



---

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN EN  
UN GENERADOR DE VAPOR.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A:

FRANCISCO MARTÍNEZ ANDRADE



DIRECTOR: ING. RODOLFO PETERS LAMMEL

MÉXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El presente trabajo consume una época inolvidable en mi vida: el paso por la Universidad Nacional Autónoma de México. Esta tesis solo es una pequeña muestra del gran esfuerzo y apoyo de todas aquellas personas que en mi han confiado.

- A mis padres, no tengo palabras que describan el bien que sus enseñanzas han logrado en mi persona, gracias por la paciencia, por sus sacrificios, por su apoyo incondicional pero sobre todo por creer en mi, los quiero mucho.
- Dalia, mi hermana, lo mismo mi confidente que mi acompañante, cómplice también, tanto apoyo incondicional de tu parte, mucho cine, mucha fiesta, somos un buen equipo, sabes cuanto que te quiero.
- Israel, muchas gracias por tu apoyo, por los viajes, conciertos y buenos momentos, aun falta por recorrer, un abrazo mi hermano.
- A mi abuelita Esperanza, te quiero mucho, gracias por tenerme siempre en tus oraciones.
- A la memoria de mis abuelos Tomas y Clemente, se que han estado conmigo todo el tiempo, a diario los recuerdo.

A mis amigos:

- Erik, gracias por inyectarle tanto ánimo a mi vida, por siempre demostrarme tu amistad, pero sobre todo por confiar en mí, amigo, gracias.
- Beto, si de alguien tengo buenos recuerdos es de ti, tengo presente tu disimulo y agradezco que en todo momento me hagas sentirme acompañado, que decir de tu apoyo y de tu confianza, un abrazo Betito.
- Víctor, siempre admire tu capacidad para medir tu desempeño en la facultad y tu manera de disfrutar la vida, cuantos trabajos de última hora, cuantas fiestas, cuantos buenos momentos, gracias viejo por tu amistad, por el apoyo, un abrazo.
- Brenda, mucho café, mucha cantina. Que puedo decir de ti, eres única, auténtica, festiva, mi manera de ver la vida ha sido distinta desde que me enseñaste a tomarla como es y a disfrutarla, tantos buenos recuerdos tengo a tu lado, te quiero mucho amiga.
- Lorena, flaca, que seria de mí sin tus regaños maquillados como consejos, sabes lo mucho que me han servido, gracias por nunca dejarme solo, por escucharme, por tu amistad, por integrarme a los tuyos, por tanta confianza, te quiero demasiado.
- Daniel Plata, mi melómano preferido. Cuantas charlas, tantos puntos de vista, agradezco que te hayas acercado a mí, quedan ideas en el tintero, falta bastante. Un abrazo viejo.
- Ramiro, compadre, a tu lado si me toco la vida estudiantil, decenas de trabajos escolares, horas de estudio para exámenes finales, cuantos buenos momentos, anécdotas paralelas, nuestra amistad es importante. Gracias por todo viejo.

- Ita, te recuerdo con mucho gusto, tantas cosas nos unen, siempre fuiste un ejemplo a seguir, quien olvidaría lo bien que la pasábamos, gracias por tanto apoyo, por hacerme ver cuan valiosos somos, te quiero mucho.
- Viridiana, primeros semestres, clases aburridas, escapadas al cine, malos entendidos (innecesarios), mucha risa y aun somos amigos, te quiero.
- Elizabeth, la vida no es fácil. Compañera de mil batallas, enorme en una sola palabra, si a alguien debo de agradecer enseñanzas es a ti, cuantas pláticas de madrugada, cuantos días de carnaval, gracias por tu apoyo amiga, de verdad gracias.... y lo que nos falta.
- Carolina, amiga, que buenos recuerdos tengo cuando pienso en ti, convivimos en pocas clases, fuera de ellas tenemos muchas anécdotas, se que cuento contigo y créeme que es recíproco. Te quiero mucho amiga.
- Verónica, Verito para mi, consejos, pláticas amenas, cafés, risas, bailes mal logrados, puertas cerradas, fiestas por terminar.... solo buenos recuerdos, sabes te quiero.
- Joseph, desde la preparatoria que nos conocemos, pocas personas de esos días hasta hoy sigo considerando cercanos, un abrazo amigo, que buenos tiempos compartimos.
- Arely, amiga antes que otra cosa, comadre ahora, agradezco tanta paciencia, pero sobre todo el que hayas confiado esa responsabilidad en mi, no estas sola, saldremos adelante. Un abrazo amiga, te quiero mucho.
- Itzel, una de mis personas preferidas, ojala tuviera palabras para agradecer tus consejos tan oportunos, tu paciencia, acercarme de nuevo a ti logro darle tranquilidad a mi vida. Gracias amiga, te quiero.
- Yolanda, srta. Zeferino, paciencia fue lo que tuviste para conmigo, explicaciones interminables, ayuda para mis exámenes, me inyectaste confianza. Gracias por todo Yolanda.
- Elba, en pocas cosas estuvimos de acuerdo, sin embargo como te quiero, aun me debes varias.
- Moisés, años de conocerte, mas de diez. Personas incondicionales pocas, gracias por tu apoyo mi hermano.
- David, hasta el final de la carrera que comenzamos a ser amigos, cuantas dudas despejadas, tantas horas de estudio, mucho apoyo de tu parte, gracias, eres ejemplo a seguir, un abrazo.
- Armando, nuestra amistad comenzó por nuestro gusto musical, se reforzó gracias al ánimo festivo y a tantos buenos momentos, sin embargo tus consejos y tu apoyo son cosas que no olvido, te admiro viejo.

Del mismo modo amigos como Ismael, Jesús, Marco, Berenice, Genaro, Darío, Hugo, Francisco, Ignacio, Jair, Héctor, Sandra, Avril, Judith, Antonio, Claudia, Jonathan, Martha y mis compañeros de facultad, a todos ustedes mil gracias por su apoyo, por los buenos momentos, por confiar pero sobretodo por creer en mi.

Marlene, una parte importante de mi vida la pase a tu lado, muy buenos momentos, muchas experiencias, agradezco haberte tenido en mi camino.....nada es para siempre, te recuerdo con cariño.

Agradecimientos especiales:

- A los profesores de mi jurado, mis sinodales: Ing. Francisco Rodríguez, Ing. Ricardo Garibay, Ing. Rafael Iriarte e Ing. Gerardo Espinosa, gracias por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por sus comentarios para obtener un trabajo de calidad.
- Al Ing. Rodolfo Peters Lammel, mi director de tesis. Debo de reconocer tanta paciencia, tantos buenos consejos, la confianza brindada en todos estos años, profesor mil gracias por su ayuda, por su enseñanza.
- Al Ing. Natividad Martínez, este trabajo difícilmente se hubiera terminado sin su apoyo, sin sus conocimientos, gracias padre.
- A las personas de Fábrica de Jabón La Corona que me facilitaron la documentación este trabajo, en especial al Ing. Mateo Salguero Iñiguez por sus comentarios para el mejoramiento del mismo.
- A mis familiares, por el cariño mostrado, por el apoyo constante, de corazón muchas gracias.
- A la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por la preparación, por tantos buenos momentos en la aulas, por la formación profesional.

A todos ustedes gracias por cada uno de los momentos y las experiencias compartidas, por los consejos, regaños y palabras de ánimo, por su tiempo y paciencia, por su compañía, cuantos buenos momentos, cuantas pláticas, cuantas convivencias, gracias.

Francisco Martínez Andrade.

## SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN PARA UN GENERADOR DE VAPOR

CAPÍTULO 1 - CONTROL DE VARIABLES DE PROCESO	1
1.1 Generalidades	2
1.1.1 Importancia de los instrumentos de medición y control en las operaciones industriales	2
1.1.2 Clases de instrumentos industriales	3
1.1.3 Sistema de control de circuito cerrado	3
1.1.4 Elementos primarios de medición	4
1.1.5 Elementos secundarios de medición	5
1.1.6 Elemento detector del error y controlador	5
1.1.7 Elemento final de control	5
1.2 Proceso	6
1.2.1 Cambios de carga	8
1.3 Control de variables de proceso	9
1.3.1 Flujo	9
1.3.2 Presión	10
1.3.3 Nivel	12
 CAPÍTULO 2 – GENERALIDADES DE UN GENERADOR DE VAPOR	 15
2.1 Definición y generalidades	16
2.1.1 Clasificación de los generadores de vapor	17
2.2 Partes principales de un generador	18
2.2.1 Cuerpo	18
2.2.2 Hogar	19
2.2.3 Chimenea	19
2.2.4 Domos	19
2.2.5 Caja de aire	19
2.2.6 Quemador	19
2.2.7 Accesorios	20
2.3 Elementos para la operación de un generador	21
2.3.1 Agua	22
2.3.2 Aire	22
2.3.3 Combustible	22
2.3.4 Electricidad	23
2.4 Productos de un generador	24
2.4.1 Vapor	24
2.4.2 Gases de la combustión	24
2.5 Características funcionales de un generador	25
2.5.1 Combustibles	25
2.5.2 Emisiones	26
2.5.3 Eficiencia	26
2.5.4 La temperatura de chimenea y pérdidas	27
2.5.5 Exceso de aire	27
2.5.6 Pérdidas por radiación y convección	27
2.5.7 Superficie de calefacción	28
2.6 Operación de un generador de vapor	28
2.7 Usos del vapor	29

CAPÍTULO 3 – CONTROL DE CONDUCTIVIDAD	32
3.1 Importancia de la purga en un generador de vapor	33
3.2 Tratamiento de agua en la generación de vapor	34
3.2.1 Control químico	35
3.2.2 Desaireación	37
3.2.3 Dificultades en la producción de vapor	37
3.3 Conductividad	39
3.4 Tipos de purga	43
 CAPÍTULO 4 - CONTROL DE NIVEL (AGUA ALIMENTACIÓN)	 44
4.1 Definición	45
4.2 Necesidad del control de agua de alimentación	45
4.3 Factores que afectan el control de nivel	46
4.4 Sistemas de control de nivel	48
4.4.1 Sistema de control de nivel de un elemento	48
4.4.2 Sistema de control de nivel de dos elementos	49
4.4.3 Sistema de control de nivel de tres elementos	51
4.5 Elementos del control de nivel	52
4.5.1 Placa de orificio	53
4.5.2 Transmisor digital	55
 CAPITULO 5 - CONTROL DE COMBUSTIÓN	 60
5.1 ¿Que es un control de combustión?	61
5.2 Necesidad del control de combustión automático	62
5.3 Requisitos de un sistema de control de combustión	63
5.4 Elementos del control de combustión	65
5.4.1 Damper (Compuerta de aire)	65
5.4.2 Servomotor	65
5.4.3 Válvula de control	66
5.5 Control maestro de la unidad	69
5.6 Control de límites cruzados	71
5.6.1 Incremento o rechazo de carga	71
5.6.2 Decremento o rechazo de carga	73
 CAPÍTULO 6 – BMS, SEGURIDAD DEL GENERADOR	 74
6.1 Definición	75
6.1.1 Sistema de purga del generador	75
6.1.2 Sistema de lógica para el Disparo Maestro de Combustible (MFT, Main Fuel Trip)	76
6.1.3 Sistema de seguridad contra falla de flama	77
6.1.4 Sistema de monitoreo	77
6.2 Elementos en el BMS	78
6.2.1 Detectores de flama	78
6.2.2 Válvulas de seguridad	79
6.2.3 Interruptores de presión	80
6.3 Funcionamiento del BMS	81
6.3.1 Características del funcionamiento	81
6.3.2 Lógica de escalera	82
6.3.3 Condición de renglón	83
6.3.4 Diagnósticos mensajes y alarmas	85

CAPÍTULO 7 - INTEGRACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL EN EL PLC LOGIX 5000.	87
7.1 Control por PLC	88
7.1.1 Definición	88
7.1.2 Arreglo físico del PLC y control	88
7.1.3 Funcionamiento del PLC	92
7.1.4 Monitoreo del control	93
7.2 Dispositivos de comunicación	95
7.2.1 ControlNet	95
7.2.2 Ethernet	96
7.3 Arquitectura de control	97
7.4 Control de combustión en el PLC	98
7.4.1 PID	98
7.4.2 Sistema de Control de Combustión	99
7.4.3 Selección del Sistema Control	100
7.4.4 Métodos de ajuste de controladores	101
7.5 Caracterización del generador	103
7.5.1 Definición	103
7.5.2 Procedimiento	103
7.6 Sintonización del sistema de control	105
CAPÍTULO 8 - PARÁMETROS CONSIDERADOS PARA UNA COMBUSTIÓN LIMPIA	108
8.1 Consideraciones ambientales ecológicas	109
8.1.1 Productos de la combustión.	109
8.1.2 Calor desperdiciado.	117
8.1.3 Ruido.	117
CONCLUSIONES	118
ANEXOS	121
BIBLIOGRAFÍA	126

## 1.1 GENERALIDADES

### 1.1.1 IMPORTANCIA DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL EN LAS OPERACIONES INDUSTRIALES.

Todas las operaciones de las plantas industriales dependen de la medición y el control de determinadas variables del proceso. Los instrumentos necesarios se han convertido en parte importante de las operaciones industriales y ya no se consideran un equipo auxiliar.

El control automático es de gran importancia para los procesos continuos, en realidad, el control de los procesos se clasifica a menudo como una operación unitaria de gran importancia. Sin métodos de control seguros, ya sean manuales o controles automáticos, las industrias de proceso no podrían trabajar y aun cuando las operaciones continuas pueden funcionar a veces con un mínimo de instrumentos para guiar a los operadores, es necesario enfatizar que el funcionamiento de muchos procesos continuos actuales sería imposible sin los instrumentos adecuados.

