de tiro inducido, a la salida de este ventilador los gases calientes de la combustión son conducidos hacia un pre-calentador, tipo canasta, el cual es de forma circular y donde se calientan unas paletas que giran y

¹ Se utiliza cuando se requiere agua con bajo contenido en sal o baja conductividad.

² Circulación de agua por dentro de los tubos

³ Uno de los últimos derivados del petróleo

hacen ingresar el aire fresco por un lado, el cual es calentado mientras la canasta gira y el aire fresco para la combustión es ingresado al hogar; por otra parte salen los gases de combustión hacia la chimenea (debe tenerse en cuenta que en ningún momento se tiene contacto directo entre el aire fresco de entrada y los gases de combustión de salida, puesto que esto afectaría la combustión dentro del hogar debido a la cantidad de oxígeno en la entrada de la caldera) con el fin de realizar una transferencia de calor con el aire entrante proveniente del ventilador de tiro forzado y así mejorar la eficiencia de la caldera teniendo un aire de combustión más caliente.

En el sistema de combustión es necesario un BMS (Burner Management System) o sistema de control de quemadores como lo indica la norma NFPA 86, cuya función es permitir la operación segura de la combustión asociada a las calderas, a los hornos, calentadores de proceso, etc. El BMS proporciona un procedimiento seguro para el arranque y corta el flujo del combustible si se detectan las condiciones que afectan la seguridad de la unidad.

Este tipo de caldera cuenta con un combustible adicional el cual es ACPM (Fuel Oil # 2) para el inicio de la combustión o la primera ignición. Esto hace referencia al encendido de la caldera, luego de esto entra en marcha el suministro de Fuel Oil # 6, el cual se encuentra en tanques almacenados los cuales utilizan tres bombas, que suministran el combustible desde los tanques a los quemadores de la caldera con sus respectivos transmisores de presión y flujo del combustible.

Estos son todos los pasos que ocurren en la caldera para poder producir vapor, el cual será utilizado por las turbinas para generar electricidad. Para un mayor entendimiento en general de la caldera y el proceso de producción de vapor se puede apreciar el anexo A, donde se encuentra un diagrama general de toda la caldera base de esta monografía.

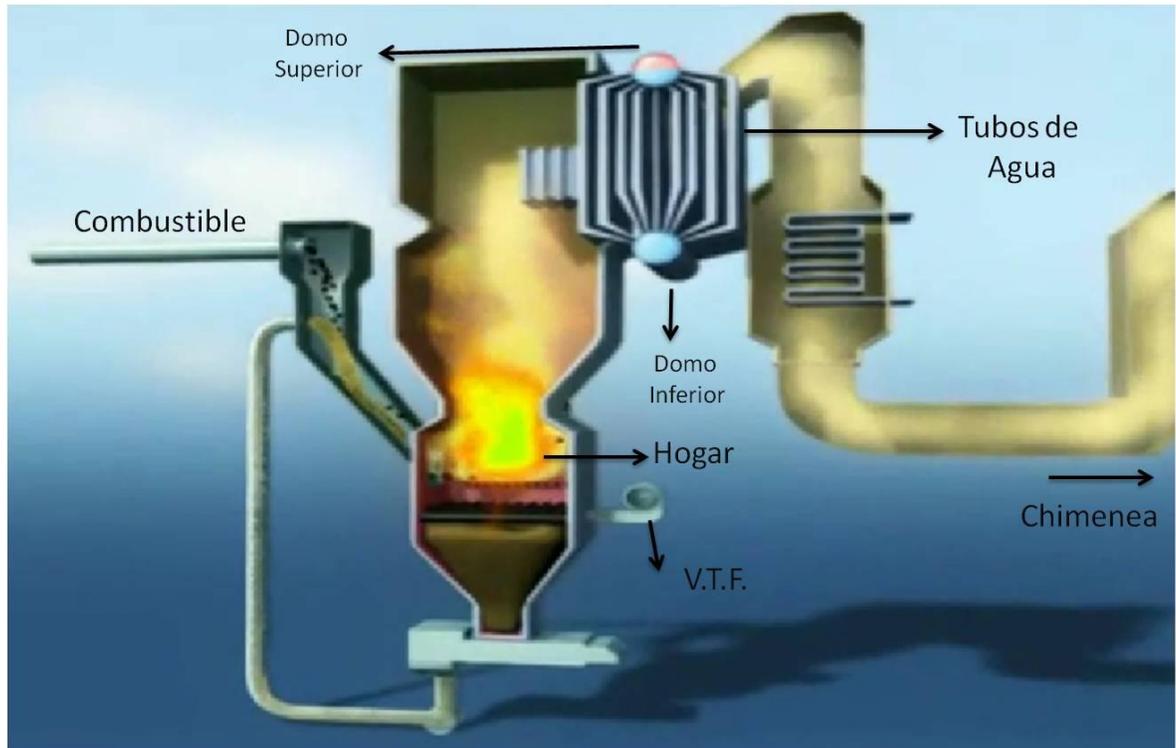
Teniendo en cuenta la complejidad de este proceso se han diseñado estrategias de control para cada uno de estos procesos por individual, las que serán explicadas de forma general teniendo en cuenta las normas aplicables para este tipo de proceso, las normas de seguridad y los requerimientos mínimos de instrumentación para llevar a cabo el control óptimo del proceso que ocurre en la caldera. Pero primero se deben contemplar las características de la caldera base de esta monografía, dentro de estas características se encuentran valores de presión de vapor, de combustible, de alimentación de flujo de aire y vapor, todo esto será expuesto con mayor claridad en el siguiente inciso o punto.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA

A continuación se definirán los componentes más importantes que pueden ser encontrados en un generador de vapor. La caldera base de esta monografía consta de ciertas partes muy comunes en todas las calderas en general, esta caldera pertenece a las de tipo *acuotubular*, con suministro de combustible fuel oíl o gas, con ciclo *RANKINE REGENERATIVO*, calor de conducción y radiante, y presión negativa, con un domo superior e inferior, un banco de serpentines de sobrecalentador primario y un banco de serpentines de sobrecalentador secundario. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.

Estas calderas, constan de un hogar configurado por tubos de agua, como se muestra en la figura 2, en el cual se produce la combustión del combustible y constituyendo la zona de radiación de la caldera. Desde dicho hogar, los gases calientes resultantes de la combustión son conducidos a través del circuito de la caldera, configurado este por paneles de tubos y constituyendo la zona de convección de la caldera. Finalmente, los gases son enviados a la atmósfera a través de la chimenea.

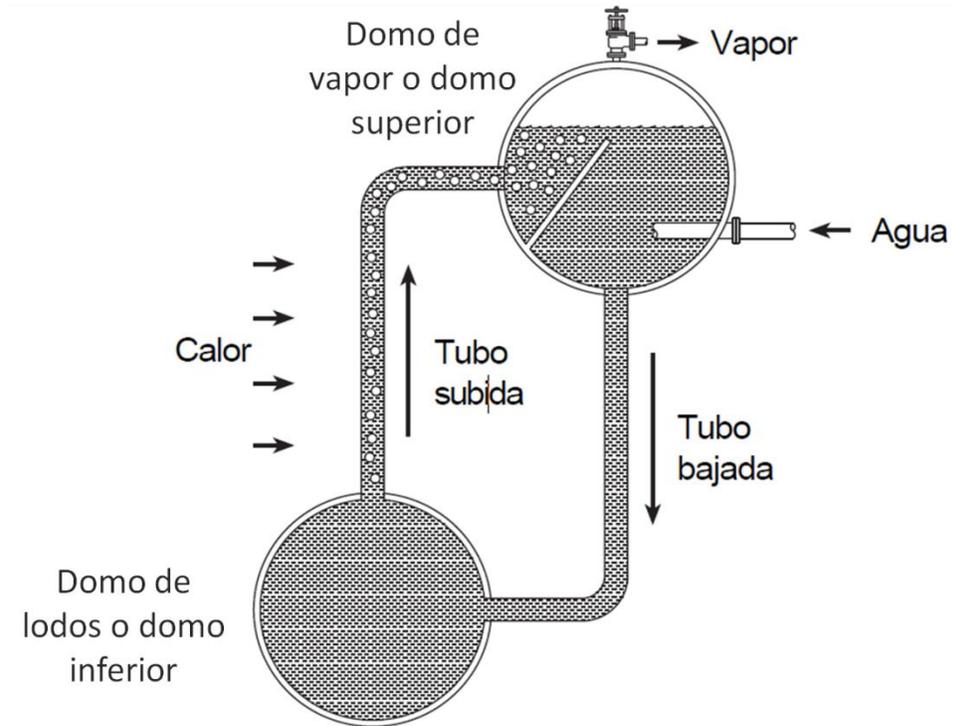
Figura 2. Principio de una caldera acuotubular



Fuente: Calderas JCT S.A. – Funcionamiento caldera acuotubular

Aparte de ser *acuotubular*, esta caldera también pertenece al tipo domo, en particular posee dos domos, inferior y superior, y son llamadas *bi-drum* o *bi-domo*, La función básica del domo es la de separar el vapor de la mezcla vapor-agua y mantener el vapor seco. En la figura 3 se observa el flujo de agua dentro de los dos domos y el ingreso de agua de alimentación y salida de vapor saturado.

Figura 3. Disposición física de los domos en una caldera acuotubular



Fuente: calderas y accesorios “SPIRAX SARCO”

Además de esto, la caldera posee un sobrecalentador el cual se encarga de la adición de calor al vapor después de la evaporación o el cambio de estado, los cuales se componen de elementos tubulares expuestos a los productos gaseosos a alta temperatura de la combustión.

Las ventajas del sobrecalentamiento en la generación de potencia son resultado de la ganancia termodinámica en el Ciclo *Rankine* y de la reducción de las pérdidas de calor debidas a la humedad en las etapas de baja de presión en la turbina. Con presiones y temperaturas altas del vapor se dispone de más energía útil.

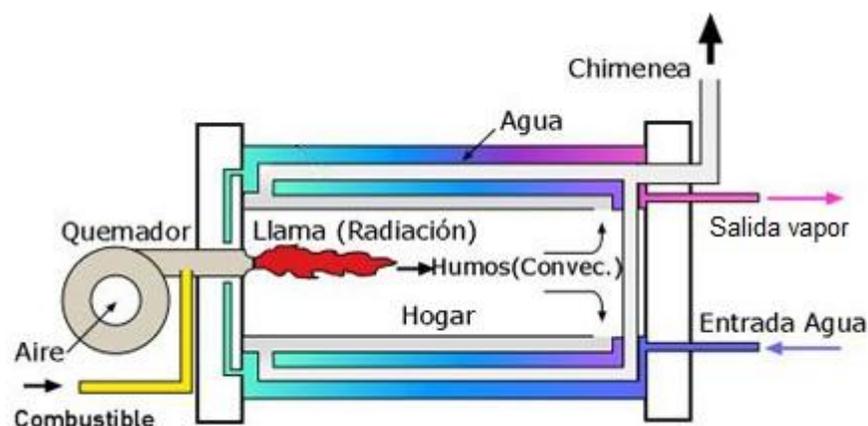
El término “sobrecalentado” se aplica al vapor de más alta presión, teniendo en cuenta que el vapor saturado a la salida del domo se encuentra a una presión inferior al vapor

sobrecalentado. Con presión de vapor inicial alta pueden emplearse una o más etapas de sobrecalentamientos con el fin de mejorar la eficiencia térmica. Los sobrecalentadores se clasifican en dos grandes grupos: Radiantes o de Convección, esta caldera posee los dos tipos de sobrecalentamientos como lo indica la figura 4 y se explicaran a continuación.

Sobrecalentadores Radiantes: Por lo general se disponen para expansión directa a los gases del hogar y, en algunos diseños, forman parte de la cubierta de éste. En otros diseños, la superficie se dispone en forma de espiras tubulares o planchas, con amplio espaciado lateral extendiéndose hacia el hogar. Esta superficie se expone a los gases a alta temperatura del hogar que se mueve a velocidades relativamente bajas, así que la transferencia de calor se hace por radiación.

Sobrecalentadores de Convección: Se instalan más allá de la salida del hogar, donde la temperatura del gas son más bajas que las de las zonas en las que se usan los sobrecalentadores de tipo radiante. Por lo común, los tubos se disponen en la forma de elementos paralelos, con poco espaciado lateral y en bancos de tubos que se extienden parcial o completamente a través de la corriente de gas, con el gas fluyendo a través de los espacios relativamente angostos entre los tubos.

Figura 4. Principio de sobrecalentamiento por convección y radiación

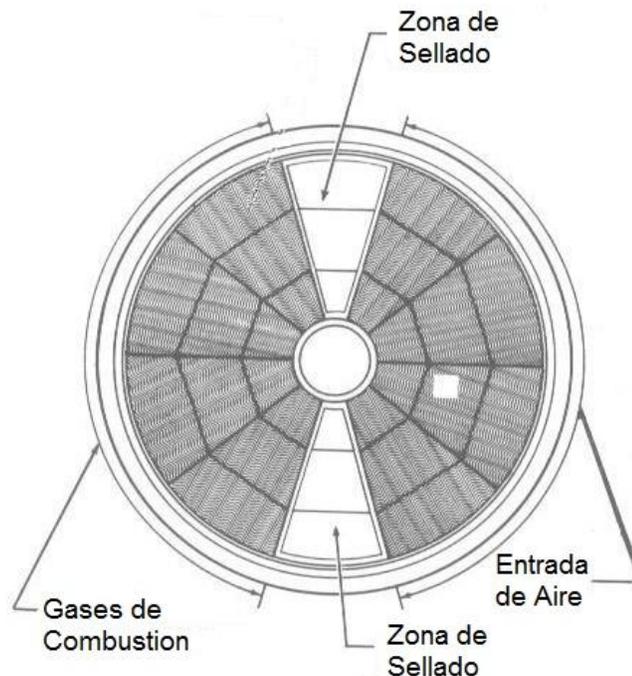


Fuente: Sistemas de Calefacción: Calderas y Equipos Terminales. GAS NATURAL FENOSA.

En la sección de *sobrecalentadores* la caldera posee un *spray* (rocío) Atemperador, también conocidos como *desobrecalentadores*, son boquillas atomizadoras en los tubos de la caldera entre los *sobrecalentadores*. Estas boquillas atomizadoras suministran una fina niebla de agua pura en el camino del flujo del vapor para prevenir el daño del tubo por sobrecalentamiento.

Por ultimo esta caldera cuenta con *precalentadores* de aire los cuales se encargan de calentar el aire entrante a la combustión por encima de la temperatura ambiente, esto se logra haciendo una transferencia de calor entre los gases calientes de salida hacia la chimenea y el aire de entrada, por medio de una canasta de paletas metálicas el cual va girando mientras se la transferencia de calor entre los dos gases de entrada y salida, tal como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Precalentador de aire

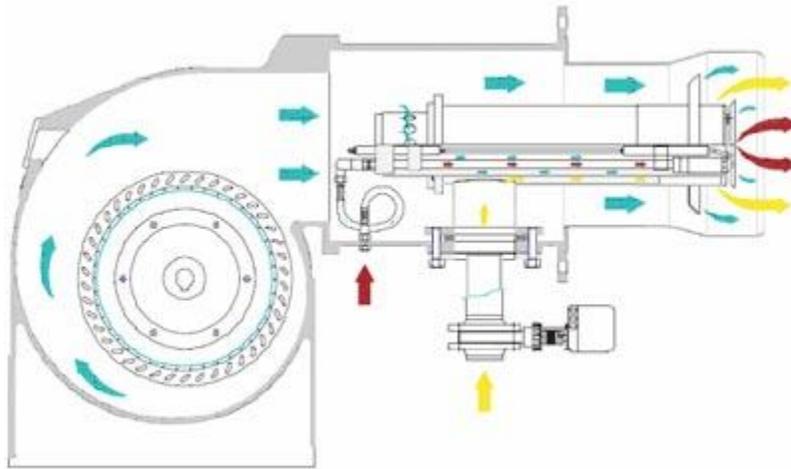


Fuente: Calentadores de aire (Generadores de vapor), Francisco Soler Preciado

Por otra parte, en la zona de combustión se encuentran los quemadores, los cuales son encargados de suministrar y acondicionar el combustible para mezclarlo con el aire y

obtener una buena combustión. Deben producir una llama estable y uniforme de manera que se realice una cierta distribución en el hogar, un ejemplo de ellos se observa en la figura 6.

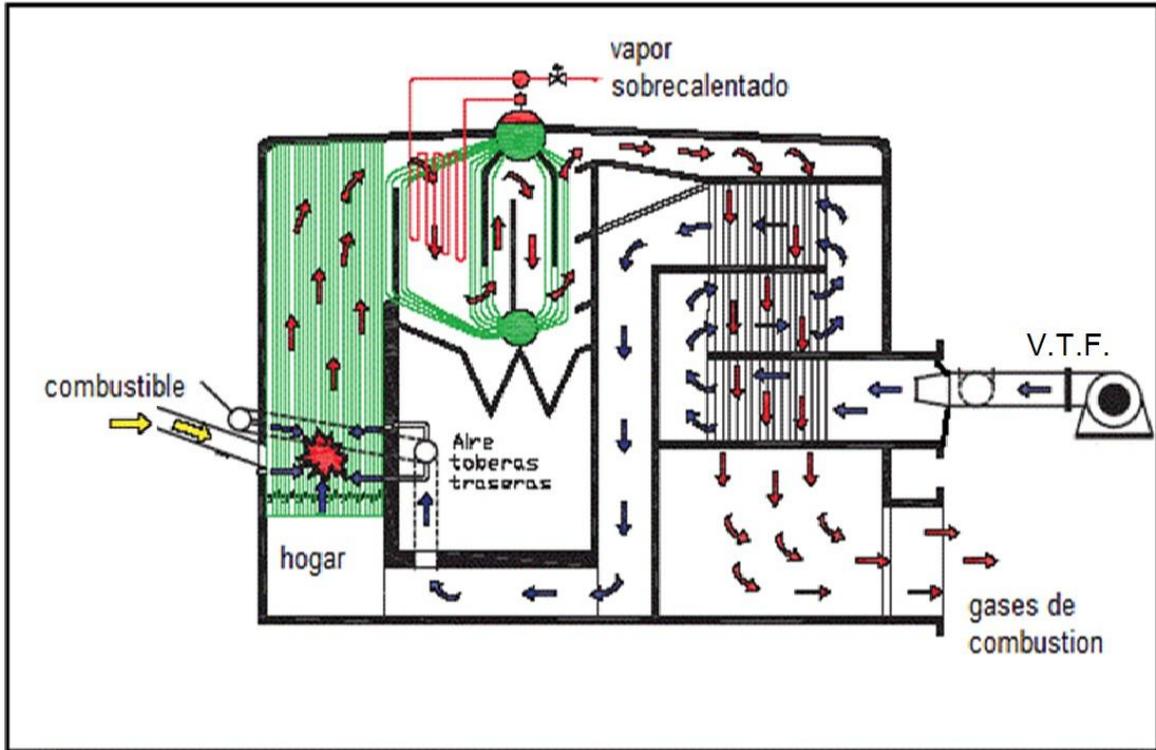
Figura 6. Quemadores de fuel oil #6 y gas



Fuente: Instrumentación control y combustión Ingeniería

En general la caldera viene dada por la figura 7 en la cual se observa, los dos domos inferior y superior, el sobrecalentador, se puede apreciar gráficamente la circulación del aire primario de entrada, que es ingresado a la caldera gracias a un ventilador de tiro forzado, y se observa como es calentado por los gases de combustión de salida, además del hogar donde se realiza todo el proceso de combustión.

Figura 7. Esquema general de una caldera y flujo de los gases de salida y aire de combustión.



Fuente: Inyección de aire secundario caliente en calderas de vapor y su influencia en el rendimiento térmico. Marcos A. Golato

En las diferentes partes de esta caldera se desarrollan los lazos de control para cada una de las variables necesarias para mantener una producción de vapor eficaz y segura, en la sección de domos y agua de alimentación se emplea el control de nivel, el cual se encarga de entregar la suficiente cantidad de agua para que coincida con la tasa de evaporación. En el hogar se presenta el lazo de control de presión, donde se busca controlar la presión interna por debajo de la presión atmosférica con un ventilador de tiro inducido. A la salida de los domos se encuentra los conductos, los cuales transportan el vapor saturado para luego ser sobrecalentado, es en este lugar donde se encuentra el lazo de control de temperatura, que por medio de atemperación busca controlar el vapor sobrecalentado de salida.

Además de los mencionados anteriormente es de vital importancia el lazo de control de combustión, el cual debe controlar la relación combustible-aire necesaria para realizar una quema más eficaz, aquí interviene físicamente el aire de entrada por el ventilador de tiro forzado y el sistema de ingreso de combustible. A continuación se procederá a explicar cada uno de estos lazos de control, detallando los objetivos de cada lazo, características e influencia en la producción de vapor además de la instrumentación necesaria para la implementación de dicho control, inicialmente se procederá con el lazo de control de nivel en la siguiente unidad.

2. LAZO DE CONTROL DE NIVEL

2.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE NIVEL

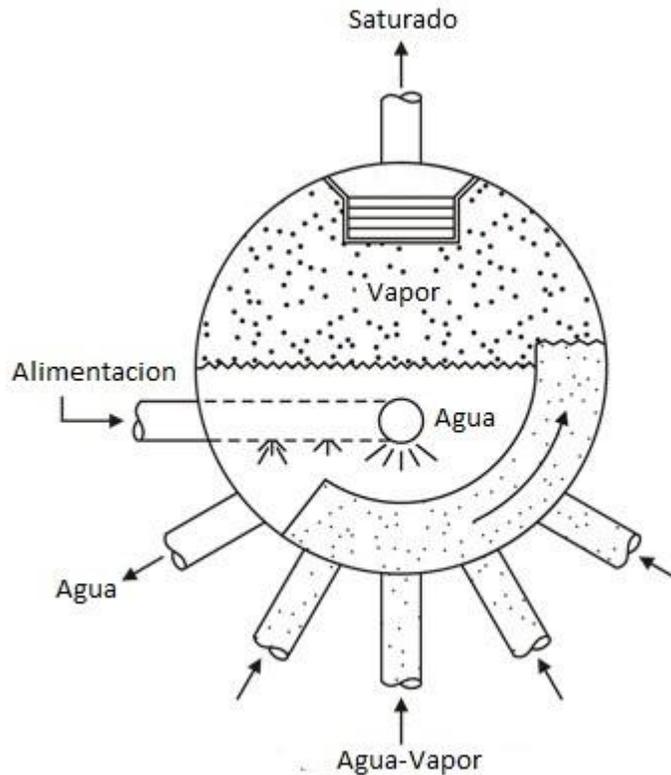
El nivel del domo es una variable crítica que implica la operación segura en la caldera.

El objetivo del sistema de control de agua alimentación parece simple: suministrar la suficiente agua a la caldera para que coincida con la tasa de evaporación. Sin embargo, como suele ser el caso en calderas, esto es una misión muy compleja de cumplir. Hay dificultades incluso en la medición básica del nivel del domo de la cual el sistema de control depende. El diseño del sistema de control se complica aún más por las múltiples interacciones transitorias que ocurren dentro de la caldera y por el hecho de que algunos de los efectos de estas interacciones se comportan de manera distinta en diferentes puntos del perfil de carga de la caldera. Es por tanto necesario el diseño de un sistema de control que abarque la mayor parte de posibilidades de comportamiento en condiciones operacionales, y además se desarrolle de una manera segura, confiable y rentable.

Es necesario que el nivel de agua se mantenga dentro de una banda alrededor del punto de *setpoint* del controlador. Un nivel bajo puede dejar vacíos algunos tubos de la caldera y así quedar expuestos al estrés producido por el calor (sobrecalentamiento). Mientras que un nivel excesivo se corre el riesgo de que junto con el vapor llegue agua a la turbina.

El control de nivel de una caldera tiene varias particularidades debido su especial comportamiento. Los principales fenómenos son los de *Contracción* y *Expansión* que se producen en el nivel durante un incremento o decremento en la carga tal como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Fenómenos de Contracción y Expansión



Fuente: Boiler feedwater control. G. F. (Jerry) Gilman

Para cada carga de la caldera hay un cierto volumen de agua que se encuentra ocupado por burbujas de vapor. En los primeros momentos que siguen a un incremento instantáneo de carga, sería de esperar una disminución del nivel en el domo pero estos fenómenos modifican el nivel en la dirección opuesta a la esperada ante el cambio de carga. Así, ante un incremento en la demanda de vapor, el nivel en lugar de disminuir al extraerse más vapor, se incrementa temporalmente debido a la disminución de la presión provocada por el aumento de consumo, como consecuencia, se producen más burbujas, ocasionando un aumento en el volumen de agua, fenómeno de *Expansión*. Por el contrario, ante un aumento de la presión por haber disminuido la carga, el nivel de agua tiende a contraer su volumen, ocasionando el fenómeno de *Contracción*.

Aunque son solo efectos temporales no se pueden subestimar debido a que causan mediciones erróneas y por tanto decisiones equivocadas en el sistema de control de nivel.

De acuerdo a todo lo anterior, el sistema de control del agua de alimentación necesita responder rápidamente a los cambios de carga para mantener constante la cantidad de agua almacenada. Para ello es necesario comprender los mecanismos detallados de agua de alimentación y sistemas de vapor y ser conscientes de los requisitos de operación.

2.2 OBJETIVOS DEL CONTROL DE NIVEL

Los principales objetivos del control de nivel en una caldera son los siguientes:

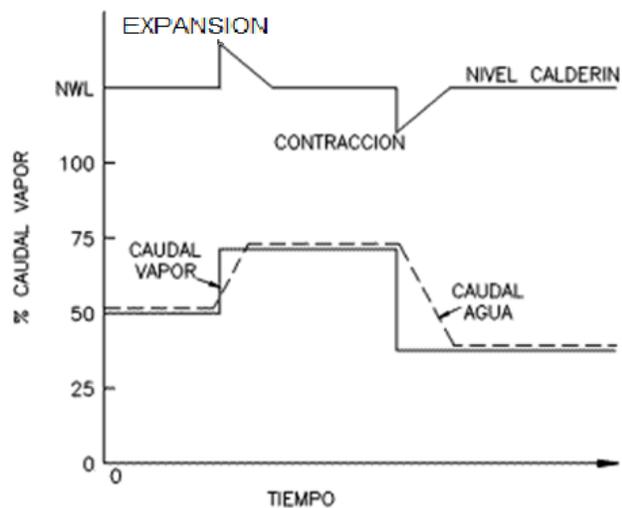
- Controlar el nivel en el valor deseado previniendo daños en la caldera.
- Minimizar la interacción con el control de combustión.
- Crear suaves cambios en el agua almacenada ante los cambios de carga.
- Equilibrar adecuadamente la salida de vapor con la entrada de agua.
- Compensar las variaciones de presión del agua de alimentación sin perturbar el proceso ni modificar el punto de operación.

Particularmente importante es el minimizar la interacción con el control de combustión. Esta interacción se acentúa con el suministro desigual de agua de alimentación, que afecta a la presión de vapor y que conlleva modificaciones en la demanda de fuego sin existir variaciones en la demanda de vapor. Estas variaciones en el fuego de la caldera producen a su vez incrementos y decrementos en la presión con las consiguientes perturbaciones en el domo que acentúan el problema.

2.3 ESTRATEGIA DE CONTROL DE NIVEL E INSTRUMENTACIÓN

Con el fin de lograr los objetivos del control de nivel del domo teniendo en cuenta los fenómenos de *Contracción* y *Expansión*, se tomará como patrón lo expuesto en la figura 9. Cuando se incremente el caudal de vapor, se incrementará el caudal de agua si no se ha presentado el fenómeno de *Expansión* en el nivel. Un incremento en el nivel producirá un decremento en el caudal de agua si no se ha incrementado el caudal de vapor.

Figura 9. Relaciones deseadas agua-vapor



Fuente: Curso de control de calderas. José Carlos Villajulca

2.3.1 Control de nivel de tres elementos. De acuerdo a la norma ANSI/ISA-S77.42.01-1999: “Fossil Fuel Power Plant Feedwater Control System — Drum Type” es la estrategia de control más utilizada y es empleada en calderas que experimentan rangos de cambio grandes y de carga rápida. El control de agua de alimentación de tres elementos requiere una señal de nivel compensada por presión (en caso de que los instrumentos utilizados para la medición de nivel sean sensibles a variaciones de

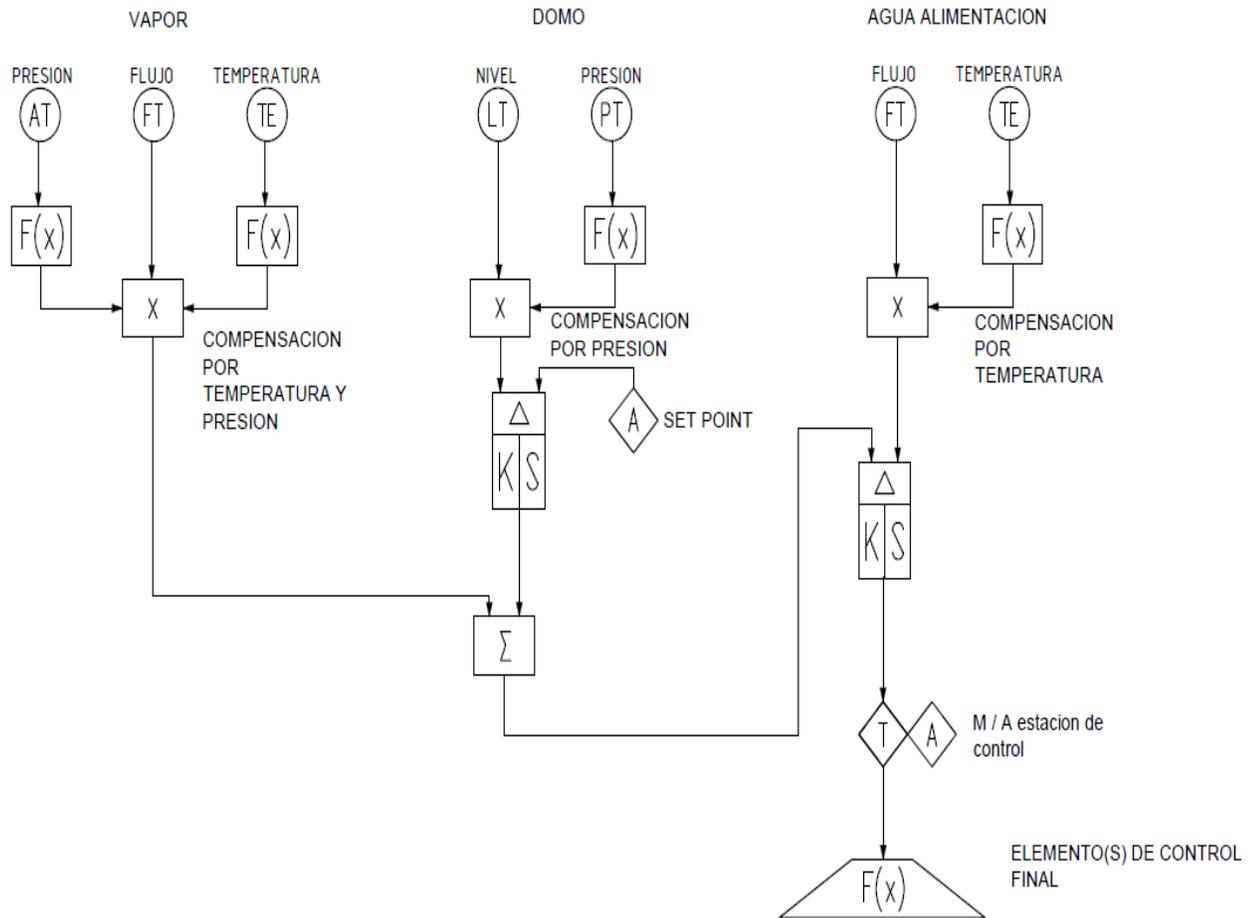
densidad), una señal de *setpoint* para el nivel, una señal de *feedforward* desde el transmisor de flujo de vapor compensada por temperatura, y una señal desde el transmisor de flujo de agua de alimentación la cual debería ser compensada por temperatura si la medición es afectada por esta.