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

Con el empleo de instrumentos de control automático se disminuye la mano de obra necesaria y, como consecuencia, se reduce el costo de la mano de obra directa. Por el contrario, aumenta la uniformidad en la producción y el control estable de las variables que intervienen en el proceso, provocando la eficiencia del equipo y la calidad de los productos obtenidos.

Anteriormente para obtener una máxima utilidad de la instrumentación de las plantas, era necesario que el operario aparte de ser un experto en el proceso, conociera a fondo cada uno de los instrumentos de medición y control que intervienen en éste, lo cual comprende sus aplicaciones, limitaciones, manipulación operacional y además, en un momento dado realizar un análisis para descubrir las fallas correspondientes al proceso y las propias de los instrumentos de medición y control. Ahora esta tarea es soportada de forma amplia y oportuna, por alarmas en los sistemas de control que incluyen sistemas de monitoreo, es decir el operador en una pantalla o panel, podrá ver el estado de los equipos identificando el que este dañado. Esto obviamente ahorra tiempo en la identificación del problema y disminuye el fallo del sistema que repercute directamente en menos perdidas de combustible y de energía: perdidas económicas.

### 1.1.2 CLASES DE INSTRUMENTOS INDUSTRIALES.

Los instrumentos industriales comprenden cuatro clases generales, aquellos que:

- Miden
- Miden y registran
- Miden y transmiten
- Miden y controlan

Un instrumento de medida puede usarse por sí solo o combinarse con un dispositivo controlador para formar uno del tipo controlador automático. Si bien la mayoría de los instrumentos industriales se usan para fines de control, no todos son automáticos, ya que muchos instrumentos de medición se emplean principalmente como guía para control manual.

Todos los instrumentos miden de alguna u otra forma algo, es decir, aprovechan la energía desarrollada por un fenómeno natural, ya sea físico o químico, para transformarla en una cantidad que pueda ser interpretada por nuestros sentidos o por el comparador de un controlador.

### 1.1.3 SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO.

Podríamos clasificar los elementos funcionales de un control automático de la siguiente manera:

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

Este sistema es el más utilizado dentro de la industria de proceso continuo, y así se tiene que un controlador automático es un instrumento que mide el valor de una variable, la compara con un valor de referencia y actúa para que la variable se mantenga en el valor deseado, *punto de ajuste\** o señal de referencia.

El diagrama siguiente (Figura 1.1) muestra un circuito de control automático de retroalimentación básico. Muchos sistemas de control industrial pueden ser reducidos a uno o más de dichos diagramas. El objeto de este circuito es medir y controlar una variable que esta incluida en el “proceso” o sistema controlado que comprende las funciones ejecutadas en, y por el equipo en el cual la variable va a ser controlada. Las variables más conocidas y que se necesitan controlar son: temperatura, presión, flujo, nivel, pH, ente algunas otras.

\* El *punto de ajuste* es también conocido como set point.

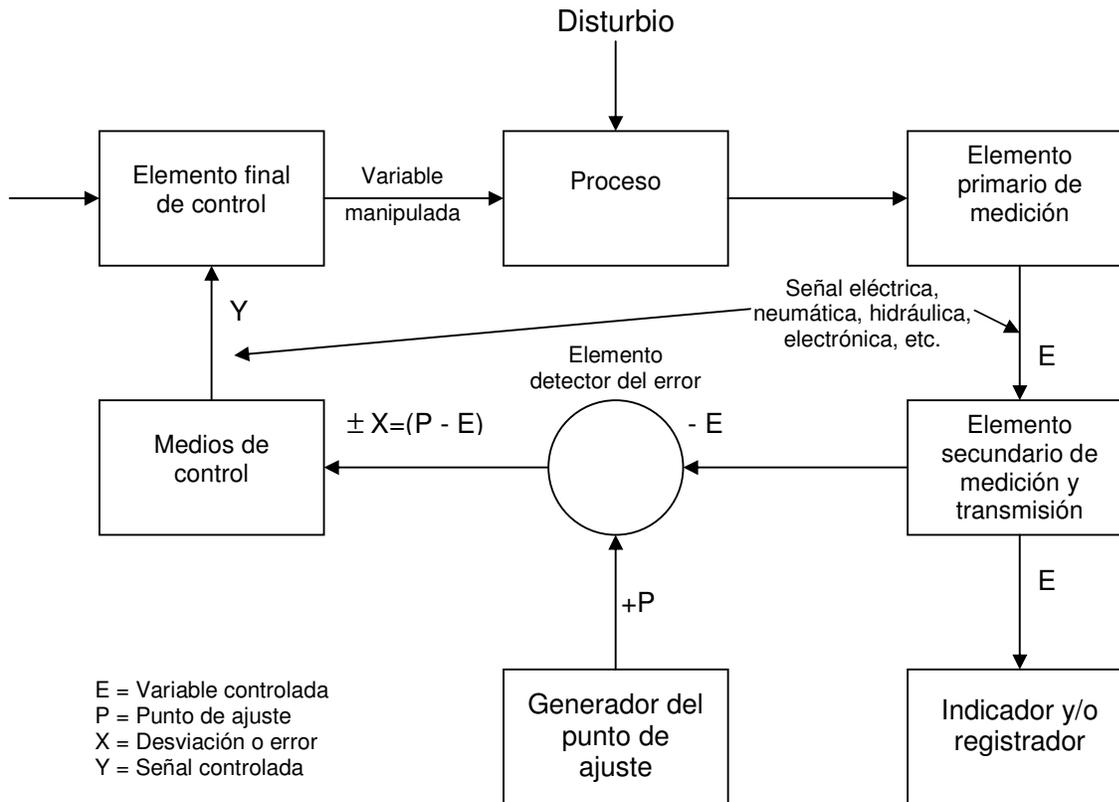


FIGURA 1.1 – CIRCUITO DE CONTROL AUTOMÁTICO

#### 1.1.4 ELEMENTOS PRIMARIOS DE MEDICIÓN.

El elemento primario de medición es aquél que detectara el valor de la variable, o sea, es la porción de los medios que primero utiliza o trasforma la energía del medio controlado, para producir un efecto que es una función de la variable controlada.

Los elementos primarios de medición más comunes son:

- Para temperatura: termómetros bimetálicos, de vástago de vidrio, elementos para sistemas termales, llenos de: líquido (clase I), vapor (clase II), gas (clase III), mercurio (clase V), de resistencia eléctrica, de termopar, pirómetros de radiación, ópticos e infrarrojos, indicadores de color, indicadores pirométricos, termistores y termómetros de cristal de cuarzo, etc.
- Para presión: Tubo bourdon, espiral helicoidal, fuelles, diafragmas, manómetros, sensores de vacío tipo ionización, detectores térmicos de

vacío detectores mecánicos de vacío, sensores electrónicos de presión (piezoeléctricos, resistivos y capacitivos) entre otros.

- Para flujo: Placa de orificio, tubo venturi, tubo pitot, tobera, rotámetros y medidores de desplazamiento positivo, de turbina, máscos, magnéticos, de vórtice, bombas dosificadores, etc.
- Para nivel: Flotadores, desplazadores y medidores de presión diferencial, hidrostática, de burbujeo, de capacitancia, de radiación, ultrasónicos, etc.

#### 1.1.5 ELEMENTOS SECUNDARIOS DE MEDICIÓN.

El elemento secundario de medición y transmisión se encarga de ampliar la señal proveniente del elemento primario de medición, o bien en transformar esa función en un señal útil, fácilmente medible, como un señal eléctrica o una presión neumática, que dependiendo de los fabricantes de instrumentos, comúnmente son señales de 4 a 20 [mA] para electrónicos, y de 3 a 15 [PSI] en el caso de los neumáticos, existiendo otros estándares (Ver anexo 1).

La señal detectada y transmitida por los dispositivos de medición (elementos primario y secundario), es una función de la variable controlada, o sea de la cantidad o condición que es medida y/o controlada y se representa con la letra (E).

La señal de la variable controlada ya sea eléctrica, neumática, hidráulica, electrónica etc., es transmitida simultáneamente a un dispositivo de indicación y/o registro y a un controlador.

La señal que va al elemento de indicación y/o registro es transformada a unidades de la variable controlada, o bien a porcentajes de escala o puntos (decimales), que multiplicados por un factor, dan la lectura en las unidades de la variable medida.

#### 1.1.6 ELEMENTO DETECTOR DEL ERROR Y CONTROLADOR

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

#### 1.1.7 ELEMENTO FINAL DE CONTROL

El elemento final de control convierte las variaciones en la señal de salida del controlador, en variaciones correspondientes en la variable manipulada, cuyos cambios afectan el valor de la variable controlada.

Por lo general el elemento final de control es una válvula operada automáticamente (este es elemento final de control para el caso de un generador de vapor); en otras aplicaciones puede ser un amortiguador, un excitador variable de velocidad, un reóstato variable, un autotransformador, una resistencia variable o cualquier dispositivo similar capaz de cambiar la variable manipulada de un proceso.

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

## 1.2 PROCESO

Sistema desarrollado para llevar a cabo un objetivo determinado: tratamiento del material mediante una serie de operaciones específicas destinadas a llevar a cabo su transformación. El bucle de control típico está formado por el proceso, el transmisor, el controlador y la válvula de control. Considerando una aplicación típica, un intercambiador de calor (Figura 1.2).

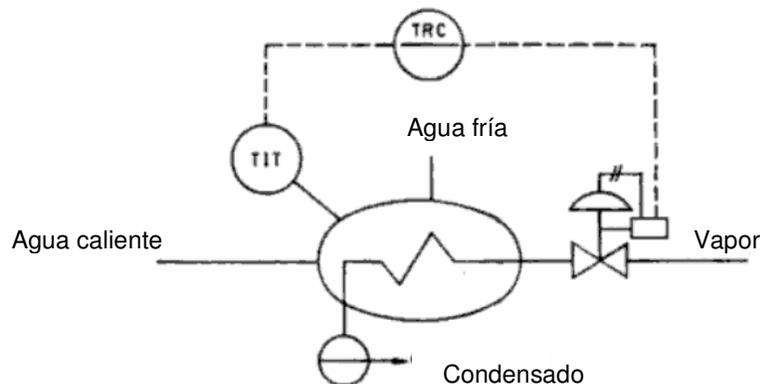


FIGURA 1.2 - INTERCAMBIADOR DE CALOR

De la anterior figura tenemos que el controlador permite al proceso cumplir su objetivo de transformación del material y realiza dos funciones esenciales:

- Compara la variable medida con la de referencia o deseada (punto de consigna) para determinar el error;
- Estabiliza el funcionamiento dinámico del bucle de control mediante circuitos especiales para reducir o eliminar el error.

En la figura 1.3 observamos el diagrama a bloques de un bucle de control. Un circuito abierto de regulación carece de detector de señal de error y de controlador. Un ejemplo consiste en el calentamiento de agua en un tanque

por medio de un intercambiador a resistencia eléctrica sumergido. Dada una tensión de alimentación, una temperatura de entrada del agua, unas condiciones externas y una demanda de agua constante, a temperatura de salida del agua permanecerá constante. Si cambia cualquiera de estas condiciones, la temperatura de salida del agua variara.

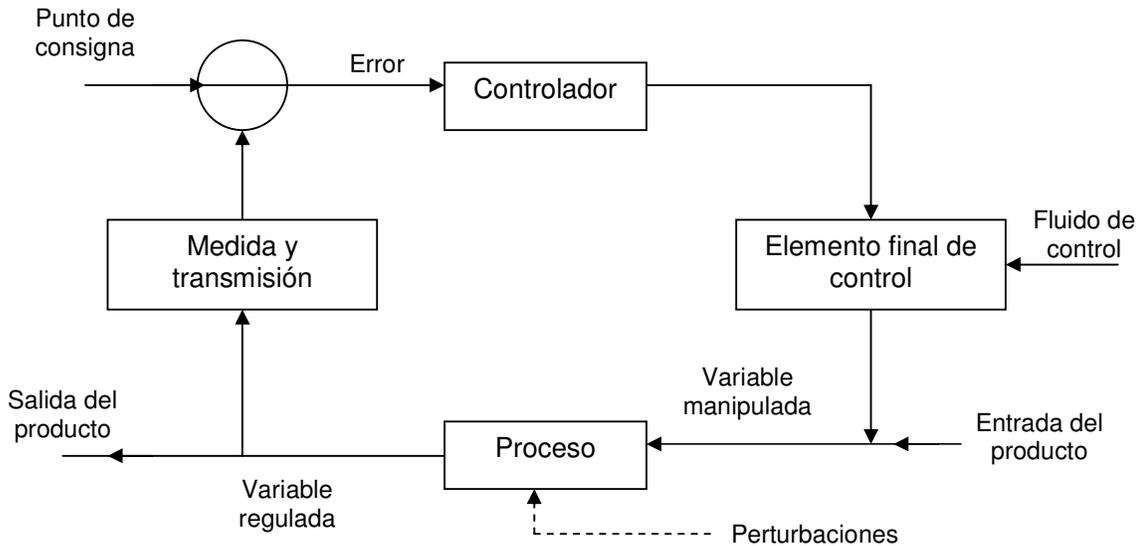


FIGURA 1.3 – DIAGRAMA DE BLOQUES

Ahora, si el intercambiador de calentamiento de agua tuviera un control manual (Figura 1.4), el operario sentiría la temperatura de salida del agua con la mano y acciona la válvula de vapor para mantener el agua a la temperatura deseada. Si existiera una temperatura constante en la salida y hubiera un aumento en el caudal de agua de entrada, la válvula de vapor permanecería aun en la misma posición, el intercambiador no alcanzaría a calentar el mayor caudal del agua fría de entrada, por lo cual, la temperatura de salida disminuiría. Debido a la inercia del proceso deberá pasar más tiempo para que el agua mas fría alcance la mano izquierda del operario.