En el control de tres elementos mostrado en la figura 10 vemos que se utiliza el flujo de vapor y de agua además del nivel del domo.

La señal de flujo de vapor se mide junto con la señal de nivel del domo. La señal de flujo de vapor, la cual representa la demanda de carga, es usada en el lazo de control *feedforward* con el fin de anticipar la necesidad de un incremento en la alimentación de agua para mantener el nivel del domo constante. El controlador de nivel del domo reajusta la demanda de agua para mantener dicho nivel en su *setpoint*. Si cambia el flujo de vapor, la señal *feedforward* proporciona un cambio inmediato en el flujo de agua con el fin de mantener fijo el nivel, la salida del sumador directamente coloca el *setpoint* del controlador de agua alimentación.

Mediante el controlador de flujo de agua se compensan las alteraciones que se producen por la falta de repetitividad de la válvula de control cuando no se mantienen constantes las variables que afectan al agua de alimentación.

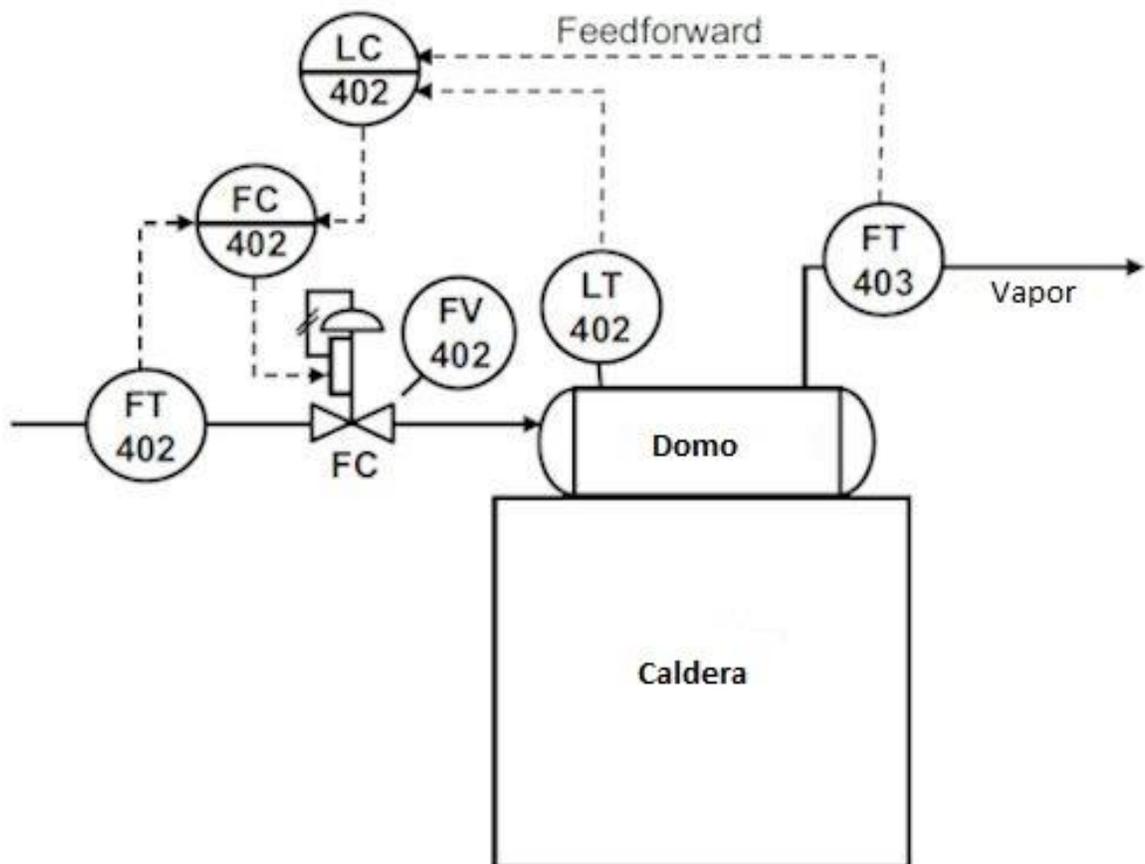
Figura 10. Control de nivel de tres elementos.
(Usando el formato SAMA PMC 22.1-1981)



Fuente: Norma ANSI/ISA-S77.42.01-1999: "Fossil Fuel Power Plant Feedwater Control System — Drum Type"

Para la implementación, tal como se describe en la figura 11, se medirán: el nivel (LT), la presión (PT) para la corrección de aquél si fuese necesario, el caudal de agua de alimentación (FT) y el caudal de vapor (FT). Estas medidas de caudal deben ser corregidas, por temperatura y por presión y temperatura respectivamente si su medición está basada en la presión diferencial y existen importantes variaciones en estas variables. La cantidad de agua aportada en cada momento se manipulará mediante una válvula de control (LV).

Figura 11. Implementación del control de nivel de tres elementos.



Fuente: Applications boiler drum level control. Terry Blevins

3. LAZO DE CONTROL DE DEMANDA

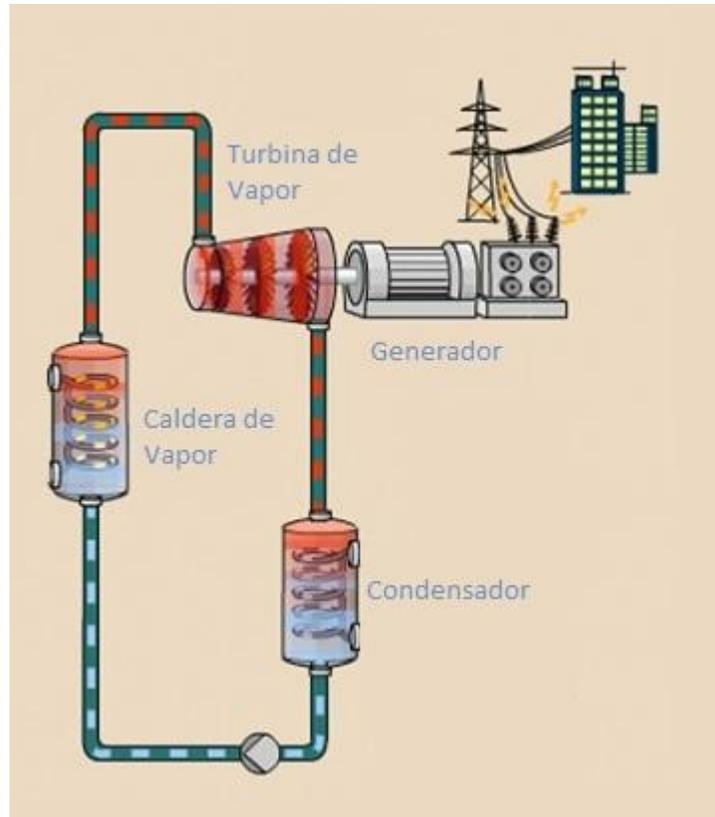
3.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE DEMANDA

Al ser simplemente la caldera un tramo en el proceso de generación de energía a base de vapor, como se muestra en la figura 12, experimentara variaciones en la carga de acuerdo a las necesidades del cliente, esto se ve reflejado en un suministro mayor o menor de vapor por parte de la caldera a la turbina, por este motivo el control en la demanda es crucial, esta demanda se verá definida por los límites mínimos y máximos de generación, además de los límites de razón de cambio propios de la turbina.

La presión del vapor es la variable clave, la cual indica equilibrio entre la oferta y la demanda de vapor. Si la oferta supera la demanda, la presión aumentara, en caso contrario cuando la demanda supera a la oferta la presión disminuye. La magnitud de la caída de la presión depende del volumen de agua, del de vapor, de la magnitud del cambio en la demanda y de la demanda en sí.

Cuando la unidad experimenta fluctuaciones en la demanda debido a cambios en el proceso, es utilizada una señal *feedforward* de flujo de vapor junto con la señal de presión de vapor.

Figura 12. Sistema de producción de energía a base de vapor



Fuente: Steam Boiler System, Industrial Boilers

3.2 OBJETIVOS DEL CONTROL DE DEMANDA

Con el lazo de control de demanda se busca generar una señal de demanda de carga para los quemadores que mantenga el equilibrio entre la oferta y demanda dada por el sistema.

Manteniendo este equilibrio se asegura una producción de vapor en las condiciones de operación necesarias para todo el rango de funcionamiento.

3.3 ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE DEMANDA E INSTRUMENTACIÓN

3.3.1 Control a dos elementos. De acuerdo a la norma ANSI/ISA-S77.43-1994: “Fossil Fuel Power Plant Unit/Plant Demand Development — Drum Type” es el mínimo sistema de control requerido para alcanzar las necesidades de la producción de vapor en las siguientes aplicaciones:

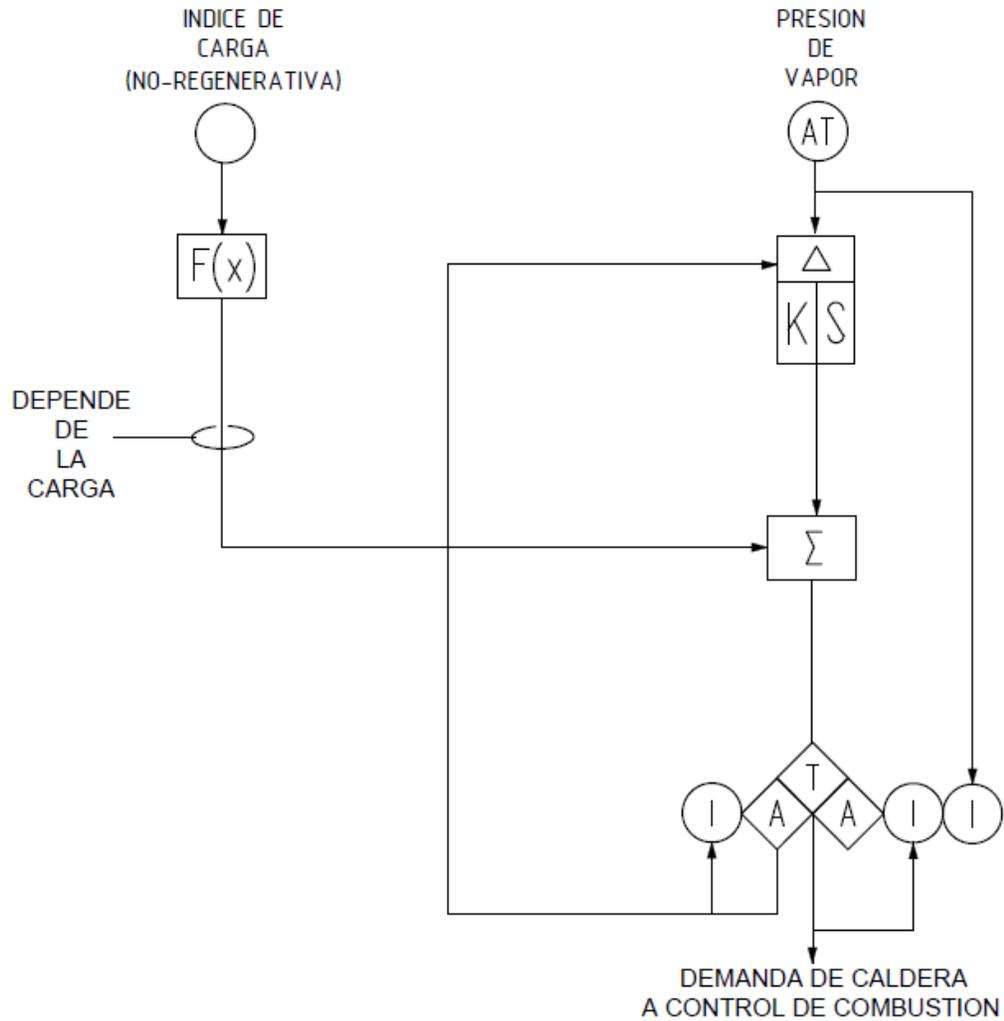
- Procesos con cambios frecuentes o rápidos de carga
- Procesos donde la presión de vapor constante es crítica

Tal como se describe en la figura 13, el sistema de control de dos elementos requiere una señal de presión de vapor, una señal del índice de carga y un *setpoint* de presión de vapor.

El índice de carga es limitado por un controlador de presión de vapor o su equivalente funcional para desarrollar una demanda de carga de la caldera. La señal de índice de carga no se verá afectada por las perturbaciones de la caldera (es decir, que es no regenerativa).

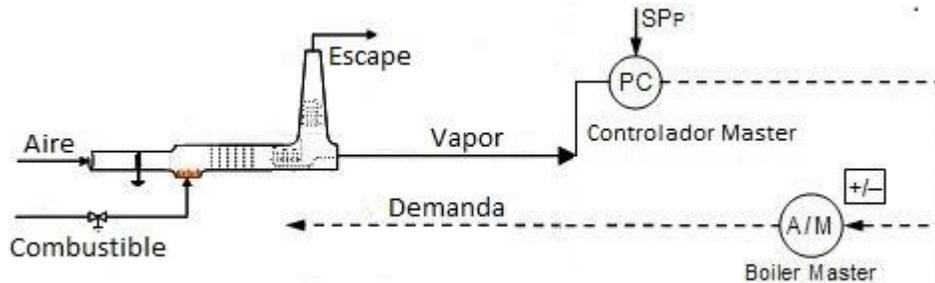
La presión del vapor es comparada con un *setpoint*, para determinar si coincide con la demanda de generación de vapor. Si no coinciden, se producirá un error, y a través de un regulador de presión, se ajusta la demanda de carga de la caldera.