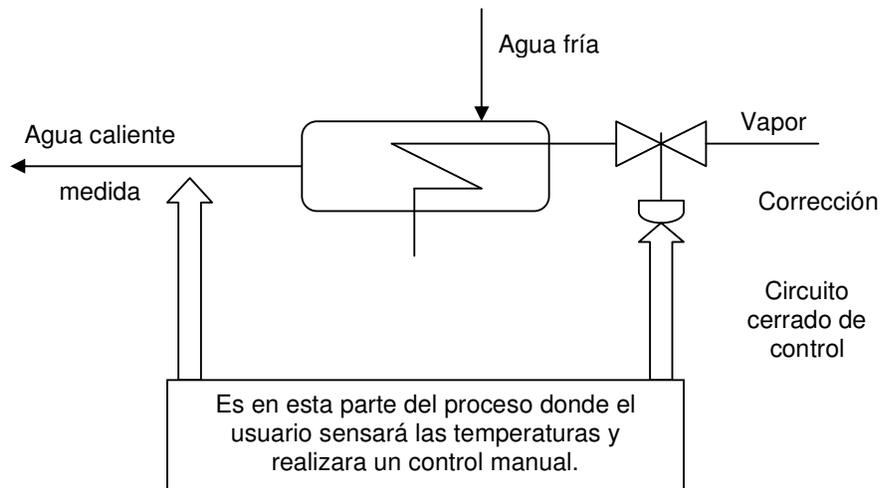


FIGURA 1.4 – CONTROL MANUAL

Cuando este note la disminución de la temperatura, debe compararla con la temperatura que desea y calcular mentalmente el número de vueltas (que tanta apertura o cierre) debe darle a la válvula de vapor y a continuación realizar esta corrección manual en la misma. Se necesita cierto tiempo para llevara acabo estas decisiones y corregir la posición manual de la válvula.

También pasara cierto tiempo hasta que los efectos de corrección de la válvula se notan en la temperatura de salida y pueden ser captados por el operador. Sólo entonces este es capaz de saber si su primera corrección ha sido escasa o excesiva. En este punto, efectuara una segunda corrección, que el cabo de un tiempo dará lugar a otro cambio de temperatura. El operador observará los resultados de esta segunda corrección y realizará una tercera, y así sucesivamente.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, cálculo, corrección, constituyen una cadena cerrada de acciones y se realiza una y otra vez por el operador, hasta que transcurre incierto tiempo y la temperatura del agua se equilibra finalmente al valor deseado por el operador, siempre que naturalmente no hayan cambiado las condiciones del proceso. El conjunto de elementos en circuito cerrado que hacen posible este control reciben el nombre de “bucle, lazo o anillo del control”.

Los procesos presentan dos características principales que deben considerarse al automatizarlos:

- Los cambios en la variable controlada debido a alteraciones en las condiciones del proceso y llamados generalmente cambios de carga;
- El tiempo para que la variable del proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este retardo se debe a una o varias propiedades del proceso: inercia térmica, capacitancia, resistencia y tiempo de transporte.

### 1.2.1 CAMBIOS DE CARGA.

La carga del proceso es la cantidad total del fluido o agente de control que el proceso requiere en cualquier momento para mantener unas condiciones de trabajo equilibradas.

En general los cambios de carga del proceso son debidos a las siguientes causas:

- Mayor o menor demanda del fluido de control por el medio controlado. En el ejemplo del intercambiador de calor, un aumento en el caudal de agua o una disminución en su temperatura da lugar a un cambio de carga porque requiere el consumo de más cantidad de vapor.
- Variaciones en la calidad del fluido de control. Una disminución de presión en el vapor (Figura 1.2) da lugar a un aumento del caudal en el volumen del vapor para mantener la misma temperatura controlada, ya

que las calorías cedidas por el vapor al condensarse disminuyen al bajar la presión.

- Calor generado o absorbido por la reacción química el proceso (proceso exotérmico endotérmico respectivamente). Se presenta un cambio de carga porque el proceso necesita una menor o mayor cantidad del agente de control.

Los cambios de carga en el proceso pueden producir perturbaciones en la alimentación y en la demanda. Las perturbaciones en la alimentación consisten en un cambio en la energía o en los materiales de entrada en el proceso. Por ejemplo las variaciones en la presión de vapor o en la apertura de la válvula de vapor son perturbaciones en la alimentación del proceso.

Las perturbaciones en la demanda consisten en un cambio en la salida de energía o de material del proceso. Los cambios en la temperatura del agua fría y las variaciones en el caudal de agua pertenecen a este tipo.

### 1.3 CONTROL DE VARIABLES DE PROCESO

Una variable de un proceso se puede definir como cualquier cantidad física o química cuya variación afecta la operación de un proceso. Por decir como se controla o regula un proceso, es importante aislar todas las variables que intervienen y determinar cuáles son las independientes y cuales influyen sobre los resultados del proceso lo suficiente para necesitar controlarlas.

Los procesos que involucran las variables básicas de flujo, presión, nivel y temperatura tienen características de comportamiento similar, no importando cual sea su aplicación. Tales características pueden ser muy significativas para anticipar los requisitos de instrumentación. Un criterio primario de un proceso es su constante de tiempo. Es una función de todas las cargas y condiciones de retraso, así como de las propiedades físicas de la variable.

#### 1.3.1 FLUJO

Los procesos de flujos líquidos son mas rápidos, la respuesta típica es de 0.5 segundos o menor. Los flujos gaseosos son ligeramente, más lentos debido a la compresibilidad del gas. Los elementos dinámicos más importantes para el sensado y control del flujo son:

- a) El transmisor
- b) La válvula
- c) Las líneas de transmisión

El elemento primario de medición más común es la placa de orificio asociada con un transmisor de presión diferencial; el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la presión diferencial. La placa de orificio requiere de 10 a 30 diámetros aproximadamente de tubería recta antes del orificio y aproximadamente 5 diámetros después del orificio para garantizar la precisión.

Si la fuente de energía es una bomba centrífuga, la válvula de control puede colocarse en la línea de desviación en paralelo a la línea principal, la cual se acostumbra poner en este tipo de instalaciones con el objeto de eliminar el excedente de flujo que pueda existir cuando se mantiene la velocidad y la carrera de la bomba constantes; como alternativa, se puede controlar la velocidad de la bomba o la carrera de desplazamiento en lugar del flujo en paralelo.

La válvula nunca se colocará sobre la succión de una instalación de bombeo de fluidos. Al cerrar la válvula se provocaría una baja presión en el lado de la succión, que podría ser menor que la presión de vapor del fluido. Esto generaría gases y confinaría vapor dentro de la bomba.

En instalaciones de bombas centrífugas, la válvula se coloca directamente en la línea de descarga, ya que si aumenta ligeramente la presión, el impulsor de esta bomba tiene suficiente claro con la envolvente, de tal manera que puede girar sin aumentar la presión excesivamente.

En cualquier control para una bomba se debe tomar en cuenta su tamaño y su trabajo. Una instalación grande de un compresor una bomba tendrá una inercia muy grande que evita una respuesta rápida. En tal caso es mejor usar un control en derivación que tratar de controlar el equipo directamente.

La mayor parte de los controles de proceso de flujo requieren una banda proporcional ancha con reajuste rápido. Esto evita la acción de control sobre las perturbaciones transitorias, pero asegura la corrección rápida de cualquier señal de error que persista. El tiempo que el error persiste, más que su tamaño, es de mayor importancia como medio de detección.

Es recomendable usar válvulas de característica lineal en lugar de válvulas de igual porcentaje, especialmente cuando la caída de presión a través de la válvula es variable. Esta ayuda a contrarrestar la no linealidad de la medición diferencial.

Con gases, la localización de la válvula de control depende de si el flujo va a ser controlado tomando la presión del flujo, ya sea antes del orificio o después. La compresibilidad del gas a diferentes presiones de valores de flujo que son proporcionales a la raíz cuadrada de las presiones absolutas. Si se desea mantener un flujo constante, la presión diferencial en el orificio debe ser absolutamente constante.

### 1.3.2 PRESIÓN

El control de presión se caracteriza por una gran capacidad, un pequeño atraso de transferencia y un corto tiempo muerto. La capacidad incrementada es útil a la autorregulación del proceso. Esta característica permite controles de tipo proporcional para ser usados en muchos casos. Los reguladores automáticos de presión son muy utilizados en control de presión. Estos

controladores tienen bajo costo, alta seguridad y necesitan poco mantenimiento.

El acoplamiento del proceso directamente con el regulador da una respuesta rápida cuando hay desajuste en el sistema. Debido a que el dispositivo es principalmente un sistema de resorte, la precisión del control casi siempre se mantiene dentro de 1 % de la escala total.

#### LÍQUIDOS

El control de presión en líquidos es muy similar al control de flujo. El sistema es no lineal ya que la presión varía en función del cuadrado del flujo. La ganancia del proceso generalmente es menor a 1.0 (en los sistemas de flujo es 1.0), de tal manera que la ganancia del controlador generalmente es más grande que la ganancia usada en sistemas de flujo. Regularmente existe ruido en la medición.

#### GASES

Los procesos de presión en estado gaseosos son sistemas de capacidad simple y normalmente no presentan mucho problema de control. Frecuentemente se usan controladores auto-operados por piloto con buenos resultados (la presión en la línea se conecta al diafragma de la válvula directamente a través de una válvula sencilla). Las ganancias típicas de estos controladores son de 20 o 50 o mayores. Un regulador de aire es un ejemplo sencillo de un regulador de presión auto-operado.

Deberán usarse sistemas de presión convencionales (transmisor-controlador-válvula) cuando las condiciones de flujo exigen válvulas de control muy grandes, si los puntos de ajuste cambian frecuentemente, para mayor gamabilidad o si la desviación debe ser eliminada completamente.

La válvula es el elemento dinámico secundario importante. El proceso es sí mismo generalmente es un elemento grande de capacidad simple y las dimensiones son rápidas. El retraso de distancia velocidad en este caso no existe. El control proporcional generalmente es adecuado, se puede añadir reajuste para eliminar totalmente la desviación permanente; se pueden alcanzar altas ganancias, o moderadas con reajuste rápidos si las pequeñas desviaciones permanentes son un problema.

#### VAPORES

Las más importantes aplicaciones de control de presión en vapor se refieren a la transferencia de calor, por ejemplo, las columnas de destilación, los evaporadores, etc. En estos casos el sistema de control es básicamente un control de balance calor. Los circuitos de control de la presión del vapor actúan como circuitos de control de temperatura; se recomiendan controladores de tres modos de ganancia moderada, velocidad de reajuste automático de 0.5 rep/min o menores y tiempos de acción derivada de 0.5 min o mayores.

El regulador de presión automático consiste esencialmente, en la mayoría de los casos en una válvula de asiento simple de cierre hermético. Debido a esto puede fallar en la posición del tapón, causado porque haya baja presión en la línea o por ligeras fugas a través del diafragma. Si esta falla de posición no puede ser tolerada, deben ser usados dispositivos operados con pilotos.

Los reguladores de presión automáticos deberían ser operados más o menos a 50 % de su carrera completa bajo condiciones normales para obtener mejores resultados y el menor desgaste en la válvula. En las aplicaciones donde existe una diferencia grande entre los flujo máximos y normal, pueden usarse dos reguladores en paralelo. La presión de control de un regulador se fija para las condiciones de flujo normal, mientras que la del segundo es fijada más o menos un 10% abajo. Cuando la presión de salida del primer regulador disminuye debido a una demanda mayor a la normal, el segundo regulador opera para aumentar la capacidad de flujo sin perder la presión de control.

El conjunto de trasmisor-controlador y válvula y el control de presión operado con piloto, son otros dos tipos de controles de presión. Los controladores de presión operados con piloto, son otros dos tipos de controles de presión. Los controladores de presión operados con piloto utilizan un elemento de medición que actúa sobre un mecanismo de control neumático que produce una señal de aire a presión proporcional a la presión medida. Las ventajas de estos dos tipos de instalación son:

- Mayor sensibilidad
- Banda proporcional, reajuste y calibración ajustables
- Más facilidad de ajuste
- Una mayor flexibilidad
- Para un rango dado un mayor número de ajustes de presión
- Una mayor selección de rangos de presión
- Rangos de flujo mas amplios
- Se pueden usar con caídas de presión grandes o pequeñas
- Se pueden usar donde las condiciones de flujo requieren grandes cuerpos de válvulas.
- Las válvulas de control tienen rangos estándar de presión.

Cuando se tiene un sistema de gran capacidad, el modo proporcional es casi siempre el más adecuado para el control. El reajuste automático se usa cuando no se pueden tolerar desviaciones del punto de control.

### 1.3.3 NIVEL

El control de nivel es similar al control de presión, casi siempre tiene una capacitancia muy grande. Algunos sistemas tienen un tiempo muerto considerable, sin embargo, los retrasos de transferencia son pequeños. La capacitancia contribuye a la autorregulación del nivel del líquido en niveles que operan a presiones atmosféricas. La autorregulación es pequeña generalmente cuando el nivel esta sometido a presión.

El control de nivel de líquido medio se usa donde la precisión de control de nivel puede ser sacrificada con el objeto de mantener la descarga del recipiente más o menos constante. Por ejemplo, una aplicación típica es aquella donde el recipiente del proceso bajo control es parte de una cadena de procesos y la descarga de uno es la alimentación de otro. Un tanque con control de nivel funciona como tanque amortiguador para absorber cualquier cambio violento de carga.

En muchos procesos es necesario el control exacto. El control de la banda proporcional, con frecuencia proporciona un nivel lo más cercano al deseado con muy pequeños disturbios. Si el tanque es parte de una serie de procesos, este modo impide desajustes de carga severos a cambio de pequeños sacrificios en el nivel. Controladores del tipo de flotador conectado directamente son usados con modos proporcionales iguales a una fracción pequeña de la carrera del flotador. Con estos dispositivos la banda proporcional es tan pequeña como  $3/16$  de pulg, fuera del nivel. Pero si hay gran capacitancia en el nivel, esta banda es adecuada para la modulación de la válvula y para un controlador razonable y exacto. La simplicidad y economía son las ventajas de este equipo. En los tanques de purga se usan con frecuencia los controladores operados por flotador.

El nivel es un sistema integrador de capacidad simple. La capacitancia del tanque es directamente proporcional a su diámetro. Los tanques con gran diámetro son poco gasto no presentan mayor problema de control; pero los recipientes de pequeño diámetro y gran gasto son mas difíciles de controlar aunque este caso no es común. El retraso del tanque es igual al volumen dividido entre el gasto.

Los sistemas de control de nivel pueden dividirse en dos categorías: Control de precisión y control promedial. Para control de precisión, si la capacitancia del sistema es grande, se pueden usar controladores proporcionales satisfactoriamente. Conforme disminuye la capacitancia, la ganancia del controlador debe ser disminuida y entonces se hace necesario el uso de reajuste automático.

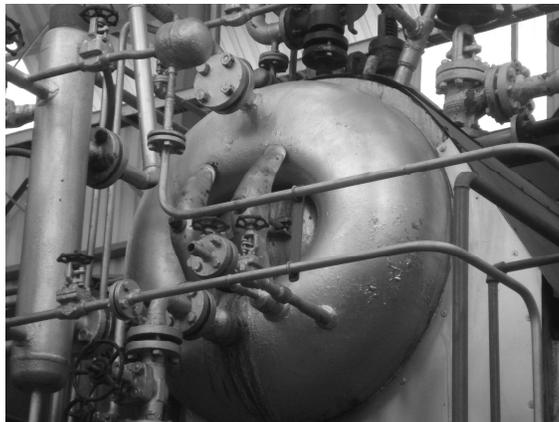


FIGURA 1.5 – DOMO SUPERIOR

Los sistemas de nivel promediales sacrifican el estricto control en aras de mantener el flujo de salida constante. Una aplicación típica es aquella en la cual los recipientes controlados son capacidades de amortiguamiento intercaladas entre dos secciones de un proceso de múltiples etapas, el propósito de este es absorber cambios entre etapas. Se permite al nivel moverse libremente entre límites muy amplios y se aplican correcciones gradualmente sólo para mantener al nivel dentro de esos límites. En estos casos lo más indicado es utilizar un controlador con ganancia baja y reajuste; a veces se usan controladores de doble ganancias o de doble reajuste. Estos controladores tienen ganancia y reajuste bajos en el área intermedia al punto de ajuste y transfieren a alta ganancia y reajuste rápido si el nivel se desvía demasiado del punto de control. A veces existe un ruido en la medición debido al oleaje o turbulencia especialmente en sistemas de baja capacitancia.

El control de nivel aplicado a generadores de vapor es necesario para mantener un nivel de agua seguro en el domo superior (Figura 1.5) del generador. En este domo, como se verá más adelante, el agua comparte idealmente la mitad del espacio con el vapor que se genera, una mala regulación del nivel causaría daños en las tuberías o peor aun, una explosión.

## 2.1 DEFINICIÓN Y GENERALIDADES

En su definición más estricta podemos decir que un generador es un equipo intercambiador de calor, cerrado y sujeto a presión mayor que la atmosférica, que transfiere energía a un fluido, generalmente agua, para obtener vapor o agua caliente.

Así pues, el generador de vapor es un sistema en el que se hace hervir agua para producir vapor. El calor necesario para calentar y vaporizar el agua puede ser suministrado por un hogar (espacio donde se produce la combustión), por gases calientes recuperados a la salida de otro sistema industrial (horno por mencionar un ejemplo), por irradiación solar o por una corriente eléctrica. Cuando el calor es suministrado por el líquido caliente o vapor que se condensa se suelen emplear otras denominaciones, tales como vaporizador y transformador de vapor. El generador de vapor aprovecha el calor generado por la combustión de un material combustible.

Si el generador de vapor está conectado a otros sistemas, de los cuales unos calientan el agua (precalentadores de agua, economizadores), o el aire de combustión (precalentador de aire) suele denominarse al conjunto, grupo evaporador.

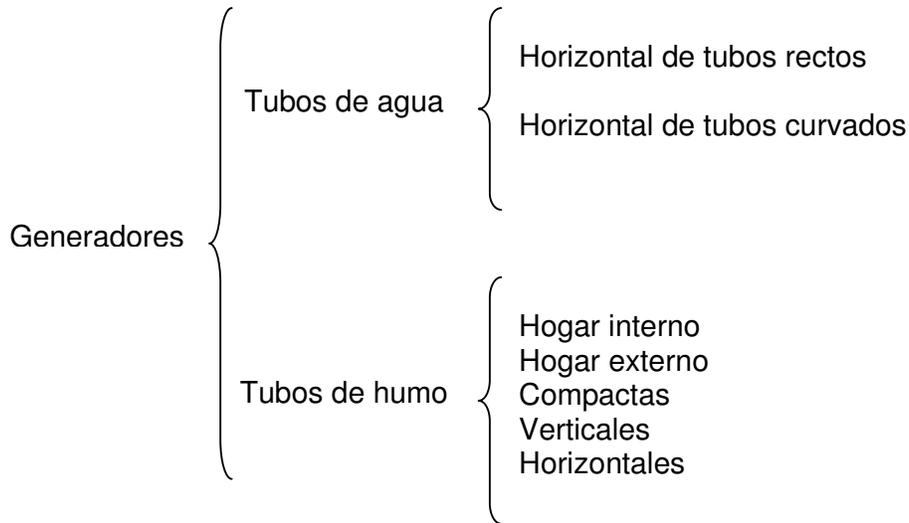
La forma de los generadores de vapor ha evolucionado considerablemente y se ha diversificado. Los primeros generadores consistían en recipientes cerrados en cuya parte inferior, llena de agua, estaba sometida a la irradiación de un hogar o al contacto de gases calientes. Para obtener además grandes superficies de contacto, se construyen más adelante generadores con hervidores, situados debajo del cuerpo cilíndrico principal y conectado a este mediante conductos tubulares.

Un generador de vapor no es una caldera, en la actualidad estos términos hacen referencia al mismo concepto, sin embargo en la definición más estricta una caldera no tiene una combustión variable como un generador de vapor, es decir, el sistema de calentamiento del fluido en una caldera es on/off, (arranque/paro), la caldera calentará el fluido al detectar que éste está por debajo de la temperatura deseada y dejará de suministrar calor cuando alcance la temperatura para la cual fue calibrado, mientras que un generador de vapor puede operar en condiciones mínimas de calentamiento o puede elevar la temperatura del fluido a cierto valor y permanecer ahí mientras las condiciones de operación se lo permitan. Para mantener operando un generador de vapor dentro de ciertos parámetros, se necesitan lazos de control, lógicas de encendido, apagado y en caso de emergencia, así como todas las condiciones de combustible y aire necesarios para su operación, condiciones que solo se lograrán con la implementación de un control.

Un generador produce vapor, a ciertas condiciones (presión, flujo y temperatura) necesarias para plantas de proceso mientras que una caldera está diseñada para calentar un fluido, solo para calentar.

2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS GENERADORES DE VAPOR

En la actualidad los generadores se clasifican de acuerdo a su diseño, con base en la circulación del agua por los tubos del equipo:



GENERADORES DE TUBOS DE AGUA O ACUATUBULARES

Estos generadores son más convenientes para grandes capacidades y presiones, se componen de tubos y domos, los tubos van interconectados a los domos. Los domos almacenan agua y vapor. La circulación del agua es por el interior de los tubos, y por la parte externa de los mismos se tiene la circulación de gases; una variante en el diseño de tubos de agua es el generador de serpiente para presiones y capacidades bajas.

El generador industrial de tubos de agua típicamente produce vapor o agua caliente para aplicaciones de procesos industriales, y se utiliza con menor frecuencia para aplicaciones de calefacción. En el diseño de tubos de agua, los tubos contienen vapor y/o agua y los gases productos de la combustión pasan alrededor de los tubos. El domo de vapor (superior) y el domo de lodos (inferior) están conectados por los tubos, los cuales forman tanto la sección de convección y el área del hogar.

Los generadores paquete industriales de tubos de agua se especifican por su capacidad de evaporación medida en toneladas de vapor por hora [Ton/Hr] en las condiciones de operación, por lo que varían desde 4.54 hasta 68.1 [Ton/Hr] (10,000 - 150,000 [Lbs/Hr]). Los generadores industriales de tubos de agua se caracterizan por su rápida capacidad de producción de vapor y alta calidad de éste. El vapor es generado muy rápidamente debido al poco contenido de agua en los tubos, permitiendo así una respuesta rápida a los cambios de demanda de carga. El diseño del generador industrial de tubos de agua lo hace capaz de generar tanto vapor saturado como vapor sobrecalentado.

Cuando las aplicaciones demandan vapor sobrecalentado, grandes o fluctuantes cargas de vapor, altas presiones o alta calidad del vapor, un generador industrial de tubos de agua deberá ser considerado.

### GENERADORES DE TUBOS DE HUMO O PIROTUBULARES

Se emplean donde la demanda de vapor es relativamente baja, comparado con los acuaturbulares, tienen la ventaja de su tamaño compacto y permite fluctuaciones en cuanto a la demanda de vapor. Se diseñan con los tubos dispuestos de forma horizontal o vertical con hogar interno o externo.

Los generadores de tubos de humo o pirotubulares están disponibles para baja o alta presión de vapor o para aplicaciones de agua caliente. Estos generadores se utilizan típicamente en aplicaciones que van de los 15 a los 1500 [CC] (Caballos Caldera) (Ver Anexo 2). Un generador de tubos de humo es un recipiente cilíndrico con la flama en el hogar y los gases de combustión fluyendo dentro de los tubos. El hogar y los tubos se encuentran dentro de un recipiente cerrado más grande, el cual contiene el agua y el vapor.

La construcción de tubos de humo provee algunas características que lo separan de los demás generadores. Debido al tamaño de su recipiente, los generadores de tubos de humo contienen una gran cantidad de agua, permitiéndole responder rápidamente a los cambios en la demanda de carga con una mínima variación en la presión del vapor.

La presión del vapor en un generador de tubos de humo generalmente se encuentra limitada a aproximadamente 24.6 [Kg/cm<sup>2</sup>] (350 [PSI]). Para alcanzar mayor presión, sería necesario utilizar una envolvente y material de tubos muy gruesos. Por esta razón, se utilizan calderas tubos de agua para presiones por encima de los 24.6 [Kg/cm<sup>2</sup>]. Las calderas tubos de humo están construidos generalmente similares a un intercambiador de calor de tubos y coraza. Una gran cantidad de tubos resulta en más superficie de calentamiento por caballo caldera, lo cual mejora la transferencia de calor y la eficiencia.

## 2.2 PARTES PRINCIPALES DE UN GENERADOR

### 2.2.1 CUERPO

Dependiendo del modelo, tipo y marca, el tamaño del cuerpo de un generador varía en forma y tamaño. El cuerpo puede ser cilíndrico o rectangular. Los generadores de tubos de humo, tienen un cuerpo cilíndrico hecho de chapa de acero, herméticamente cerrado con el objeto de almacenar agua y vapor y se complementa con, fluxes, envolventes y mamparas. En el caso de un generador de tubos de agua (Figura 2.2), el cuerpo lo forman los domos, los tubos que interconectan los domos superior e inferior conocidos como fluxes y la envolvente, de manera que adquiere una forma rectangular.



FIGURA 2.1 – CHIMENEA

### 2.2.2 HOGAR

Es la parte del generador donde se lleva a cabo la combustión. El hogar en los generadores pirotubulares es un tubo de gran diámetro con perfil corrugado o liso. En los generadores acuatubulares el hogar se ubica en la cavidad que forman los tubos que comunican a los domos.

### 2.2.3 CHIMENEA

Es un ducto por el cual se desalojan los gases de combustión a un lugar conveniente y seguro (Figura 2.1). Además cumple con ser un sistema efectivo de dispersión de contaminantes.

### 2.2.4 DOMOS

Para el caso de los generadores acuatubulares los domos son dos tanques horizontales, uno superior y otro inferior (Figura 2.3), ambos conectados por tubos (fluxes) por donde viaja el agua. La inyección de agua al generador de vapor será por el domo superior, este domo tiene como característica que solo la mitad del tanque contendrá agua, el resto tendrá vapor, por esta razón este tanque estará presurizado, de acuerdo a la presión de trabajo de la planta. El domo inferior permanecerá lleno de agua.

### 2.2.5 CAJA DE AIRE

Este elemento no es más que un ducto (rectangular) por el cual se direcciona el aire que estará entrando al hogar. Además de su función de contener y soportar al quemador, la caja de aire cumple la importante función de distribuir uniformemente el aire de combustión al quemador.

### 2.2.6 QUEMADOR

Es un reactor donde se lleva a cabo la combustión. Los quemadores son equipos generalmente compuestos de: registro, atomizador, anillo o cañón de gas, piloto y garganta de refractario. (Figura 2.2)

Aunque el ventilador de aire de la combustión no es un componente del quemador propiamente dicho, hay que señalar que es uno de los componentes individuales que mayor influencia tienen en la adecuada operación del quemador. El quemador tiene dos funciones principales:

1. Acondicionar tanto el combustible como el aire de combustión y mezclarlos en la forma más eficiente para lograr una combustión óptima, manteniendo estabilidad en la flama.
2. Ajustar la forma de la flama para lograr la más adecuada ala hogar o a la aplicación específica.