Figura 13. Diagrama de control funcional de un sistema típico de dos elementos



Fuente: Norma ANSI/ISA-S77.43-1994: "Fossil Fuel Power Plant Unit/Plant Demand Development — Drum Type"

Figura 14. Implementación del control de demanda



Fuente: Ratio with Cross-Limiting Override Control of a Combustion Process, By Allen Houtz and Doug Cooper

El control maestro de demanda descrito en la figura 14, es un sistema de dos elementos (variables) en el cual las señales de flujo y presión de vapor son utilizadas como los parámetros básicos para la regulación de entrada de combustible y aire de combustión al sistema de quemadores de la caldera.

Estas variables son medidas directamente en el cabezal de vapor vivo a la entrada de la primera etapa de la turbina por medio de los medidores transmisores de presión y de flujo.

Basado en la diferencia entre el *Setpoint* y la medida de presión en el cabezal, el controlador envía la señal de salida del módulo de control de demanda total de combustible (BTU, porque se efectúa con la suma total de los poderes caloríficos de los combustibles) y aire de combustión, esta señal de demanda es dirigida hacia el controlador de combustible y de aire de combustión.

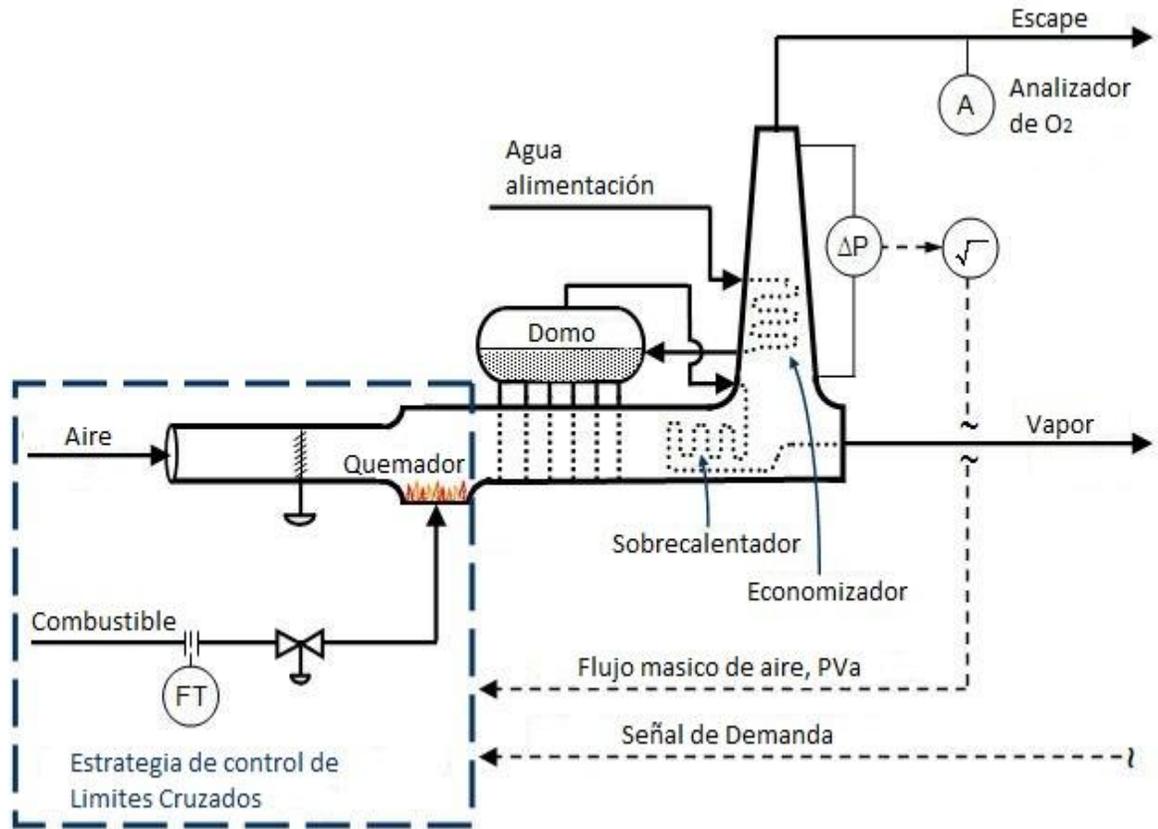
4. LAZO CONTROL DE COMBUSTIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE COMBUSTIÓN

La principal función del control de combustión es suministrar en cierta proporción aire y combustible al quemador para satisfacer la relación de combustión, logrando que se lleve a cabo eficientemente. Una cantidad insuficiente de flujo de aire puede ocasionar una combustión incompleta causando acumulación de gases de combustible que pueden llegar a explotar al contacto con los puntos calientes del hogar. A su vez un exceso de flujo de aire ahogaría la combustión y no permitiría la formación de la llama. Además, el proceso de combustión dentro del hogar debe ser controlado sin importar los cambios en respuesta de la demanda de carga. La mayor energía perdida en la caldera proviene del calor que escapa en los gases de combustión, de esta manera el incremento de aire incrementa las pérdidas de energía. El valor adecuado de exceso de aire está en función de la carga de la caldera, la cantidad de combustible, fuga de aire a través de quemadores, la temperatura del vapor, la estabilidad de la llama, y las pérdidas de energía.

El cuadro punteado de la figura 15, representa las variables que se tienen en cuenta para el control de combustión en calderas de vapor.

Figura 15. Descripción del proceso de control de combustión en calderas



Fuente: Ratio with Cross-Limiting Override Control of a Combustion Process, By Allen Houtz and Doug Cooper

4.2 OBJETIVOS DEL CONTROL DE COMBUSTIÓN

De acuerdo con los requerimientos de la NFPA 8502: *“Standard For The Prevention Of Furnace Exposions/Implosions In Multiple Burner Boilers”*, el sistema de control de combustión debe cumplir con las siguientes premisas:

- Debe mantener la relación aire-combustible en un rango que asegure una combustión continua y una llama estable en todas las condiciones de operación.
- La demanda de combustible no debe incrementar nunca el flujo de combustible por encima del de aire.
- La demanda de combustible no debe exceder la capacidad de los ventiladores en servicio.
- Cuando se queman múltiples combustibles, se totalizarán basándose en sus poderes caloríficos. La aportación de calor a una zona o quemador no debe exceder los límites especificados.

Teniendo en cuenta las anteriores premisas, los objetivos principales del control de combustión son los siguientes:

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

- Mantener, dentro de los requisitos del punto anterior, un exceso de aire mínimo que permita conseguir los mayores niveles de eficacia posibles.
- Mantener las demandas a los distintos quemadores dentro de los límites de su capacidad de operación, asegurando con ello el correcto funcionamiento de éstos.

4.3 ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE COMBUSTION E INSTRUMENTACIÓN

4.3.1 Control de combustión con límites cruzados. Con el fin de aumentar el nivel de seguridad en la relación aire-combustible se utiliza un sistema llamado control de combustión con límites cruzados.

Considerando primero el estado estacionario de este sistema mostrado en la figura 16. Los controladores de combustible y aire actúan para mantener sus medidas iguales a su *setpoint*. Como consecuencia el sistema se encuentra equilibrado entre aporte y demanda.

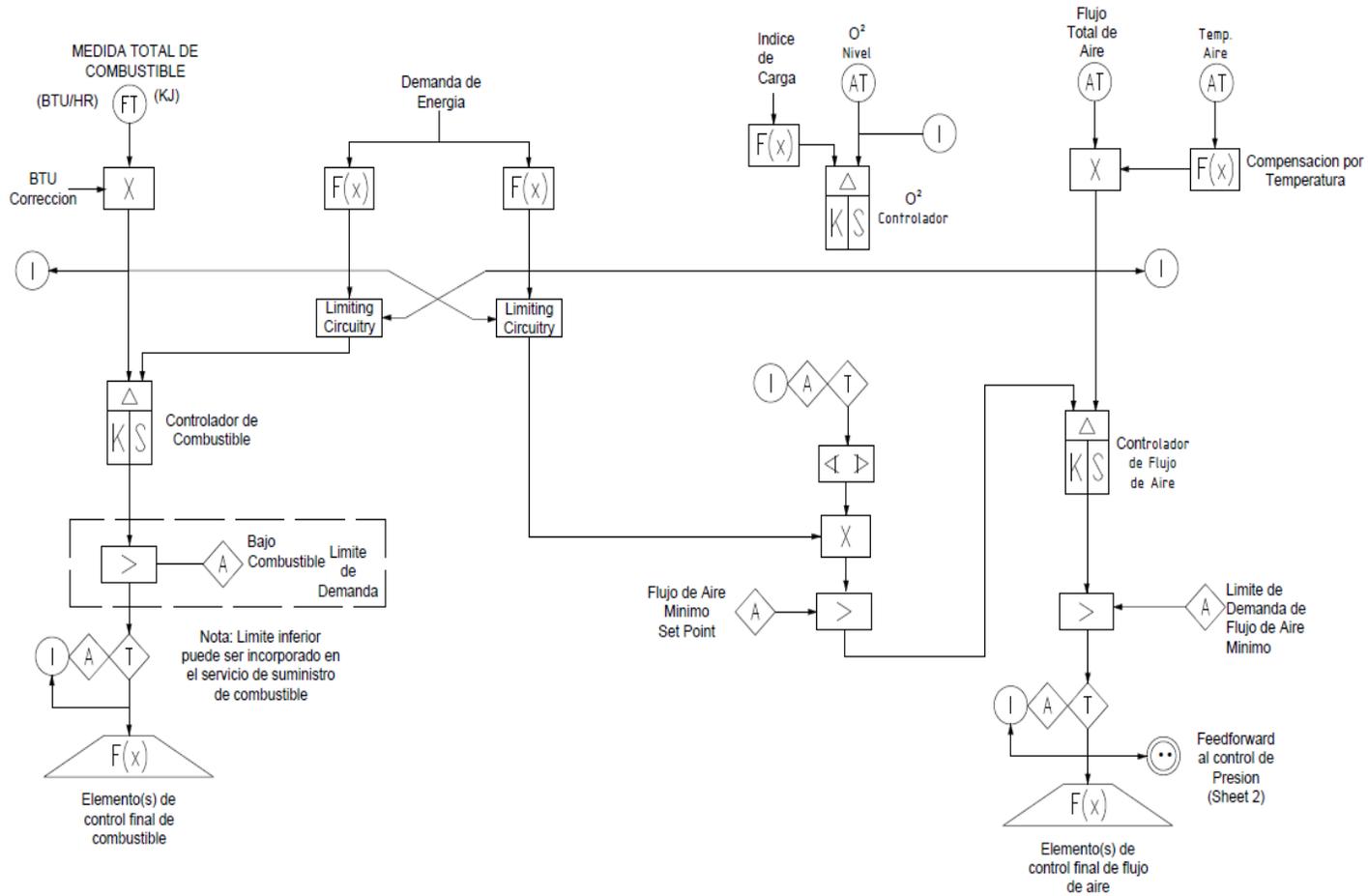
Con esta disposición, la demanda de carga de la caldera pasa a través de unos selectores de máxima y mínima, en donde es comparada con el flujo total de combustible y aire respectivamente. La salida del selector de máxima se envía como *setpoint* del controlador de aire, y la del de mínima como *setpoint* del de combustible.

De este forma, ante un aumento en la demanda de carga, es el flujo de aire el que primero se incrementa y según lo va haciendo se incrementa el de combustible. Cuando por el contrario, se produce una disminución en la demanda de carga, es el flujo de combustible el que se reduce en primer lugar y el de aire lo va haciendo en la medida en que lo hace aquél. Igualmente, si por cualquier motivo se produce una disminución en el flujo de aire, o un aumento en el de combustible inesperado, los selectores actúan de forma que el flujo de aire se ajusta inmediatamente. Así se asegura que en todo momento el flujo de aire existe, al menos, en la cantidad necesaria para asegurar una combustión completa.

Con este sistema no se controla realmente el flujo de aire, sino el de combustible equivalente al aire. Esto es así porque los selectores han de comparar medidas dadas en las mismas unidades de ingeniería, en este caso unidades de caudal de combustible. Por eso se utiliza la relación combustible/aire, para que al multiplicar por el flujo de aire, su salida venga dada en unidades de flujo de combustible equivalente al flujo de aire.

La ventaja de este sistema está en que durante un incremento de carga, la demanda de combustible no puede incrementar hasta que un incremento en el flujo real de aire sea medido. De igual forma durante un decremento de carga, la demanda de aire no puede bajar hasta que un decremento en el flujo real de combustible sea medido.

Figura 16. Control de combustión con límites cruzados

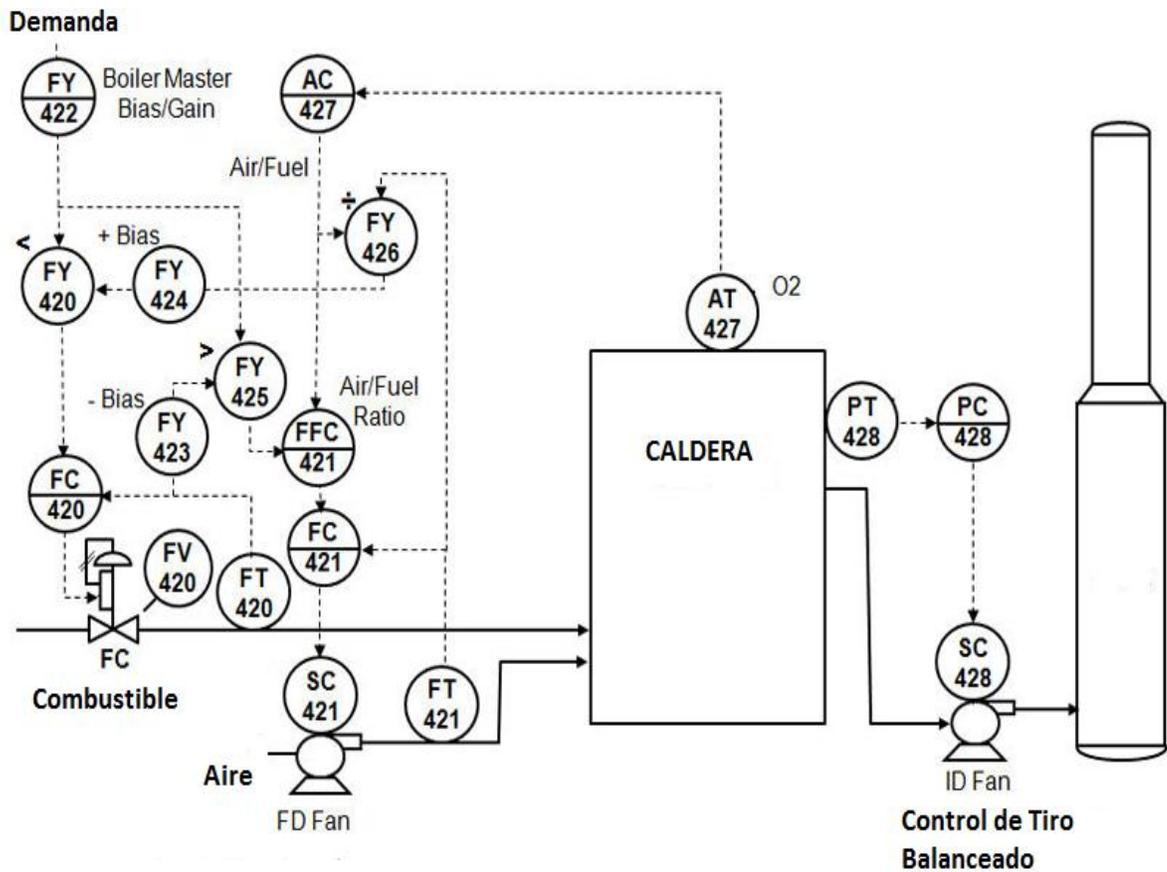


Fuente: Norma ISA-77.41-1992 "Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls"

A continuación se explicará la implementación de la estrategia de control, con base a la figura 17.