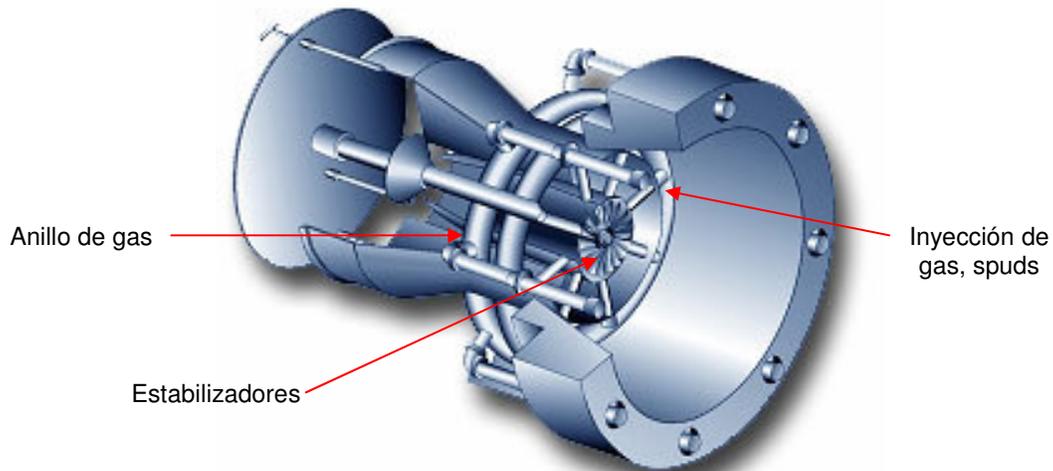


FIGURA 2.2 – PARTES DEL QUEMADOR

### 2.2.7 ACCESORIOS

Los accesorios de una caldera son todos los dispositivos, instrumentos de operación, control y sobre todo seguridad que hacen posible un funcionamiento confiable y sencillo del equipo. Los accesorios difieren en características, dependiendo de marcas y modelos de calderas y son clasificados de manera general como:

- Accesorios de seguridad

Reducen los riesgos de operación del equipo y dan confianza al operador en su trabajo. Ejemplos de estos son las válvulas de seguridad, interruptores límites de presión, interruptores de nivel de agua, programadores, sistemas de protección contra falla de flama.

- Accesorios de control

Regulan los parámetros de funcionamiento del equipo. Ejemplos: termostatos, modutrol, válvulas reguladoras de presión, controladores lógicos programables, etc.

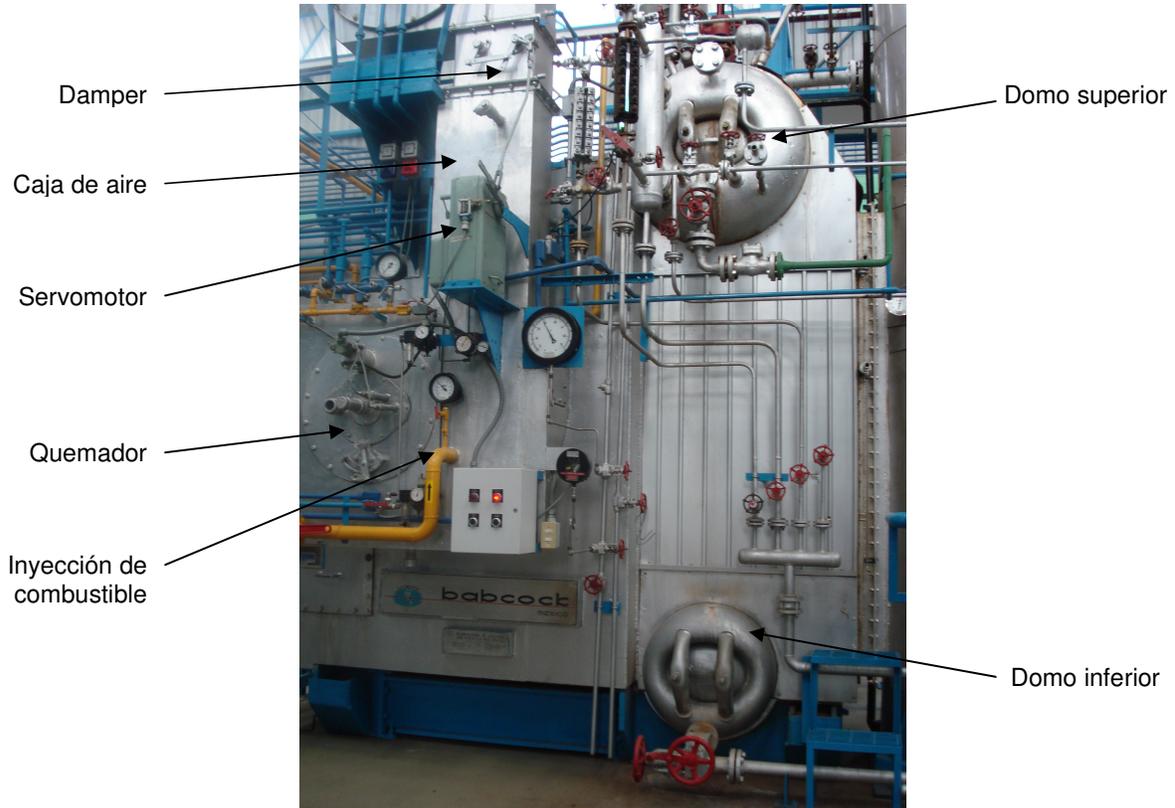


FIGURA 2.3 – CUERPO Y PARTES DEL GENERADOR

- Accesorios de operación

Facilitan la operación y/o mejoran el funcionamiento del equipo. Ejemplos: arrancadores, bombas de alimentación de agua o combustible, quemador, ventilador, equipo de tratamiento de agua, tanques de alimentación, trampas de vapor, cabezales de distribución, líneas de distribución y retorno, etc.

- Accesorios de medición

Informan el valor de los diferentes parámetros de funcionamiento del equipo, ejemplos: manómetros, termómetros, etc.

## 2.3 ELEMENTOS PARA LA OPERACIÓN DE UN GENERADOR

Un generador requiere de cuatro elementos básicos para su operación:

- Agua
- Alimentación eléctrica
- Aire
- Combustible

### 2.3.1 AGUA

Independientemente del uso universal del agua (consumo humano y fines sanitarios) el agua es empleada ampliamente en la industria de varias maneras:

- Para generar vapor y usar la energía contenida en este, para aplicaciones de fuerza o calentamiento.
- Para limpieza o proceso de productos.
- Para enfriar (torres de enfriamiento).

El agua de uso industrial es la materia prima en la generación del vapor, por lo cual tiene que ser de gran calidad; desafortunadamente el agua trae consigo gases y sales en solución, así como materia orgánica e inorgánica en suspensión y otros elementos que producen daños en las calderas como la incrustación y la corrosión. Así, es necesario hacerle un tratamiento (Ver capítulo 3) para reducir las impurezas que ocasionan problemas en el funcionamiento de una caldera.

### 2.3.2 AIRE

El aire, elemento primordial para la supervivencia del ser humano, es empleado en los equipos de combustión como son las calderas para las siguientes funciones:

- Barrido de gases,
- Combustión (mezcla oxígeno/combustible),
- Atomización (sólo en combustibles líquidos),
- Enfriamiento de superficies calientes.

### 2.3.3 COMBUSTIBLE

Se define como combustible a todo elemento o cuerpo capaz de combinarse químicamente con el oxígeno del aire, dando como resultado de esta reacción luz, calor y desprendimiento de gases.

Existen 3 tipos de combustibles, los cuales son:

- Combustibles sólidos: carbón, madera, hulla, bagazo de caña, etc.
- Combustibles líquidos: aceites combustibles, gasolina, alcohol, queroseno, etc.
- Combustibles gaseosos: gas natural, gas de alto horno, gas L.P., etc.

Los combustibles contienen 3 elementos químicos de mayor importancia: carbono, hidrógeno y azufre. El azufre normalmente es el menos relevante como fuente de calor pero es el de mayor importancia en los problemas de corrosión y contaminación.

Entre los combustibles más comunes que se manejan en nuestro país para su empleo en calderas se tienen los siguientes:

- Combustóleo
- Gasóleo
- Diesel
- Gas Natural
- Gas L.P.

Algunas características importantes para la selección de los combustibles son: poder calorífico, densidad, viscosidad, contenido de humedad, punto de inflamación, punto de combustión, contenido de azufre y cenizas, así como la disponibilidad de suministro del combustible en la zona de trabajo.

#### Combustibles sólidos

El carbón es el combustible sólido más utilizado, el cual se extrae del seno de la tierra y que se ha producido por descomposición de materias vegetales y animales, además de las altas temperaturas y presiones en el curso de los siglos. La presencia de azufre en los carbones es perjudicial por los componentes que se forman durante la combustión.

#### Combustibles líquidos

El petróleo es un excelente combustible para generar calor y fuerza, siendo el más popular de los combustibles líquidos y el de mayor consumo en México. Del petróleo crudo que se extrae de la tierra se obtienen los aceites combustibles que son los que utilizamos en las calderas tales como combustóleo, gasóleo y diesel.

#### Combustibles gaseosos

El gas natural es el combustible con mayor eficiencia de operación. La combustión completa se puede efectuar más fácilmente con menor exceso de aire. Al estar libre de cenizas, la combustión es prácticamente sin humo y no existe acumulación de escoria ni contaminación ambiente. Sin embargo, se debe tener una mayor consideración de seguridad ya que la posibilidad de explosión es más grande que con otros combustibles.

#### 2.3.4 ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA

Forma de energía que se puede transformar en los motores que impulsan las bombas, ventiladores, compresores o en el campo magnético que activa bobinas, arrancadores o elementos de control y seguridad del equipo. Todos estos equipos operan con 120 [VCA] a 60 HZ excepto las bombas de agua alimentación que operan a 440 [VCA] y el ventilador de tiro forzado.

## 2.4 PRODUCTOS DEL GENERADOR

### 2.4.1 VAPOR

El vapor es una fase intermedia entre la líquida y la gaseosa. Los vapores tienen características semejantes a los gases, puesto que llenan por completo las paredes del recipiente que los contiene, pero no siguen la ley de los gases perfectos. Las propiedades o características de los vapores se encuentran registradas en las tablas y gráficas de los vapores. En estas páginas trataremos principalmente el vapor de agua, sin embargo todos los vapores se comportan de un modo semejante, diferenciándose sólo cuantitativamente en sus características. Se acostumbra llamar fluido a toda sustancia en su fase líquida, de vapor o gaseosa.

### 2.4.2 GASES DE LA COMBUSTIÓN (EMISIONES)

La temperatura de los gases de escape o temperatura de la chimenea es la temperatura de los gases producto de la combustión cuando estos salen del generador. La temperatura de estos gases deben ser un valor comprobado para el cálculo de la eficiencia y que refleje el consumo real de combustible en la caldera. Una forma potencial para manipular un valor de eficiencia es utilizar una temperatura de gases menor que la real en el cálculo. Al observar un cálculo de eficiencia o el valor de ésta, se debe considerar la temperatura del gas de escape. Las condiciones de cada sitio variarán y tendrán un efecto en la temperatura del gas de escape. Sin embargo, si el valor de la eficiencia es preciso, las temperaturas de los gases debe ser confirmable en las aplicaciones existentes. No se debe confiar en temperaturas de los gases estimadas, ya que ésta debe ser comprobada.

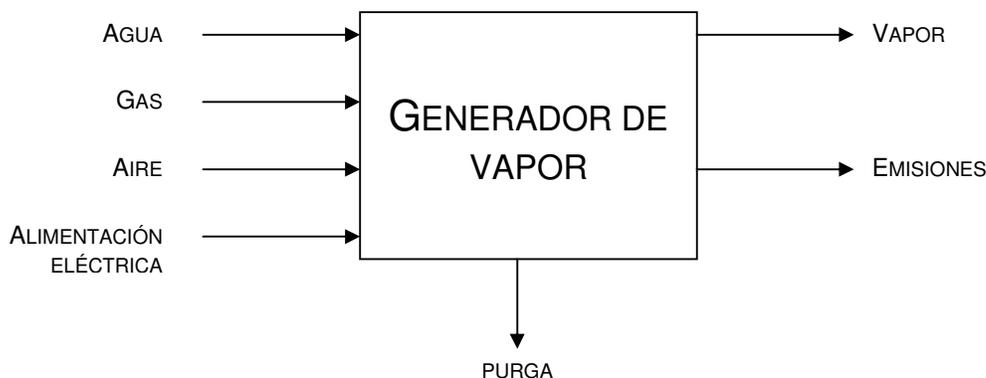


FIGURA 2.4 – ELEMENTOS Y PRODUCTOS EN UN GENERADOR

## 2.5 CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES DE UN GENERADOR

Los generadores de vapor se utilizan en la mayoría de las industrias debido a que muchos procesos emplean grandes cantidades de vapor. El generador se caracteriza por una capacidad nominal de producción de vapor en Toneladas/hora [T/h] a una presión específica y con una capacidad adicional de caudal en puntas de consumo de la fábrica.