Con el fin de mantener la relación aire-combustible es necesario un suministro de aire de combustión continuo y mayor que un mínimo, para esto se supervisará que el ventilador de tiro forzado está en servicio (señal que se obtendrá desde el contactor del ventilador) y que el flujo de aire de combustión no es bajo (FT). De acuerdo a la norma ISA-77.41-1992 "Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls", es aconsejable la medición de la temperatura (TT) del flujo de aire, cuando la temperatura del flujo varía de 50 ° F (28 ° C) o más, la medida de flujo volumétrico de aire deberá ser compensada por la densidad de flujo de aire para determinar el flujo másico real.

Figura 17. Implementación del control de combustión con límites cruzados



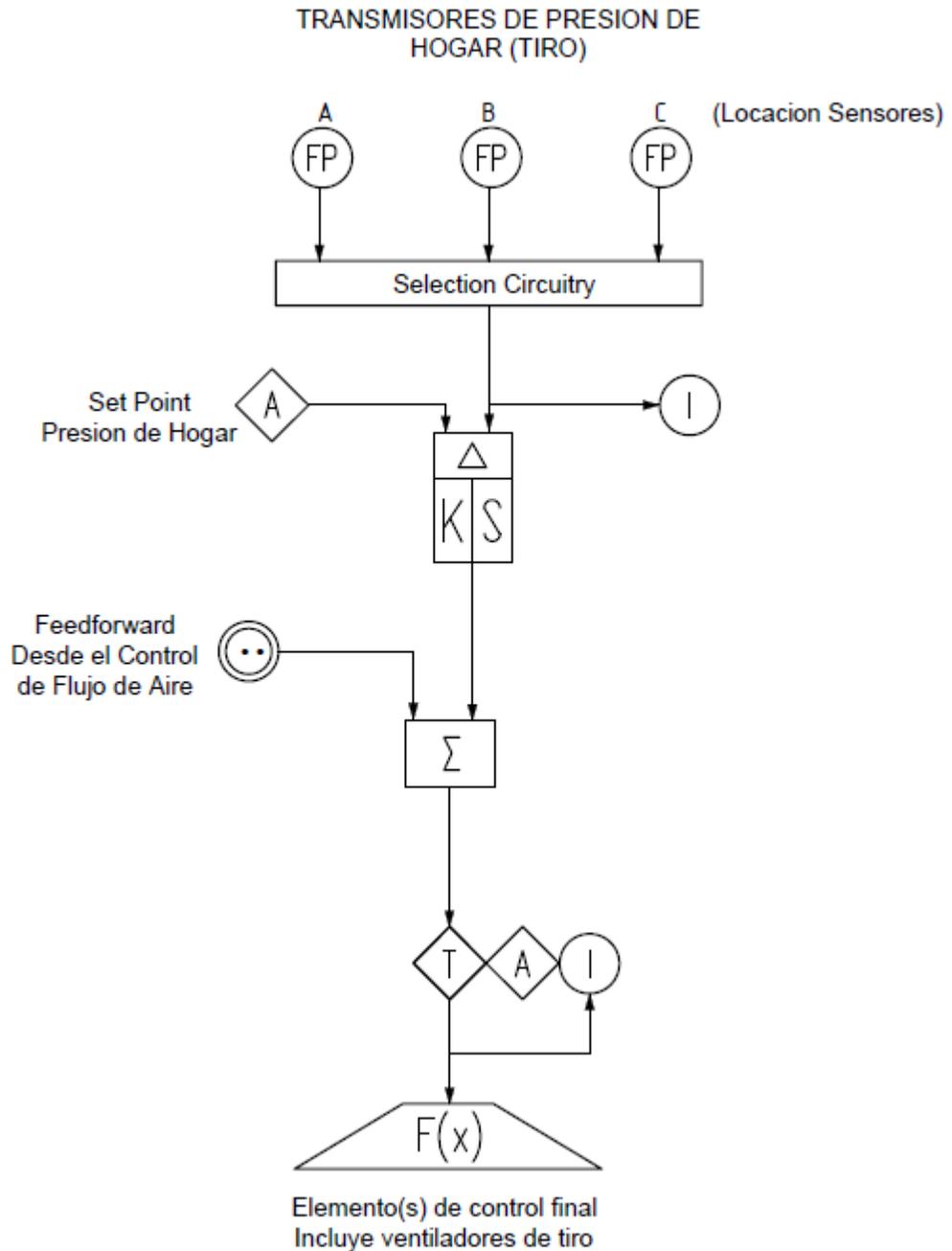
Fuente: Applications power boiler combustión control, by Terry Blevins

Al ser una caldera capaz de operar a distintas cargas entre un mínimo y un máximo, el caudal de aire de combustión deber ser ajustado a la cantidad adecuada para la cantidad de combustible que se está suministrando. Para ello además de la medida de flujo de aire (FT) se necesitara un actuador sobre los álabes de entrada del ventilador con el fin de poder modificar su apertura y por tanto la aportación de aire.

Al estar el hogar diseñado para soportar una presión determinada, se debe proteger éste por alta presión (PT) para evitar posible deformaciones de la envolvente. De acuerdo a la norma ISA-77.41-1992 *"Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls"* la presión del hogar debe ser medida con tres transmisores de presión de hogar, cada uno en zonas de separadas.

El control de la presión del hogar es requerido en calderas de tiro balanceado. Por lo general es el ventilador de tiro inducido el utilizado para controlar la presión de hogar. Un diagrama funcional típico de control de presión se muestra a continuación.

Figura 18. Diagrama funcional típico de control de presión.



Fuente: Norma ISA-77.41-1992 "Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls"

Las calderas por lo general suelen permitir la quema de gas y fuel oíl por separado o juntos. Para esto deben tomarse medidas con el fin de asegurar que la proporción aire-combustible se mantenga para los múltiples combustibles empleados. Esto se logra mediante la suma de los flujos individuales de combustible en sus valores bases de Btu (kJ), así la salida se convierte en el “combustible total” que se empleara en el cálculo de la proporción aire-combustible.

Para poder modular correctamente la aportación de flujo de combustible de acuerdo con la carga de caldera se necesitará la medida de flujo de combustible (FT) y una válvula de control (FV) con el fin de poder modificar la aportación de flujo de combustible. Si las condiciones de presión y temperatura del combustible pueden variar sensiblemente, es aconsejable la medición estas variables para la corrección de la medida de flujo de combustible si la medida de éste se obtiene de una lectura de presión diferencial.

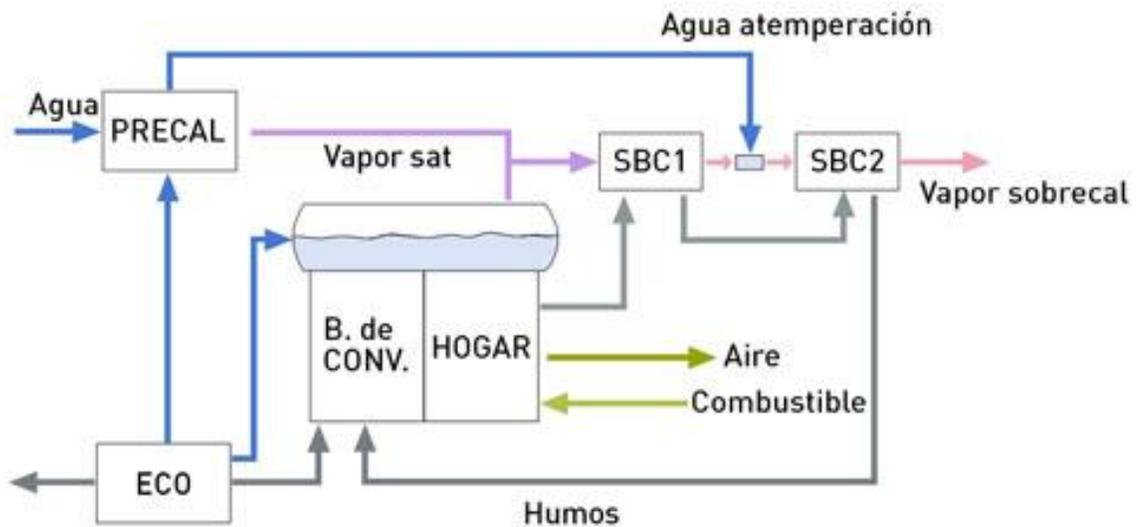
A fin de que la combustión sea lo más eficaz posible, manteniendo el exceso de aire lo más bajo posible, se medirá el exceso de oxígeno existente en los gases, con un analizador de oxígeno (AT).

5. LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA

5.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE TEMPERATURA

El lazo de control de temperatura en una caldera, es empleado para controlar la temperatura de vapor vivo o vapor sobrecalentado, esta temperatura afecta directamente al rendimiento de la caldera, por ende, debe de ser mantenida en un margen cercano al de operación normal, evitando en todo momento que si se sobrepasa este margen origine un cambio a la salida de la caldera. Las condiciones de operación del ciclo deben ser compatibles con los distintos regímenes de producción de energía por el vapor de la caldera y con sus transiciones, demandadas por la red. Estas transiciones de potencia producidas provocan cambios muy significativos, y frecuentemente discontinuos, de las temperaturas y flujos de los gases de combustión, que de manera directa afectan al circuito de vapor y, en consecuencia, a la temperatura de vapor vivo.

Figura 19. Diagrama de flujo agua atemperación.



El lazo de control de temperatura se encuentra ubicado en medio de los dos sobrecalentadores de la caldera como se muestra en la figura 19. En el cual se puede observar que el vapor saturado pasa por el sobrecalentador primario y a la salida de este se encuentra la válvula de atemperación donde se realiza la acción de control de temperatura.

5.2 OBJETIVOS DEL CONTROL DE TEMPERATURA

La principal función de este lazo control es mantener la temperatura del vapor dentro de unos límites preestablecidos por el fabricante y los cuales se deben controlar independientemente de las variaciones de la carga, teniendo en cuenta que este tipo de control sólo es usado para calderas de vapor sobrecalentado.

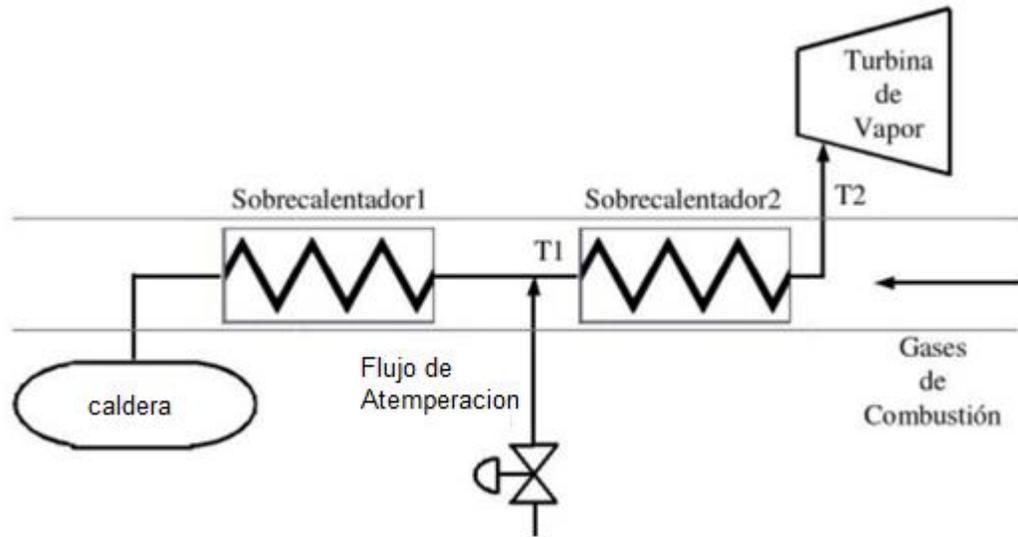
En general, el objetivo es obtener una determinada temperatura final de vapor sobrecalentado de la caldera, especificado en el rango de carga. La estrategia de control debe basarse en los mecanismos principales de control utilizados y la filosofía del fabricante de la caldera para el control de la temperatura del vapor. La estrategia consiste en la atemperación o rocío de agua. El atemperador inyecta agua en la línea de vapor, donde se vaporiza a su vez mezclándose con el vapor sobrecalentado, produciendo el enfriamiento de este último. El grado de enfriamiento depende del uso final del vapor.

5.3 ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL DE TEMPERATURA E INSTRUMENTACIÓN

En el control de temperatura se emplea un sistema de tres elementos el cual, consiste en atemperar el vapor inyectándole directamente un rocío de agua. Este método desde un punto de vista de control tendrá una constante de tiempo menor y su respuesta será más rápida con respecto a otras técnicas como por ejemplo un intercambiador de calor. Sin embargo, al introducir agua en el vapor la calidad de éste se verá afectada por la adición de agua al vapor.

5.3.1 Control a tres elementos. La estrategia de control de temperatura a tres elementos de acuerdo a la norma: “ANSI/ISA-77.44-1995 Fossil Fuel Power Plant Steam Temperature Control System — Drum Type”, debe ser utilizada en aplicaciones donde se tengan cambios rápidos de carga, con presiones de vapor variable o variación en la presión de alimentación del agua de atemperación.

Figura 20. Diagrama del lugar de atemperación

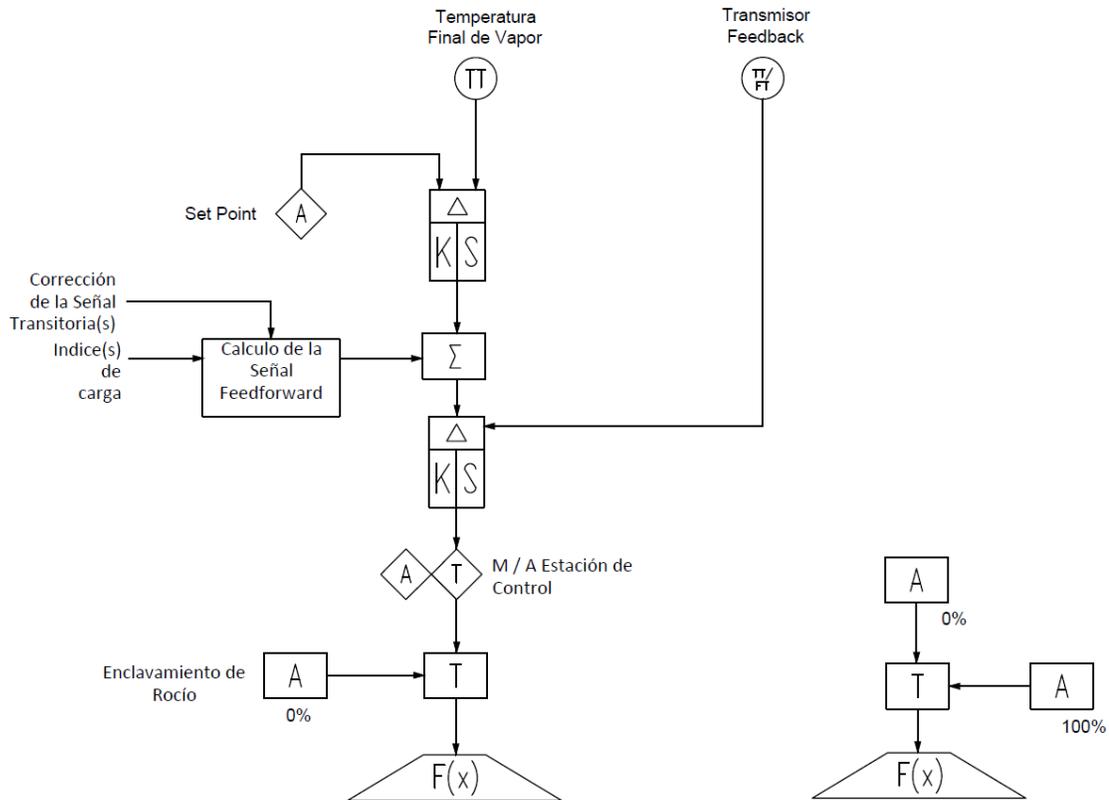


Fuente: Optimización ADEX de las Temperaturas de Vapor del Ciclo Combinado. Antonio Nevado Reviriego

La estrategia de control de tres elementos sólo se aplica cuando la atemperación tiene lugar entre dos secciones del sobrecalentador (figura 20).