Al generador se le exige, pues, mantener una presión de trabajo constante para la gran diversidad de caudales de consumo en la fábrica, por lo cual debe ser capaz de:

- Aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del gas con el aire.
- Desde el punto de vista de seguridad el nivel debe de estar controlado y mantenido dentro de unos límites.
- Es necesario garantizar una llama segura en la combustión.
- El sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro del generador.
- El funcionamiento del generador debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuadas, lo cual es posible con un control digital y/o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros de 2 a 10 % en combustible) y ganar en seguridad.

### 2.5.1 COMBUSTIBLES

Recuerde que desde un punto de vista operacional, los costos del combustible representan aproximadamente el 10% del gasto operacional en una planta. Así, el combustible es una consideración importante. Normalmente, los combustibles utilizados son el gas natural, propano o algún aceite ligero. Las recientes y cada vez más estrictas normas ambientales sobre emisiones han reducido en gran medida en algunas regiones el uso de aceites pesados (combustóleo) y combustibles sólidos como son el carbón y la madera. De los combustibles fósiles el gas natural se quema de manera más limpia y deja menos residuos, de forma que se requiere menos mantenimiento.

Puede ser ventajoso suministrar un generador con un quemador dual que pueda quemar dos combustibles independientemente. Por ejemplo, diesel o gas natural. Un quemador dual permite al usuario sacar ventaja de los precios en los "tiempos pico", lo cual sustancialmente reduce los costos del gas cuando se opera fuera de los tiempos pico, simplemente cambiando el interruptor del combustible para utilizar el combustible de respaldo, diesel en este caso. La capacidad dual de un generador también es ventajosa si el suministro del combustible principal debe ser cerrado por seguridad o por mantenimiento.

Algunas corrientes de desperdicio pueden usarse como combustible en la caldera. Además de reducir los costos por combustible, quemar un

combustible alterno en una caldera puede reducir en gran medida los costos de desecho. Las corrientes de desperdicio se utilizan típicamente en combinación con combustibles estándares para asegurar una operación segura y permitir mayor flexibilidad en su operación.

### 2.5.2 EMISIONES

Las normas sobre emisiones en calderas se han vuelto muy estrictas en muchas áreas, debido a las nuevas regulaciones sobre aire limpio. La capacidad de la caldera para cumplir con estas regulaciones sobre emisiones depende del tipo de caldera y las opciones del quemador. La eficiencia es utilizada para medir el funcionamiento económico de cualquier equipo. En la industria de la caldera, existen cuatro definiciones de eficiencia, pero solamente una representa la eficiencia de la caldera. A continuación se presentan las definiciones y cómo medirla.

### 2.5.3 EFICIENCIA

#### EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

La eficiencia de la combustión es la efectividad del quemador únicamente y se relaciona con su habilidad para quemar completamente el combustible. El generador tiene poca influencia en la eficiencia de la combustión. Un quemador bien diseñado operará con un 15 a 20% de exceso de aire cuando mucho, al convertir toda la energía química del combustible en energía térmica.

#### EFICIENCIA TÉRMICA

Eficiencia térmica es la efectividad de transferir calor a un generador. No toma en cuenta las pérdidas por convección y radiación, por ejemplo, de la envolvente de la caldera, tubería de la columna de agua, etc.

#### EFICIENCIA DEL GENERADOR

El término de "eficiencia del generador" normalmente es sustituido por eficiencia térmica o combustión. La verdadera eficiencia de la caldera es la medida de la relación combustible/vapor. La eficiencia combustible/vapor es la definición correcta utilizada cuando se determina la eficiencia del generador. La eficiencia combustible/vapor se calcula usando cualquiera de los dos métodos, como se describen en el Código de Prueba de Energía ASME, PTC 4.1 (ASME Power Test Code, PTC 4.1).

El primer método es entrada-salida, que es el cociente de BTU de salida dividido entre los BTU de entrada por 100. El segundo método es el balance de energía, el cual considera la temperatura de la chimenea y las pérdidas, los niveles de exceso de aire y las pérdidas por radiación y por convección. De tal forma que el cálculo del balance de energía para la eficiencia combustible/vapor es 100 menos el porcentaje total de pérdidas en la chimenea menos el porcentaje de pérdidas por radiación y convección.

#### 2.5.4 LA TEMPERATURA DE LA CHIMENEA Y PÉRDIDAS

La temperatura de la chimenea es la temperatura de los gases de combustión (secos y vapor de agua) que abandonan el generador. Un generador bien diseñado retiene tanto calor como es posible de los gases de combustión. Así, una menor temperatura de la chimenea representa una transferencia de calor más efectiva y una menor cantidad de pérdidas de calor en la chimenea. La temperatura de la chimenea refleja la energía que no se transfiere del combustible al vapor o al agua caliente. Es un buen indicador de la eficiencia del generador. Siempre que se garantice la eficiencia, las temperaturas de la chimenea deberán verificarse. Las pérdidas de chimenea es una medida de la cantidad de calor que se pierde con los gases secos de la combustión (calor no aprovechado) y la pérdida por humedad (producto de la combustión), basado en el análisis del combustible utilizado particularmente, la humedad en el aire de combustión, etc.

#### 2.5.5 EXCESO DE AIRE

Se define como el aire extra suministrado al quemador por encima de la cantidad de aire requerido para una combustión completa. El exceso de aire es suministrado al quemador porque si se quema un combustible sin el suficiente aire o "rico en combustible" es una condición de operación potencialmente peligrosa. De tal manera, que el exceso de aire es suministrado al quemador para ofrecer un factor de seguridad encima del aire estequiométrico requerido para la combustión.

Sin embargo, el aire en exceso absorbe energía de la combustión, de manera que le quita energía calorífica que puede utilizarse transfiriéndose al agua en la caldera. De esta manera, el exceso de aire reduce la eficiencia de la caldera. Un diseño de quemador de calidad permitirá quemar combustible a un exceso de aire lo más bajo posible, alrededor del 15% (3% de  $O^2$ ). El  $O^2$  representa el porcentaje de oxígeno en el gas de escape. El exceso de aire es medido mediante un muestreo de oxígeno en los gases de combustión. Si existe un 15% de aire, el analizador de gases medirá el oxígeno en exceso mostrando un 3%.

El exceso de aire permite una operación segura por encima de las condiciones estequiométricas de la combustión. Un quemador comúnmente se diseña para operar con un 15 a 20% de exceso de aire quemando combustóleo (en carga máxima) mientras que un quemador al 100% de capacidad quemando gas natural esta diseñado para operar con un 10% de exceso de aire. Niveles mayores de exceso de aire resultan en un desperdicio de combustible utilizado para calentar el aire en vez de transferirlo como energía útil, aumentando las pérdidas de calor en la chimenea.

#### 2.5.6 PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y CONVECCIÓN

Las pérdidas por radiación y convección variarán con el tipo de generador, el tamaño y la presión de operación. Las pérdidas se consideran comúnmente constantes en unidades de potencia (KJ/hr, BTU/hr, etc.) pero representan un porcentaje mayor a medida que la velocidad de combustión

disminuye. Los factores de diseño de una caldera que también influyen en las eficiencias de la caldera son la superficie de calefacción, el número de pasos de los gases, el diseño de la caldera y del quemador.

#### 2.5.7 SUPERFICIE DE CALEFACCIÓN

La superficie de calefacción es un criterio utilizado cuando se comparan calderas. Las calderas con mayor superficie de calefacción por caballo caldera tienden a ser más eficientes y a operar con menos esfuerzos térmicos. Muchas calderas paquete se ofrecen con 5 pies cuadrados por caballo caldera como un diseño óptimo para presentar una eficiencia máxima.

### 2.6 OPERACIÓN DE UN GENERADOR DE VAPOR

En términos generales, aire y combustible se suministran al hogar de un generador de vapor en una gran variedad de formas, con resultado final de que el combustible es quemado, de preferencia a altas temperaturas, generalmente en la vecindad de 3300 °F y por consecuencia se tiene como resultado una gran volumen de gases muy calientes. Estos gases posteriormente son movidos a través de varias secciones de la caldera, enfriándose a medida que se mueven y ceden su calor a superficies más frías de los tubos al otro lado de los cuales se encuentra el agua o el vapor que reciben este calor. Cuando su temperatura ha sido reducida a un valor de alrededor de 250 °F se descargan a la atmósfera a través de una chimenea. Durante estos viajes, pasan sobre muchos tipos de superficie de transferencia de calor y en forma general podremos describir esta transferencia de calor como sigue:

Los gases calientes, inmediatamente después de la combustión y durante el proceso de combustión, ceden una gran cantidad de calor a las superficies de transferencia de calor circundantes, por radiación. Después los gases pasan por las secciones del sobrecalentador de la caldera donde se les suministra calor al vapor que ha sido previamente formado, elevando su temperatura en la región del sobrecalentador. Posteriormente pasan sobre los bancos de tubos los cuales se encuentran llenos con agua que aún esta siendo calentada hasta la temperatura de saturación. Abandonan esta área de la caldera y frecuentemente pasan sobre varios dispositivos de recuperación de calor tales como calentadores de aire, y economizadores. Estas áreas de transferencia de calor enfrían los gases a los puntos de temperatura más bajas prácticamente, después de lo cual abandonan la caldera a través de una chimenea hacia la atmósfera.

El flujo de líquido ó agua a través de estas unidades puede decirse que el agua, generalmente tiene que ser previamente calentada, y entrada a un economizador y su temperatura se eleva un poco más. Después se alimenta a uno de los domos de la parte superior de la caldera y como generalmente está más fría que el agua que se encuentra ahí, su densidad es mayor y baja a través de una serie de tubos que reciben el nombre de bajantes, hacia los puntos más bajos del sistema. Conforme aumenta la temperatura su densidad es menor y empieza a elevarse a través de otra serie de tubos llamados subientes. Conforme sube por estos tubos, eventualmente entra al domo de

vapor donde a su vez se transforma de líquido a vapor y se descarga a través de la salida de la caldera hacia el proceso o turbina para su uso. En una unidad equipada con sobrecalentador, después de que el vapor abandona el domo de evaporación, pasa a través de otros tubos adicionales localizados en una sección de la caldera donde los gases son muy calientes, elevando su temperatura considerablemente sobre la temperatura de saturación y después pasa a la turbina o proceso.

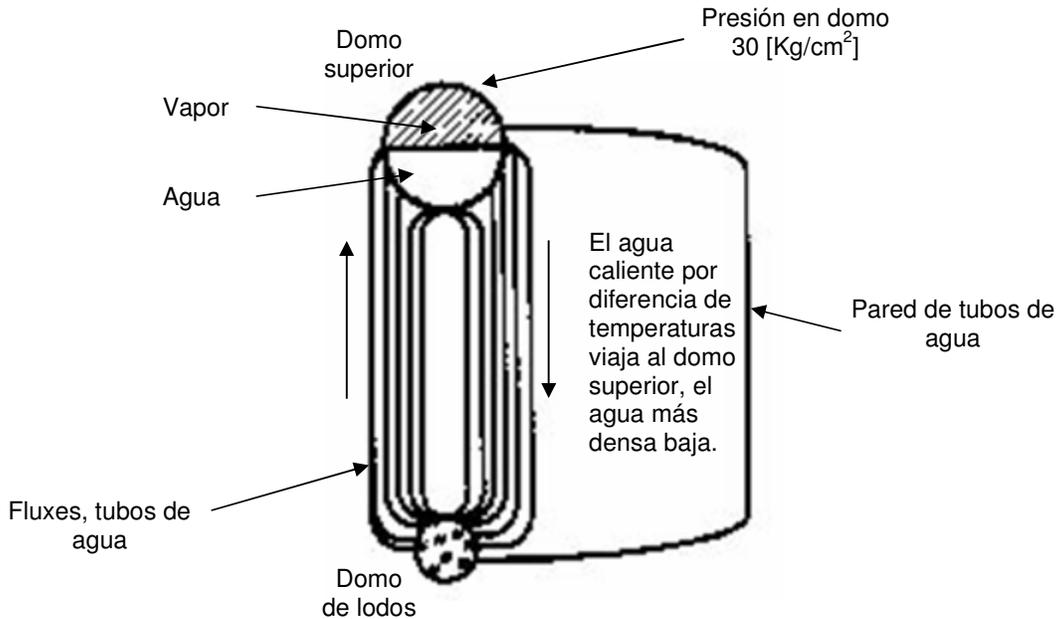


Figura 2.5 – Vista transversal de un generador de vapor

## 2.7 USOS DEL VAPOR

El empleo de generadores usualmente puede clasificarse en dos categorías principales; las de diseño para servicio público, en las cuales el principal trabajo es suministrar vapor sobrecalentado a una turbina, y los calderas para proceso donde el principal trabajo es suministrar vapor, generalmente a baja presión y temperatura, para los varios procesos en donde se emplean para calefacción, cocimiento, secado entre otros.

El vapor automáticamente fluye hasta el punto de consumo a través del sistema de tuberías impulsado por el gradiente de presión, en donde se condensa después de ceder su calor latente para reciclarse al proceso total o parcialmente según se trate de una central termoeléctrica o una aplicación industrial. En el trabajo del vapor se usan sus propiedades de presión, volumen y temperatura, las dos primeras para accionar maquinaria y la última para procesos térmicos.

Para reusarse el agua se calienta a su punto de ebullición y la adición de calor la lleva a su fase de vapor nuevamente a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de operación de la caldera.

Las aportaciones posteriores de calor su temperatura por encima de la saturación para llevarlo a la condición de sobrecalentamiento. Al llegar el agua a su punto de ebullición, su evaporación se produce sin cambio de temperatura pero con adición de calor. El calor requerido para cambio de fase se conoce como calor latente de evaporación.

Si la evaporación no fue completa, el vapor será húmedo y se designara con un porcentaje de calidad que representa la diferencia entre 100 % del peso del vapor y la fracción en % de humedad. El calentamiento del vapor sobre su temperatura de saturación lo transforma en vapor sobrecalentado. Este vapor no contiene humedad y la misma condición puede conseguirse cuando el vapor saturado se somete a una reducción de presión como sucede en las válvulas reductoras (VPR) en los sistemas de distribución.