Teniendo en cuenta la figura 21, el control de temperatura de tres elementos no es más que un control en cascada adicional a un control *feedforward* más *feedback* donde se tienen las señales de flujo de aire y temperatura del vapor a la entrada del sobrecalentador, esto con el fin de controlar la válvula de pulverización. La variable del proceso para el lazo de control interno es un monitor de la acción de pulverización. Aunque la temperatura del vapor inmediatamente después de la atemperación es la variable de proceso preferida, el flujo de agua también se puede utilizar. Como mínimo, la señal *feedforward* se deriva de un índice de carga (o índices). Este *feedforward* de la señal debe reconocer todas las influencias más importantes en la temperatura del vapor, incluyendo los ajustes a la distribución de calor dentro de la caldera. Para la operación de presión variable, una adecuada señal *feedforward* se proporciona para reflejar la influencia de los cambios en las propiedades termodinámicas del vapor de agua en la temperatura del vapor final.

Figura 21. Diagrama típico de una estrategia de control de temperatura de tres elementos

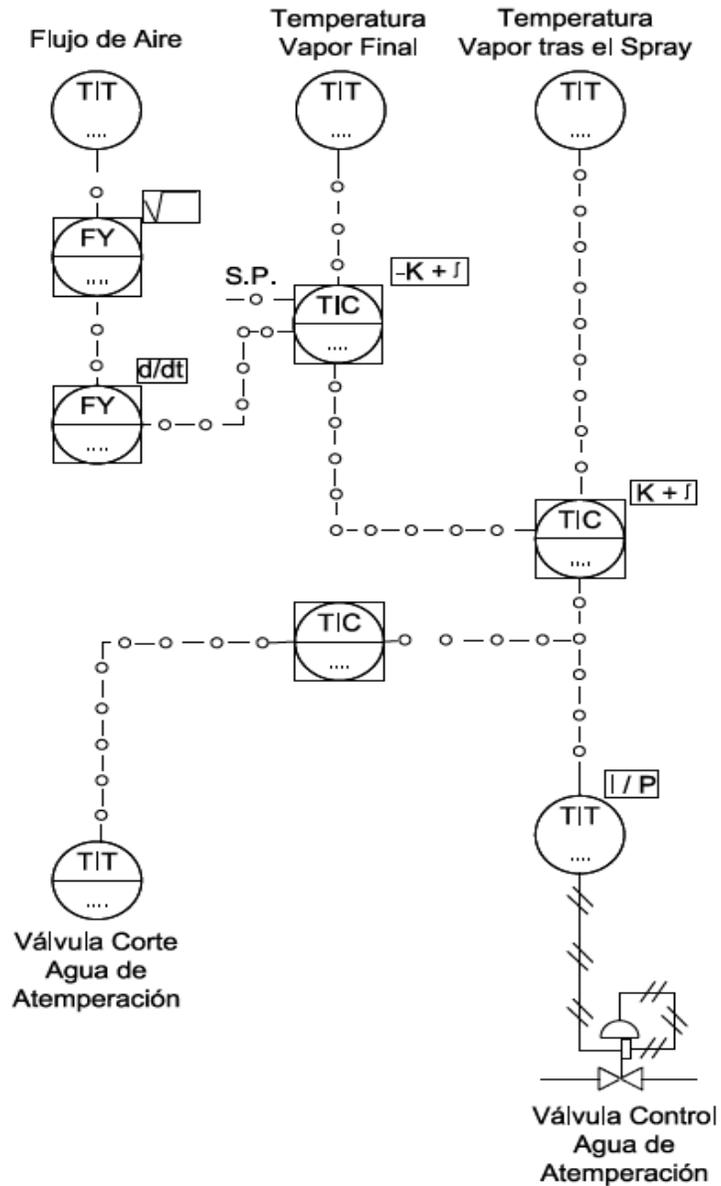


Fuente: ANSI/ISA-77.44-1995 Fossil Fuel Power Plant Steam Temperature Control System — Drum Type

De acuerdo a la norma: “ANSI/ISA-77.44-1995 Fossil Fuel Power Plant Steam Temperature Control System — Drum Type”, para el uso del control en cascada puede que exista una gran diferencia en las posiciones de la válvula de control para las distintas cargas de caldera, por ende, este problema se puede abordar mediante la inclusión del flujo de aire de combustión como tercer elemento en este lazo, donde la derivada del flujo de aire se utilizará como señal anticipativa para modificar la posición de la válvula ante los cambios de carga, mientras que en situaciones de régimen permanente no tendrá influencia, esto se puede apreciar en un ejemplo práctico en el diagrama P&ID de la figura 22.

Se encuentran los tres elementos sensores, que se encargan de medir las tres variables las cuales después de un proceso de control arroja una señal de control que es dirigida a un elemento final, para este caso la válvula de control de agua de atemperación, que se encargará de mantener la temperatura de vapor vivo.

Figura 22. Diagrama P&ID de un sistema de control de temperatura de tres elementos



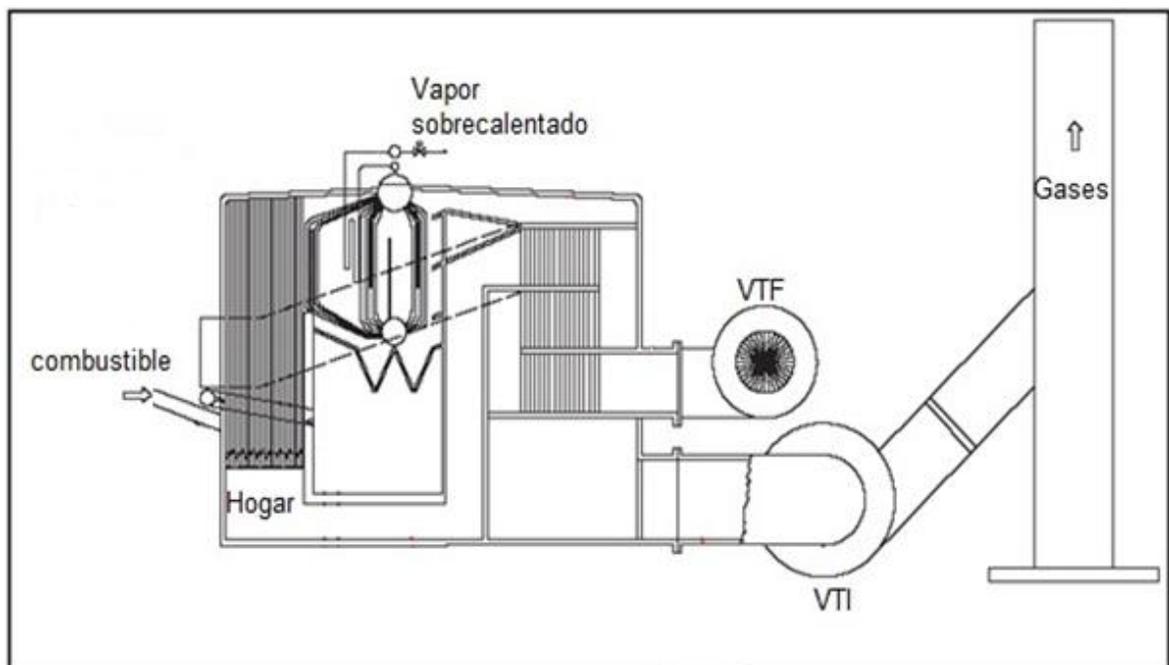
Fuente: Curso de control de calderas. José Carlos Villajulca

6. LAZO DE CONTROL DE PRESIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE PRESIÓN

El control de presión del hogar ocupa una parte importante dentro del sistema de control de calderas, el hogar de las calderas opera generalmente con presiones ligeramente negativas. La circulación de los gases de la combustión, o tiro (“*draft*”), se regula mediante el funcionamiento coordinado de los ventiladores de tiro forzado e inducido. Dado que el primero es utilizado para ingresar el aire de alimentación, el de tiro inducido es el encargado de mantener la presión del hogar aspirando los gases hacia la chimenea y manteniendo el tiro balanceado en el hogar como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Ubicación de los ventiladores de tiro forzado e inducido en una caldera



El control se hace variando la velocidad del motor del ventilador de tiro inducido. En las calderas con tiro balanceado es recomendable operar bajo un esquema *feedforward-plus-feedback* para anticipar la acción de control por cambios en el flujo de aire. El control de presión o de tiro se ve afectado por las pulsaciones debidas 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.

6.2 OBJETIVOS DEL CONTROL DE PRESION

El objetivo de este lazo es mantener la presión del hogar dentro de una estrecha banda en torno al punto de operación normal para asegurar una combustión satisfactoria así como una operación segura.

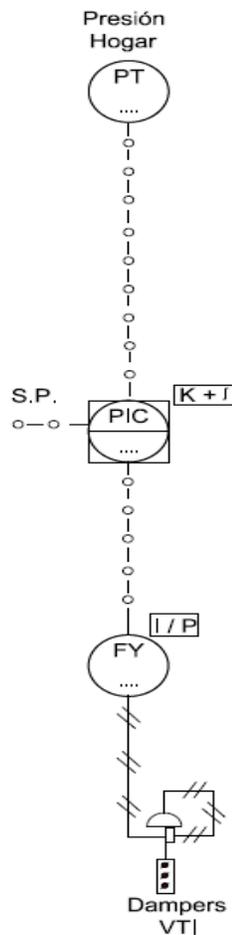
6.3 ESTRATEGIAS BÁSICAS DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DEL CONTROL DE PRESION

En las calderas con ventiladores de tiro forzado e inducido, se ha de mantener un tiro equilibrado de forma que la presión en el hogar se mantenga negativa. Para ello, se actúa sobre el elemento de control, el ventilador de tiro inducido, para que provoque más o menos succión. La forma más simple de control sería la representada en la figura 24, en la cual la presión del hogar se utiliza como variable de proceso, siendo la consigna el valor de presión deseado.

El flujo de aire de combustión es manejado por el mayor o menor aporte del ventilador de tiro forzado. Cada vez que el flujo de aire se modifica se produce un cambio en la presión

del hogar. Por otra parte, la presión del hogar es una variable sujeta a una gran cantidad de ruido de proceso que en principio debería ajustarse con poca ganancia e integral para minimizar el efecto de este ruido. Esto crea más problemas en la respuesta ante cambios de carga, pues éstos conllevan modificaciones en el flujo de aire.

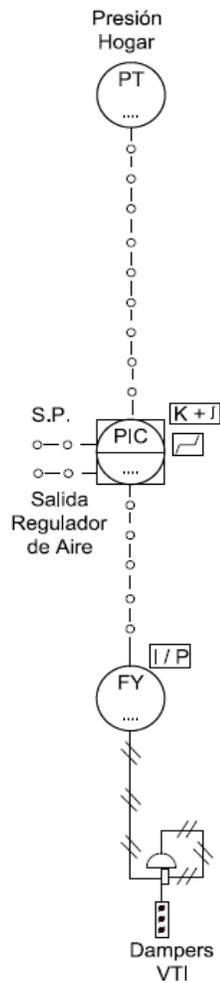
Figura 24. Diagrama de control de tiro



Fuente: Curso de control de calderas. José Carlos Villajulca

Para solucionar este último problema se suele usar un regulador con ganancia variable, de forma que la ganancia sea pequeña cuando el error se mantiene dentro de unos límites y se incremente sustancialmente cuando el error los sobrepasa. Adicionalmente, para solucionar la correcta respuesta ante cambios en el caudal de aire, se utiliza la demanda al elemento de control de éste como índice de la posición del ventilador de tiro inducido y corregido por el error en presión (Figura 25).

Figura 25. Control de tiro con ganancia variable y feedforward



Fuente: Curso de control de calderas. José Carlos Villajulca.

CONCLUSIONES

Se documentó las diferentes técnicas de control aplicables en calderas de tipo acuotubular.

Se elaboró teniendo en cuenta las normas y estándares actuales planos de control, P&ID, con el fin de ejemplificar la implementación del sistema de control.

Al momento de seleccionar la estrategia idónea de control de combustión, se tuvo en cuenta una mejora sustancial en la combustión, para esto se adicionaron correcciones por exceso de O_2 , en el lazo de control de combustión, en miras de mayor efectividad del proceso interno de la caldera.

Las técnicas de control avanzado seleccionadas, tienen en cuenta correcciones a efectos transitorios característicos del proceso de cambio de carga. Obteniendo así resultados satisfactorios en aras de un proceso de generación de vapor eficiente.

RECOMENDACIONES

En este trabajo solo se tomaron los lazos de control principales, queda para un posterior trabajo, entrar en profundidad en los lazos de control auxiliares de la caldera, los cuales aumentan la complejidad del sistema de control.

Al estar limitado a un tipo específico de caldera, lo expuesto en el transcurso del trabajo puede variar de acuerdo a las especificaciones de la caldera objeto de estudio.

Para mayor información sobre las estrategias de control se recomienda consultar la norma ANSI/ISA-77 “*Fossil Fuel Power Plant Standards and User Resources*”.

BIBLIOGRAFIA

DUKELOW, Sam G. The Control of Boilers. Instrument Society of America. ISA, 1991, 2 edición. 412 p.

GILMAN, G. F. (Jerry). Boiler Control System Engineering. ISA. 144 p.

CREUS SOLE, Antonio Instrumentación Industrial MARCOMBO, S.A. 8 edición. 800 p.

SMITH, Carlos A. y CORIPIO, Armando B. Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica. *University of South Florida and Louisiana State University* 718 p.

ACEVEDO SANCHEZ, José. CONTROL AVANZADO DE PROCESOS (Teoría y práctica). Instituto Superior de la Energía ISE. 574 p.

VILLAJULCA, José Carlos, Curso de Calderas, <http://www.instrumentacionycontrol.net>, 157 p.

ANSI/ISA-77.41-1992, Fossil Fuel Power Plant Boiler Combustion Controls. 28 p.

ANSI/ISA-77.44-1995, Fossil Fuel Power Plant Steam Temperature Control System — Drum Type. 46 p.

ANSI/ISA-77.43-1994, Fossil Fuel Power Plant Unit/Plant Demand Development (Drum Type). 26 p.