El uso del vapor en la industria es muy extenso, en la actualidad lo mismo sirve para la generación de energía eléctrica que para la preparación de medicamentos y productos alimenticios al igual que para la esterilización de instrumentos y equipos. Se pueden identificar 3 razones para el uso extenso del vapor así como su dominio sobre otros medios de energía:

- Existe una necesidad de calor y energía en el mismo proceso y el vapor es la forma más económica y eficiente de realizarlo.
- El vapor puede controlarse cómoda y fácilmente por su naturaleza de circulación, debido a que este pasa de una zona de alta presión a una menor presión sin necesidad de otro elemento.
- El vapor es fácil de producir ya que se obtiene del agua y además puede ser reutilizable.

Así, de acuerdo a las cualidades enlistadas, el vapor tiene aplicaciones distintas en la industria. Cada una de estas aplicaciones tiene un elemento final de consumo, siendo los más utilizados los serpentines, marmitas, autoclaves, intercambiadores de calor, boquillas de inyección, etc.

Aplicación	Ejemplos
Calefacción	Se puede utilizar vapor para calentar agua, soluciones químicas, pastas, aceites, etc.
Cocción	Se utiliza para cocer alimentos, en general, tales como : jaibas, pastas, embutidos, etc.
Evaporación	Utilizado para evaporar disoluciones químicas, esterilizado de material quirúrgico, etc.

Secado	Utilizado para secar telas y tintas, así como para calefacción en procesos de aire acondicionado y procesos de humidificación.
Procesos de conformado	Utilizado para el curado de concreto y conformación de asientos para vehículos.
Movimiento	Como el utilizado para mover turbinas en CFE y barcos en sectores navales.

### 3.1 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE CONDUCTIVIDAD

El tratamiento del agua es un aspecto importante en la operación del generador la cual puede afectar la eficiencia o resultar en daños a la planta si no se toma en cuenta. El agua de alimentación al generador, suministrada por el tanque superior, contiene impurezas en la solución y en la suspensión, estas impurezas llegarán a concentrarse en las partes internas del generador, ya que el vapor generado, idealmente puro contiene una cantidad de impurezas que no debe ser ignorada.

El adecuado tratamiento de la purga en el generador removerá la mayor parte de las sales de calcio y magnesio que forman las incrustaciones, este proceso recibe el nombre de purga. Si se permite a estos sólidos concentrarse dentro de ciertos límites, un depósito o incrustación se formara en las superficies de calentamiento del generador de vapor, lo cual reducirá la transferencia de calor y aumentara las temperaturas de los tubos. Esto puede aumentar las temperaturas de los gases de combustión, lo cual reduce la eficiencia del generador, daña los tubos de agua (fluxes) y aumenta los gases tóxicos de salida.

Aún más importante puede ser la probabilidad de fallas en los tubos del hogar por el sobrecalentamiento dando como resultado un efecto de aislamiento en el lado del agua. Una alta concentración de sólidos también puede interferir con la propia operación de los aparatos de separación del generador, como puede ser el tambor de separación superior, provocando sobrecalentamiento del metal e incluso ser arrastrados con el vapor sobrecalentado. Las partículas sólidas en el vapor pueden causar problemas de erosión en las turbinas y válvulas.

La concentración de los sólidos disueltos y suspendidos en el agua del generador puede ser controlada por remover algo de esta agua con alta concentración de sólido y reemplazarla con agua de alimentación de bajo contenido de sólidos efectuando una disminución general de la concentración de sólidos en el generador de vapor. Este proceso, el cual es conocido como Purga del Generador de Vapor, puede ser intermitente o continuo. La purga es necesaria para eliminar cualquier acumulación de sólidos en las partes más bajas del sistema generador de vapor. La purga continua es tomada del punto de más alta concentración de sólidos, generalmente del domo superior.



FIGURA 3.1 – ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS EN EL DOMO DE LODOS

La purga intermitente depende del operador y sirve para remover los sólidos en el domo inferior (Figura 3.1), una mala purga provocará la

acumulación de sólidos, elementos corrosivos y, consecuentemente, mal funcionamiento del generador.

El uso de la purga continua en vez de la intermitente tiene dos importantes ventajas: ahorra agua tratada del generador y puede obtenerse significantes ahorros de energía.

### 3.2 TRATAMIENTO DEL AGUA EN LA GENERACIÓN DE VAPOR

Todo equipo que genera vapor requiere del acondicionamiento del agua de alimentación para protegerlo contra incrustación, corrosión y otros tipos de complicaciones ocasionadas por fallas u omisiones en el tratamiento del agua. Los principales parámetros del agua de alimentación en un generador de vapor son:

- No tener dureza
- No tener oxígeno disuelto, ni gases corrosivos ( $\text{CO}_2$ )
- Ser de una alcalinidad de 10.5 a 11.5 de p.H. (a la entrada del generador)
- No tener sólidos en suspensión
- Controlar los sólidos disueltos

Todos los programas de tratamiento son diseñados para operar dentro de unos límites de especificación. Los programas de tratamiento químico producen los resultados deseados solo cuando todos los parámetros anteriores están dentro de los límites de especificación. Las desviaciones de dichos parámetros provocan:

- Resultados menos favorables
- Desempeño de los costos del programa desfavorables
- Excesivo uso del químico para obtener agua aceptable en el generador. Esto reduce la eficiencia del generador e incrementa la potencial ruptura de los fluxes.
- Corrosión potencial al metal del generador. La corrosión debilita la existencia del metal que conduce. Los productos de corrosión pueden depositarse en las superficies calientes y pueden ocasionar sobrecalentamiento en los fluxes.
- Corrosión potencial en la tubería de vapor. Esto reduce la vida de la tubería de condensado y libera fierro que contamina al agua de alimentación. El fierro puede depositarse en las áreas calientes de los fluxes.
- Arrastre potencial de los sólidos en los generadores de vapor. Los arrastres resultan en depósitos, corrosión y contaminación en los sobrecalentadores y otros equipos donde se usa el vapor.

### 3.2.1 CONTROL QUÍMICO

El tratamiento químico trabaja mejor cuando son mantenidos los niveles recomendados dentro de control. Esto se lleva a mejor término manteniendo una dosificación continua de los productos químicos recomendados en el punto de inyección adecuado. Las dosificaciones recomendadas serán adecuadas para los niveles estándar o promedio que se encuentran de dureza, fierro, oxígeno en el agua de alimentación de los generadores de vapor. Si estos niveles exceden los niveles normales, tendremos que dosificar de acuerdo al plan de acción, para inhibir cualquier problema relacionado con la incrustación o corrosión.

La primera prioridad es mantener una dosificación constante de productos químicos. Si esto es hecho consistentemente, y los niveles de fierro, dureza y oxígeno son mantenidos dentro de los límites especificados, entonces el control químico del generador estará bien.

#### TRATAMIENTO QUÍMICO

Reciben el nombre de tratamiento interno y externo para agua – vapor condensado de calderas, todos aquellos tratamientos químicos y físico – químicos tendientes a mantener limpias las superficies de transferencia de calor del sistema de generación vapor – condensado.

#### PROCEDIMIENTO

Con la implementación de este tratamiento lograremos una generación de vapor continua y de buena calidad, mediante la implementación de un programa multifuncional que facilite la operación de los generadores de vapor, aunado a un trabajo conjunto e intensivo en el área de pretratamiento, que permita incrementar la eficiencia de operación del sistema.

#### 1. Tratamiento inhibidor de incrustación – NALCO 9546

El NALCO – 9546 es una combinación de polímeros sintéticos y polofosfatos, diseñado para controlar la formación de incrustaciones y depósitos, dando una máxima limpieza a las calderas, contiene también un antiespumante para control el araste el NALCO – 9546 esta indicando para generadores que operan con todo tipo de agua.

Los beneficios de este tratamiento son:

- Ayuda a disminuir la formación de depósitos aislantes de fierro en los tubos del generador.
- Contiene un dispersante de alto rendimiento para reducir aun más la formación de depósitos.
- Incorpora un antiespumante para reducir los arrastres del generador.
- Suministra un intensificador alcalino para ayudar a minimizar la corrosión y eliminar la necesidad de alimentación química suplementaria.

Debe de ser alimentado continuamente para evitar incrustaciones en el generador. Si el producto se alimenta a través de un tanque de preparación y bomba dosificadora, debe disolverse a una concentración máxima del 5%, usando agua suavizada o condensada. El oxígeno debe de ser cero en el agua donde se aplique el NALCO – 9546, se prefiere que exista un residual de Sulfito.

El NALCO – 9546 no es compatible con aluminio, cobre ni sus aleaciones. El producto diluido se aplica en la línea de alimentación de agua del generador o en el tanque de agua de alimentación. El programa se controla manteniendo un residual de fosfato medido como ortofosfato en un rango de acuerdo con la presión de trabajo del generador.

## 2. Secuestrante de oxígeno inhibidor de corrosión - NALCO 2811 PULV

EL NALCO – 2811 es un producto químico seco pulverizado secuestrante de oxígeno de acción rápida, diseñado para reducir la corrosión por oxígeno en el generador.

Los beneficios del producto son:

- Secuestra al oxígeno de 200 a 500 veces más rápido que los no catalizados.
- Diseñado para ayudar a reducir el oxígeno disuelto antes de que llegue a los metales a altas temperaturas.
- Estabilizado por catalizadores, activo solo después de disuelto.

Debe ser alimentado continuamente para evitar la corrosión del generador. El punto preferido de dosificación es la sección de almacenamiento del deareador. Hacer soluciones del 30 al 10 % en peso utilizando agua de baja flotante tipo rosca.

## 3. Dispersante de Hierro – NALCO 2587

El NALCO – 2587 es un agente dispersante que se utiliza para controlar los depósitos de hierro en los generadores.

Los beneficios del producto son:

- Especialmente formulado para ayudar a disminuir la formación de depósitos aislantes de hierro en los depósitos del generador.
- Ayuda a pasivar las superficies de transferencia de calor, reduciendo el daño por corrosión.

Debe ser alimentado continuamente para evitar la precipitación de hierro y mantener una eficiente transferencia térmica. El punto de alimentación recomendado es la sección de almacenamiento del deareador o el agua de alimentación al generador.

#### 4. Tratamiento inhibidor de corrosión en el condensado - NALCO 55211

El NALCO – 52211 es un inhibidor de corrosión diseñado para su uso en el vapor y sistemas de condensado. El N – 55211 no contiene aminas u otros compuestos nitrogenados, no es volátil y no altera en el p.H. del condensado. Provee protección contra el ácido carbónico, oxígeno en el sistema de condensado formando una barrera hidrofóbica en el metal de la superficie.

Los beneficios del producto son:

- Ayuda a disminuir la corrosión de los sistema de vapor y condensado formando una barrera en las superficies del metal.

Debe ser alimentado continuamente en el sistema de vapor, se recomienda que sea dosificado neto pero donde sea necesario diluir con agua lo mas pura posible. Debe ser dosificado mediante inyectores retráctiles de NALCO para su correcta aplicación y desempeño en el cabezal de vapor.

#### 3.2.2 DESAIREACIÓN

Después del pretratamiento químico, se debe desairear el agua del sistema de suministro. La desaireación mecánica elimina gases del agua, principalmente el oxígeno, reduciéndolos a nivel aceptable (0.005 a 0.040 dependiendo del equipo usado) para poder utilizar el agua en el sistema del generador. Se trata de eliminar tanto oxígeno como sea posible, debido a sus propiedades fuertemente corrosivas.

El oxígeno es un elemento muy activo. En pequeñas cantidades puede causar corrosión grave en líneas de suministro, economizadores, partes internas del generador, equipos movidos por vapor y tuberías de retorno del condensado. La velocidad de corrosión del oxígeno disuelto en el agua se duplica por cada 10 °C (18°F) de aumento de la temperatura. Cuando el oxígeno y el dióxido de carbono se encuentran juntos, la velocidad de corrosión resultante puede ser de 10% a 14% mayor que la suma de las velocidades de corrosión de los gases actuando por separado. La combinación de oxígeno y amoníaco es muy corrosiva para las aleaciones a base de cobre.

A causa de la tendencia corrosiva del oxígeno, el agua de suministro es desaireada normalmente para eliminar tanta cantidad de ese gas como sea posible. Un desaireador mecánico realiza una gran parte de la tarea. Sin embargo el desaireador no elimina todo el oxígeno, por eso se necesitan agentes químicos como suplemento para eliminar el oxígeno residual.

#### 3.2.3 DIFICULTADES EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR

Los problemas que deben ser corregidos para conseguir un beneficio máximo en la producción del vapor son: Ciclos de concentración, corrosión en la caldera, depósitos de la caldera y controles en los niveles químicos.

## CICLOS DE CONCENTRACIÓN

Los ciclos de concentración definen el incremento de concentración de los sólidos que ocurre cuando el agua circula y se evapora en el generador. Por ejemplo, si la conductividad en el agua de alimentación es de 30 y la continuidad en la caldera es de 900, los ciclos de concentración del sistema son  $900 / 30 = 30$

Un control consistente en el agua de alimentación y la continuidad del generador son necesarios para el control óptimo de éste. Si estas dos variables son mantenidas constantes, entonces la purga será constante (cuando la carga de vapor es relativamente constante). Una constante purga resultará en una demanda de químico consistente. Esto minimiza el ajuste de la dosificación química.