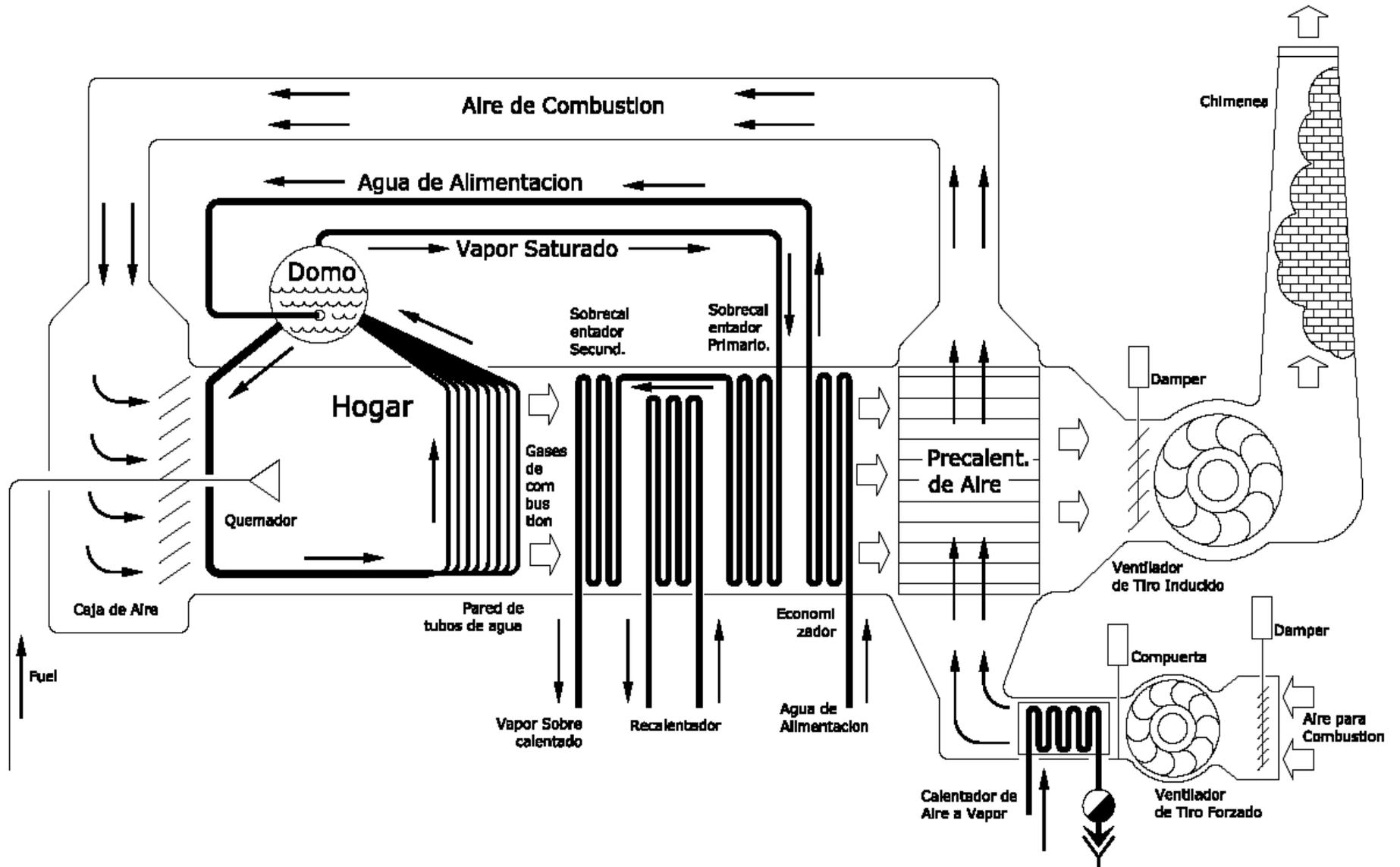
ANSI/ISA-77.42.01-1999, Fossil Fuel Power Plant Feedwater Control System — Drum Type. 34 p.

NFPA 85. Boiler and Combustion Systems Hazards Code. National Fire Protection Association, 2004

SAMA Standard PMC 22.1. Functional Diagramming of Instrument and Control Systems.
Scientific Apparatus Manufacturers Association, 1981.

ANEXO A

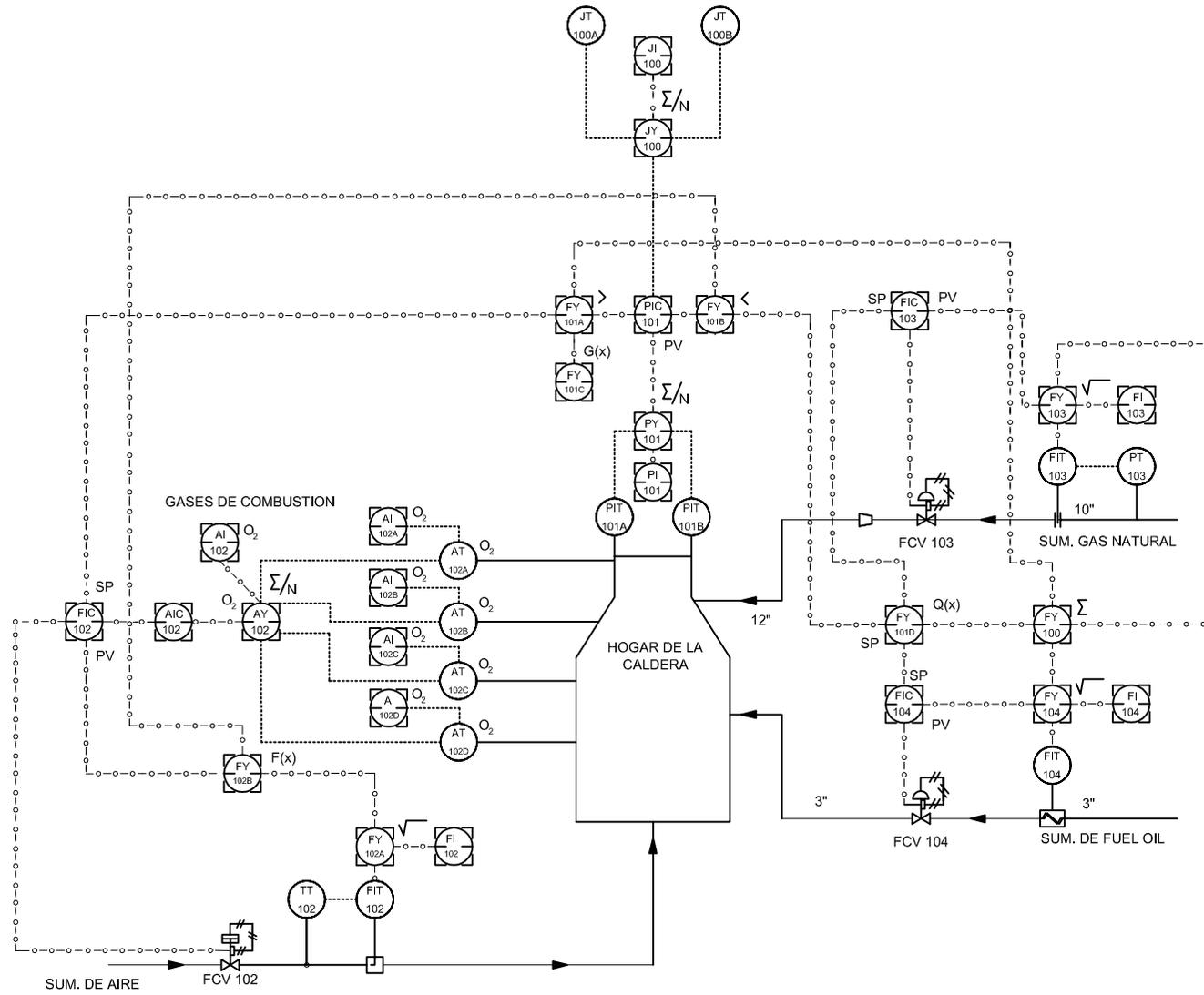
(Diagrama general de caldera de vapor)



ANEXO B

(P&ID del Lazo de Control de Combustión y Demanda)

1. SAMA CONTROL DE COMBUSTION Y DEMANDA



SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- SENAL DIGITAL PROVENIENTE DEL SIS (1 o 0)
- BLOQUE CARACTERIZADOR
- VALOR CONSTANTE ACCESO POR CONFIGURACION
- PUNTO DE AJUSTE FLUJO POR OPERADOR (PANTALLA)
- SENAL DIGITAL (1 o 0) PARA CAMBIO DE ESTADO
- ALARMA GRUPO 1
- ALARMA GRUPO 2
- ALARMA GRUPO 3
- INDICACION EN PANTALLA
- BLOQUE DIFERENCIA
- BLOQUE EXTRACCION DE RAIZ
- BLOQUE SELECTOR MAYOR
- BLOQUE SELECTOR MENOR
- BLOQUE TRANSFERENCIA
- BLOQUE LIMITE BAJO
- BLOQUE LIMITE ALTO
- BLOQUE LIMITE DE MAY ALTO
- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTTEGRAL
- BLOQUE DE CALCULO
- BLOQUE DE "BIAS"
- BLOQUE DE RETARDO
- ENCLAVAMIENTO
- SÍMBO SELECTOR POR PANTALLA

CONVENCIONES DE CONFIGURACION SISTEMA CONTROL

- BAJ: PERIODA SENAL ANALOGA
- MEAS: VALOR VARIABLE DE ENTRADA
- OUT: VALOR VARIABLE DE SALIDA
- LAG: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE BAJO
- HAL: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE ALTO
- TOGGLE: PULSADOR CAMBIO DE ESTADO
- MAN: ESTADO MANUAL / AUTOMATADO MAN-A
- MEASR: LIMITE ALTO EN VARIABLE DE ENTRADA
- HDAL: LIMITE ALTO DESVIACION
- LDAL: LIMITE BAJO DESVIACION
- MEASLL: LIMITE MAY BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MEASLL: LIMITE BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MANSW = 1.0: SENAL PARA MANUALIZAR
- SCALE: VALOR VARIABLES ENTRADA PARA INICIALIZACION
- SCALEC: VALOR VARIABLE SALIDA PARA INICIALIZACION
- INTI = 0.0: SENAL PARA INICIALIZAR BLOQUE CONTROL
- INTI = 1.0: SENAL PARA TRACKING DE BLOQUE CONTROL
- FBK: VALOR VARIABLE PARA AJUSTE DE ACCION INTEGRAL
- BIAS: VALOR VARIABLE ADICIONAL A PUNTO DE AJUSTE
- BI: VALOR BINARIO (1.0 o 0) ENTRADA BLOQUE CALCULO
- BO: VALOR BINARIO (1.0 o 0) SALIDA BLOQUE CALCULO
- HOA: LIMITE ALTO SALIDA
- AOBOR: COLAJER QUEMADOR GAS EN SERVIDO
- AOBOR: COLAJER QUEMADOR AGITE EN SERVIDO
- LASP: BAJA PRESION ATOMIZACION
- TRMNL: OPCION DE ACTIVACION DE TRACK EN EL CONTROLADOR
- TRC: VALOR DEL TRACK

PROYECTO	
DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PERTENECIENTE A LA UNIDAD 1 CENTRAL TERMICA CARTAGENA DE LA EMPRESA GENERADORA DE ENERGIA EMGESA S.A ESP. BASADO EN NORMAS ISA.	
FECHA: 18/10/2011	SEALPADO:
	HERMES OSORIO LUJO
	RAFAEL JAMES NAVAS
	REGIBO DONADO ROMERO

DESCRIPCION
P&ID LAZO DE CONTROL DE COMBUSTION Y DEMANDA

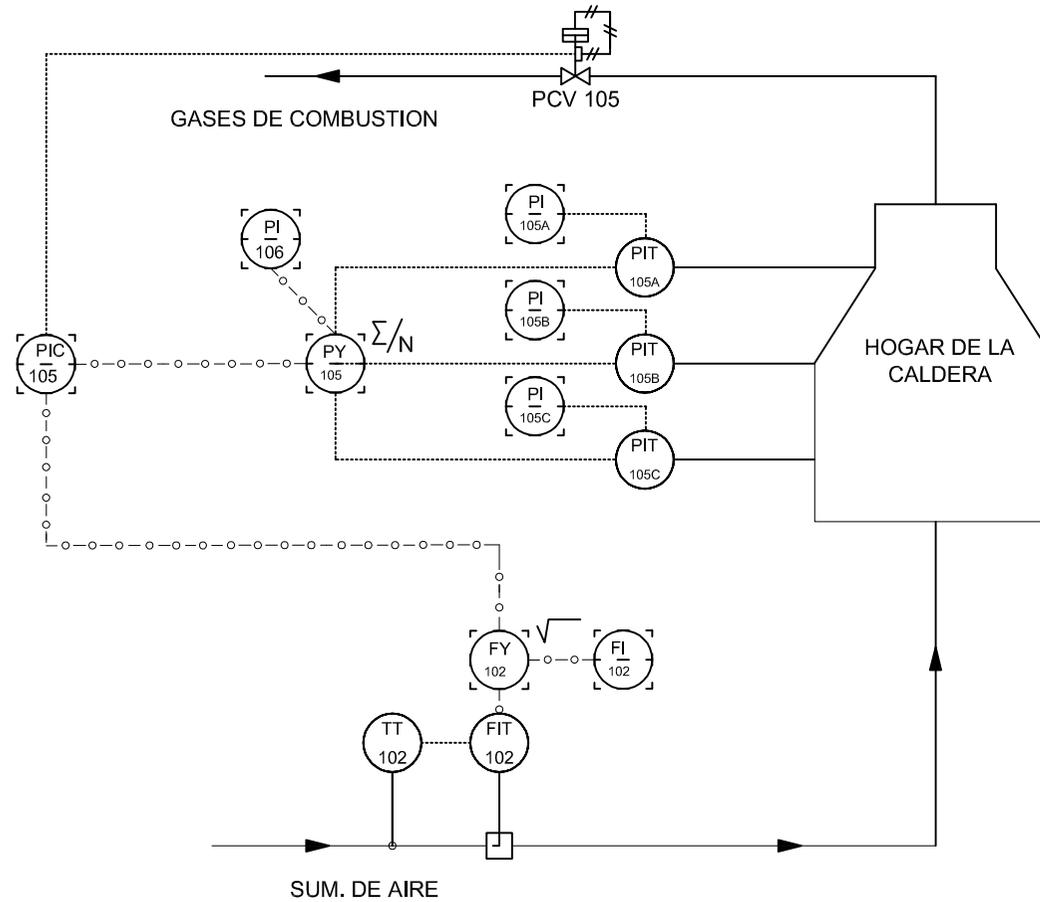
PLANO No
2723-101

ANEXO C

(P&ID del Lazo de Control de Presión Hogar)

PLANOS DE REFERENCIA

1. SAMA CONTROL DE PRESION HOGAR



SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- SENAL DIGITAL PROVENIENTE DEL SIS (1 o 0)
- BLOQUE CARACTERIZADOR
- VALOR CONSTANTE ACCESO POR CONFIGURACION
- PUNTO DE AJUSTE FIJADO POR OPERADOR (PANTALLA)
- SENAL DIGITAL (1 o 0) PARA CAMBIO DE ESTADO
- ALARMA GRUPO 1
- ALARMA GRUPO 2
- ALARMA GRUPO 3
- INDICACION EN PANTALLA
- BLOQUE DIFERENCIA
- BLOQUE EXTRACCION DE RAIZ
- BLOQUE SELECTOR MAYOR
- BLOQUE SELECTOR MENOR
- BLOQUE TRANSFERENCIA
- BLOQUE LIMITE BAJO
- BLOQUE LIMITE ALTO
- BLOQUE LIMITE DE MAY ALTO
- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL
- BLOQUE DE CALCULO
- BLOQUE DE "BIAS"
- BLOQUE DE RETARDO
- ENCLAVAMIENTO
- SÍMBOLO SELECTOR POR PANTALLA

CONVENCIONES DE CONFIGURACION SISTEMA CONTROL

- BAJO: PERIODA SENAL ANALOGA
- MEAS: VALOR VARIABLE DE ENTRADA
- OUT: VALOR VARIABLE DE SALIDA
- LI: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE BAJO
- HI: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE ALTO
- TOGGLE: PULSADOR CAMBIO DE ESTADO
- MAN: ESTADO MANUAL / AUTOMATICO M=1 A=0
- MEASB: LIMITE ALTO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MEASL: LIMITE ALTO DESVIACION
- LIAB: LIMITE BAJO DESVIACION
- MEASBL: LIMITE MAY BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MEASLL: LIMITE BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MANSW = 1.0: SENAL PARA MANUALIZAR
- SCALE: VALOR VARIABLES ENTRADA PARA INICIALIZACION
- SCALEO: VALOR VARIABLE SALIDA PARA INICIALIZACION
- INTI = 0.0: SENAL PARA INICIALIZAR BLOQUE CONTROL
- INTI = 1.0: SENAL PARA TRACKING DE BLOQUE CONTROL
- FBK: VALOR VARIABLE PARA AJUSTE DE ACCION INTEGRAL
- BIAS: VALOR VARIABLE ADICIONAL A PUNTO DE AJUSTE
- BI: VALOR BINARIO (1.0 o 0) ENTRADA BLOQUE CALCULO
- BO: VALOR BINARIO (1.0 o 0) SALIDA BLOQUE CALCULO
- HOA: LIMITE ALTO SALIDA
- AOBDR: CUALQUIER QUEMADOR GAS EN SERVIDO
- AOBDR: CUALQUIER QUEMADOR ACEITE EN SERVIDO
- LASP: BAJA PRESION ATOMIZACION
- TRMNL: OPCION DE ACTIVACION DE TRACK EN EL CONTROLADOR
- TRK: VALOR DEL TRACK

PROYECTO	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PERTENECIENTE A LA UNIDAD 1 CENTRAL TERMICA CARTAGENA DE LA EMPRESA GENERADORA DE ENERGIA EMGESA S.A ESP. BASADO EN NORMAS ISA.
FECHA: 18/10/2011	SEALZADO:
	HERMES OSORIO LUJO
	RAFAEL JAMES NAVAS
	REGISD DONALDO ROMERO

DESCRIPCION
P&ID LAZO DE CONTROL DE PRESION HOGAR

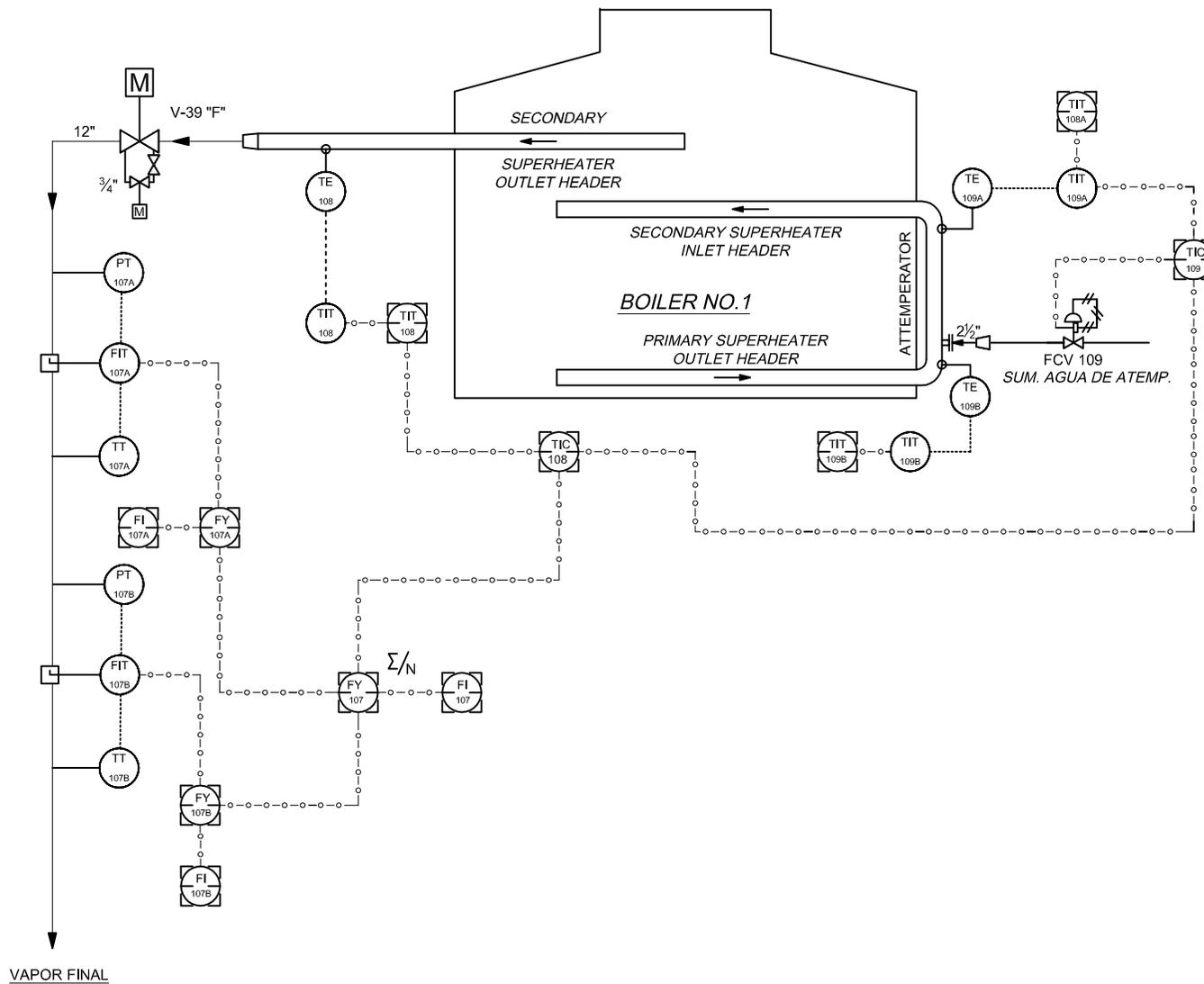
PLANO No
2723-102

ANEXO D

(P&ID del Lazo de Control de Temperatura de Vapor Final)

PLANOS DE REFERENCIA

1. SAMA CONTROL DE TEMPERATURA DE VAPOR FINAL



SÍMBOLOS CONVENCIONALES

- SENAL DIGITAL PROVENIENTE DEL SIS (1 ó 0)
- BLOQUE CARACTERIZADOR
- VALOR CONSTANTE ACCESO POR CONFIGURACION
- PUNTO DE AJUSTE FLUJO POR OPERADOR (PANTALLA)
- SENAL DIGITAL (1 ó 0) PARA CAMBIO DE ESTADO
- ALARMA GRUPO 1
- ALARMA GRUPO 2
- ALARMA GRUPO 3
- INDICACION EN PANTALLA
- BLOQUE DIFERENCIA
- BLOQUE EXTRACCION DE RAIZ
- BLOQUE SELECTOR MAYOR
- BLOQUE SELECTOR MENOR
- BLOQUE TRANSFERENCIA
- BLOQUE LIMITE BAJO
- BLOQUE LIMITE ALTO
- BLOQUE LIMITE DE MAY ALTO
- CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL
- BLOQUE DE CALCULO
- BLOQUE DE "BIAS"
- BLOQUE DE RETARDO
- ENCLAVAMIENTO
- SÍMBOLE SELECTOR POR PANTALLA

CONVENCIONES DE CONFIGURACION SISTEMA CONTROL

- BAJ: PERIODA SENAL ANALOGA
- MEAS: VALOR VARIABLE DE ENTRADA
- OUT: VALOR VARIABLE DE SALIDA
- LAJ: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE BAJO
- HAI: ENCLAVAMIENTO POR LIMITE ALTO
- TOGGLE: PULSADOR CAMBIO DE ESTADO
- MAN: ESTADO MANUAL / AUTOMATICO M=1-A
- MEASR: LIMITE ALTO EN VARIABLE DE ENTRADA
- HDAL: LIMITE ALTO DESVIACION
- LDAL: LIMITE BAJO DESVIACION
- MEASRL: LIMITE MAY BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MEASLL: LIMITE BAJO EN VARIABLE DE ENTRADA
- MANSW = 1.0: SENAL PARA MANUALIZAR
- SCALEI: VALOR VARIABLES ENTRADA PARA INICIALIZACION
- SCALEO: VALOR VARIABLE SALIDA PARA INICIALIZACION
- INTI = 0.0: SENAL PARA INICIALIZAR BLOQUE CONTROL
- INTI = 1.0: SENAL PARA TRACKING DE BLOQUE CONTROL
- FBK: VALOR VARIABLE PARA AJUSTE DE ACCION INTEGRAL
- BIAS: VALOR VARIABLE ADICIONAL A PUNTO DE AJUSTE
- BI: VALOR BINARIO (1.0 ó 0) ENTRADA BLOQUE CALCULO
- BO: VALOR BINARIO (1.0 ó 0) SALIDA BLOQUE CALCULO
- HOA: LIMITE ALTO SALIDA
- AOBDR: CUALQUIER QUEMADOR GAS EN SERVIDO
- AOBDR: CUALQUIER QUEMADOR ACEITE EN SERVIDO
- LASP: BAJA PRESION ATOMIZACION
- TRMNL: OPCION DE ACTIVACION DE TRACK EN EL CONTROLADOR
- TRC: VALOR DEL TRACK

PROYECTO	DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PERTENECIENTE A LA UNIDAD 1 CENTRAL TERMICA CARTAGENA DE LA EMPRESA GENERADORA DE ENERGIA EMGESA S.A ESP. BASADO EN NORMAS ISA.
FECHA: 18/10/2011	SEÑALADO:
	HERNANDEZ OSORIO LUGO
	RAFAEL JAIMES NAVAS
	REGISRO DONADO ROMERO

DESCRIPCION
P&ID LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA DE VAPOR FINAL

PLANO No
2723-103

ANEXO E

(P&ID del Lazo de Control de Nivel del Domo)

ANEXO G

(Listado con la Instrumentación y Elementos de Campo)

Instrumentos y Elementos Ubicados en Campo

LAZO DE CONTROL DE COMBUSTION

Servicio: Medición de flujo de vapor

Función: Transmisor de flujo de vapor vivo.

Escala: 0-35 kg / H x 10000

Compensación: Por temperatura termocupla (600F - 1200F)

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=0, +5v=350000kg/Hr)

Elemento sensor/tecnología: Cámara en forma de anillo con mercurio (Hg)

Servicio: Medición de presión de vapor vivo

Función: Transmisor de presión de vapor vivo

Rango: 0-120 Kg / Cm²

Compensación: Por temperatura termocupla (600F - 1200F)

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=0, +5v=120kg/Hr)

Elemento sensor/tecnología: Tubo Bourdon

LAZO DE CONTROL DE COMBUSTIBLE

Servicio: Medición de flujo de gas combustible

Función: Transmisor de flujo de gas natural (Multivariable)

Escala: 0-100 SCFH x 10000

Rango: 0 - 60 w.c

Elemento sensor/tecnología: Cámara en forma de anillo con Mercurio (Hg)

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=0, +5v=1000000 scfh)

Servicio: Medición de flujo de Fuel Oil

Función: Transmisor de flujo de Fuel Oil

Escala: 0-100 (0 - 50000 PPH)

Señal de salida: -10 a +10 vdc (-10=0, +10v=50000 PPH)

Elemento sensor/tecnología: Tipo Coriolis

Servicio: Válvula de control de flujo de gas combustible

Función: Elemento final de control

Rango: 3 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

Servicio: Válvula de control para corte de flujo de gas combustible

Función: Apagado de Fuel Oíl

Rango: 3 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

Servicio: Válvula de control de flujo de Fuel Oíl combustible

Función: Elemento final de control

Rango: 3 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

Servicio: Válvula de control para control de Fuel Oíl combustible

Función: Válvula de corte (shut off) de Fuel Oíl

Rango: 6 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

LAZO DE CONTROL DE AIRE DE COMBUSTION

Servicio: Medición de Diferencial de presión (caja quemadores / hogar)

Función: Medidor transmisor de presión diferencial

Escala: 0-300 mm WC

Rango: 0 - 300 mm H₂O

Elemento sensor/tecnología: Cámara en forma de anillo con ACPM

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=0, +5v= 100%)

Servicio: Medición de flujo de aire de combustión

Función: Transmisor de flujo de aire

Escala: 0-100% (Flow air)

Rango: -60 Cm / wc a +60 Cm / wc

Elemento sensor/tecnología: ANNUBAR.

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=0, +5v= 100%)

Servicio: Medición de Oxígeno en gases

Función: Transmisor de concentración de Oxígeno

Escala: 0-10%

Elemento sensor/tecnología: Electrodo

Señal de salida: 4 - 20mA (4mA = 0, 20mA = 10%)

LAZO DE CONTROL DE PRESION DEL HOGAR DE LA CALDERA

Servicio: Medición de Presión del Hogar

Función: Medidor transmisor de presión

Escala: -5" WC - +5"WC

Rango: -5" H₂O a +5" H₂O

Elemento sensor/tecnología: Cámara en forma de anillo con ACPM

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=-5, +5v= +5)

Servicio: Medición de Presión del Hogar

Función: Medidor transmisor de presión

Escala: -100 mm WC a - 50 mm WC

Rango: -100 mm WC a - 50 mm WC

Elemento sensor/tecnología: Cámara en forma de anillo con ACPM

Señal de salida: 1-5 vdc (+1v=-100, +5v= -50)

Servicio: Actuador de control del Dámper de entrada al ventilador

Función: Posicionador de Dámper (Succión tiro inducido)

Rango: 0 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

Servicio: Actuador de control del Dámper de salida del ventilador

Función: Posicionador de Dámper (Salida de tiro inducido)

Rango: 0 - 30 psig

Acción: Aire para abrir

LAZO DE CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACION

Servicio: Medición de flujo de agua

Función: Elemento primario de medición de flujo de agua

Elemento primario: Tobera de flujo

Servicio: Medición de flujo de agua de alimentación

Función: Transmisor de flujo de Agua

Escala: 0-35 (K/h x 10000)

Elemento sensor/tecnología: Multivariable

Compensación: Por temperatura de 0 a 500F

Elemento temperatura: Termocupla tipo E

Señal de salida: 1 - 5 vdc (+1v = 0, +5v = 350000 Kg/h)

Servicio: Medición de nivel del tambor principal (drum)

Función: Transmisor de nivel por presión diferencial con compensación por densidad

Escala: -30 a +30 CM w.c

Señal de salida: 1 - 5 vdc (+1v = -30 CM, +5v = +30CM)

Servicio: Válvula de control de flujo de agua al tambor

Función: Elemento final de control de flujo

Rango: 6 - 30 psig

Acción: Aire para abrir