Los ciclos en el generador son controlados por la conductividad en el mismo. Si la conductividad en el generador excede el límite superior, los arrastres en el vapor pueden ocurrir. Por el contrario si esta por abajo del límite inferior, entonces el agua, la energía y los químicos están siendo desperdiciados.

Los generadores tienen una válvula de control para la purga de fondo. El punto deseado de control mantendrá las condiciones del generador en un rango para las condiciones normales de operación.

## CORROSIÓN EN EL GENERADOR

La corrosión en el generador puede ocurrir cuando la alcalinidad en el agua de alimentación o agua del generador es demasiado baja o si el metal es expuesto a agua con oxígeno. Esto puede suceder cuando se subdosifica el secuestrante de oxígeno N-2811 o cuando no trabaja apropiadamente ya sea física o químicamente el deareador. La alcalinidad del generador se controlada adicionando sosa al agua de alimentación.

El oxígeno es controlado por todos los parámetros del deareador, además de controlar la dosificación del N-2811 al agua de alimentación por medio del tanque de almacenamiento del deareador. El N-2811 contiene un químico que secuestra el oxígeno disuelto del agua de alimentación.

## DEPÓSITOS EN EL GENERADOR

Los depósitos en el generador pueden presentarse cuando existe fierro en el agua de alimentación. El fierro en el agua de alimentación es dispersado por la acción del N – 2587 (compuesto químico que inhibe la formación del fierro) y minimizado por la acción del producto ACT para el condensado que se dosifica en el cabezal de vapor. Si algo de dureza es alimentada al generador se tiene un inhibidor tipo fosfato en el N – 9546 que realiza una función de precipitación dentro del generador que posteriormente se descarga en la purga de fondo.

Los óxidos metálicos y los compuestos orgánicos constituyen las dos fuentes principales de depósitos en las calderas modernas. Los depósitos de óxidos metálicos son los principales causantes de las roturas de calentadores de agua de suministro y de tubos del generador, ya sea en sistemas de presión baja, como en sistemas de presión alta. Los depósitos de compuestos orgánicos pueden formarse en sistemas de agua de suministro y tubos de generadores de alta y baja presión. Lo mismo que los depósitos de óxidos metálicos, los depósitos de compuestos orgánicos pueden aislar los tubos de las calderas (Figura 3.2), produciendo un aumento de la temperatura del metal que puede ocasionar roturas de los tubos.



FIGURA 3.2 – DEPÓSITOS AISLANTES EN FLUXES

### 3.3 CONDUCTIVIDAD

El principio de control de purga, la apertura de la válvula de purga continua (Válvula On/Off, Figura 3.3), se apoya en un parámetro eléctrico llamado conductividad. La conductividad es la capacidad de una solución acuosa para conducir una corriente eléctrica. El agua destilada pura no conduce en principio la corriente, pero si se le disuelven sólidos minerales aumenta su capacidad de conducción. Estos sólidos al disolverse se separan en iones positivos y negativos en equilibrio con el cuerpo.



FIGURA 3.3 – VÁLVULA PURGA CONTINUA

Los iones son susceptibles de desplazarse bajo la acción de un campo eléctrico y también de combinarse con otros iones para formar iones nuevos o cuerpos distintos que ya no se ionizarán. La conductividad de los iones es función de su concentración y de su movilidad de tal modo que dos electrodos a tensión sumergidos en un líquido, en el que existe una sal en solución, por

ejemplo ClNa, producirán el fenómeno siguiente:

Los iones positivos  $\text{Na}^+$  emigrarán al electrodo cargado negativamente, mientras que los iones negativos  $\text{Cl}^-$  serán atraídos por el electrodo positivo. Al llegar a los electrodos, los iones adquieren cargas de signo contrario y se neutralizan. De este modo se establece una corriente a través de la solución y del circuito eléctrico exterior que depende de:

- Número y tipo de iones presentes en la solución
- Área efectiva de los electrodos
- Diferencia de potencial y distancia entre los electrodos
- Temperatura de la solución

Si en una solución de un producto químico dado se mantienen constantes los tres últimos puntos, la conductividad de la solución dependerá únicamente del número de iones en la solución y si el producto esta disociado totalmente será una medida directa de la concentración del mismo en la solución.

La conductividad eléctrica específica se define como el recíproco de la resistencia en ohmios, medida entre dos caras opuestas de un cubo de 1 [cm] de lado sumergido en la solución. La unidad es el mho o siemens (recíproco de ohmio) que es la conductancia de una solución que con una diferencia de potencial de un voltio entre las caras de los electrodos da lugar a la circulación de un amperio. Como esta unidad es demasiado grande se emplea a menudo en soluciones diluidas el micromho ( $\mu$  mho) que es la millonésima parte de un mho. La siguiente tabla (Figura 3.4) muestra valores de conductividad de varios tipos de soluciones.

Resistencia específica en Ohmios/cm	100 MEG	10 MEG	1000 k	100 k	10 k	1000	100	10	1
Conductividad específica Micromhos/cm	0.01	0.1	1	10	100	1000	10 k	100 k	1000 k
	Agua ultrapura	Agua destilada	Agua			0.05% NaCl		Agua de mar	30 % $\text{H}_2\text{SO}_4$

FIGURA 3.4 – VALORES DE CONDUCTIVIDAD EN SOLUCIONES

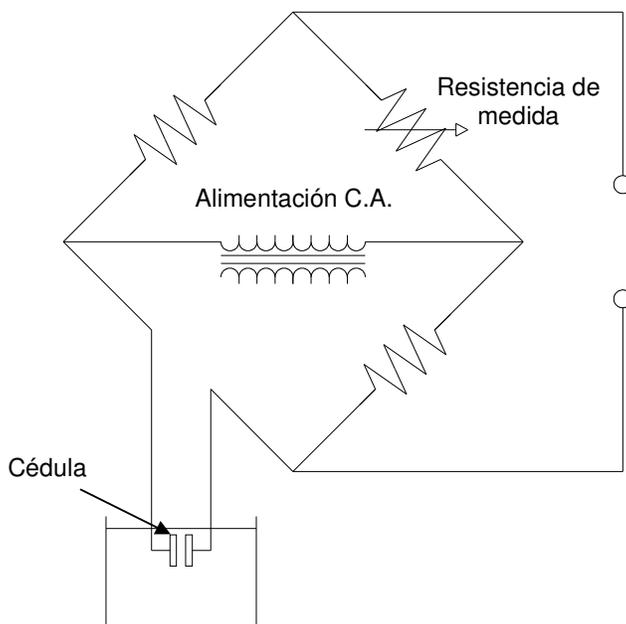


FIGURA 3.5 – MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD POR EL PUENTE DE WHEATSTONE

Así, la medición de la conductividad se basa en situar en la solución dos placas paralelas conectadas a un circuito de puente de Wheatstone de corriente alterna (Figura 3.5). El sistema tiene el inconveniente de que la acumulación gradual de suciedad en los electrodos falsea la medida. Sin embargo, existen métodos para compensar los efectos eléctricos de acumulación de suciedad en los electrodos, como se muestra en la figura 3.5. En este diagrama se aprecia que si se mantiene constante la diferencia de potencial  $V_O$  entre los electrodos 2 y 3 con independencia de la resistencia de la solución, la corriente  $I_C$  mantendrá una relación lineal con la conductividad de la solución.

En efecto:

$$V_O = I_C R_2 = I_C \frac{1}{G}$$

de la anterior igualdad, tenemos que

$$G = \frac{I_C}{V_O}$$

y como  $V_O$  es constante resulta

$$G = K \cdot I_C$$

siendo

$$K = \frac{1}{V_O}$$

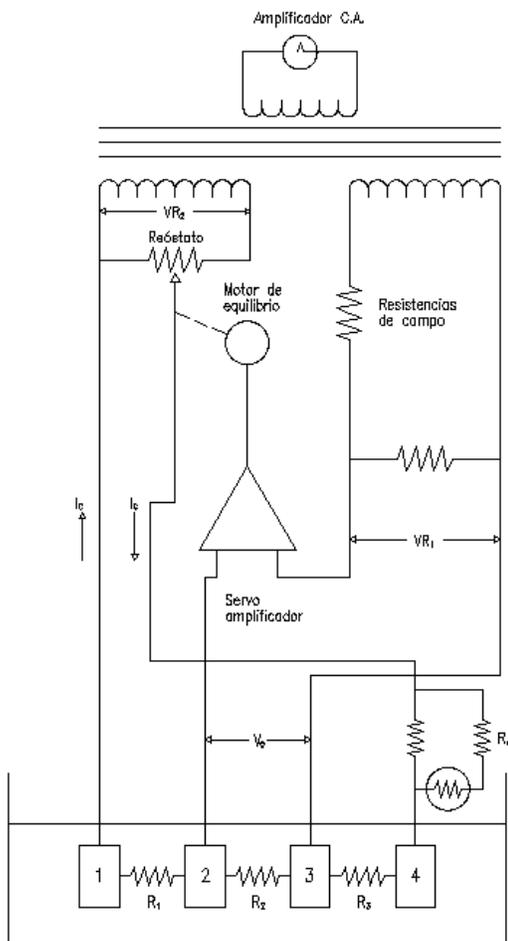


FIGURA 3.6 – MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD POR EL SISTEMA POTENCIOMÉTRICO

Consecuentemente, si el circuito mantiene una diferencia de potencial  $V_O$  constante entre dos electrodos, independientemente de los depósitos de sólidos que se vayan acumulando, la medida será proporcional a  $I_C$  con la constante de proporcionalidad igual a la inversa de  $V_O$ . El circuito de la figura 3.6 satisface estos requerimientos:  $V_O$  se compara con la tensión de referencia  $VR_1$  y si hay diferencia, esta es amplificada con el servoamplificador que excita un motor de equilibrio que mueve a su vez el brazo móvil del reóstato, hasta que el nuevo valor de  $I_C$  hace que el producto  $I_C R_2 = V_O$  sea igual a  $VR_1$ . El circuito es pues un circuito potenciómetro autoequilibrado en corriente alterna. Al trabajar en corriente alterna se logra que la alimentación a los electrodos y al circuito de medida esté en fase al estar conectados al mismo transformador.

El empleo de la corriente alterna en la medida de la conductividad permite equilibrar en parte el fenómeno de polarización de los electrodos. Este fenómeno se

produce en corriente continua cuando los iones llegan a estar muy concentrados alrededor de un electrodo y su carga equivale a la de estos; al ion le es difícil alcanzar el electrodo ya que el potencial neto que queda es muy pequeño para atraer iones adicionales.

La medida de la conductividad requiere la compensación de la temperatura de la solución con relación a la temperatura estándar escogida de  $25^{\circ}\text{C}$ . Esta compensación suele ser automática, siendo uno de los sistemas el de la figura anterior, consistiendo en un termistor y una resistencia  $R_n$ .

La presión de la medida es de  $\pm 0.5\%$  y el campo de medida llega a un máximo de  $0 - 150\,000 \mu\text{ mhos}$ .

En los procesos industriales se llevan a cabo mediciones de conductividad principalmente para obtener información de las concentraciones iónicas totales, como los compuestos disueltos en soluciones acuosas. Las aplicaciones más usadas son la purificación de agua y el control de purga.

Los sistemas de control consisten en un adecuado sensor insertado directamente o en un portaelectrodos, un cable conectado a un transmisor que convierte las señales recibidas en un resultado de medición o que los transmita a un PLC. Los sensores de conductividad preferentemente deben estar diseñados para una alta seguridad del proceso, sustitución veloz del sensor e instalación sencilla y rápida.

### 3.4 TIPOS DE PURGA

La concentración de sólidos en el agua de la caldera se controla por la remoción de un alto contenido de los mismos en el agua de la caldera y remplazarlos con agua de alimentación de bajo contenido de sólidos dentro del sistema generador de vapor. Este proceso puede ser intermitente o continuo.

La purga del domo superior es una purga continua ya que todo el tiempo se sensa la conductividad del agua, si esta sobrepasa el valor de set point para el que el control fue calibrado, abrirá una válvula de corte (válvula solenoide) (Figura 3.3) que dejara escapar el liquido de la parte mas elevada del agua en el domo, lugar donde se encuentra la mayor cantidad de sales y sólidos suspendidos.

Por el contrario, la purga en el domo de lodos (domo inferior) se realiza manualmente, por el operador del generador, se realiza 3 veces al día. Una válvula liberara agua que será desechada, esta apertura es solo por poco tiempo, lo suficiente para que los sólidos en suspensión sean retirados.

#### 4.1 DEFINICIÓN

El sistema de control que varía el flujo en la línea de agua de alimentación para mantener el nivel del domo superior constante y dentro de los límites de operación recomendados por el fabricante del generador en cualquier condición de carga se le conoce como control de nivel o de agua alimentación.

Este sistema debe tener la capacidad de controlar el nivel de agua bajo condiciones críticas sobre todo durante cambios severos de carga y de régimen de liberación de calor en los que se presentan elevaciones falsas de nivel por las condiciones transitorias de evaporación en el agua almacenada en los diferentes elementos de intercambio de calor.

El control de nivel debe operar con la respuesta adecuada y considerar estas condiciones transitorias o momentáneas para actuar más en consecuencia de la relación de masas, saliendo, entrando y dentro del generador, que en función de indicaciones pasajeras en el indicador nivel.

El aumento de superficie de calefacción en un generador, la introducción de hornos de paredes enfriadas por agua, y temperaturas de agua de alimentación cercanas a la saturación del vapor, hacen posible cambios mas rápidos en la evaporación. La energía que se libera en el hogar teóricamente debe variar simultáneamente con la demanda de vapor. En la práctica, el control de combustible responde después de que ha habido el cambio, introduciendo el retraso propio de los aparatos de control.

Por lo anterior, es conveniente que el sistema de control tenga la característica de mantener en nivel más alto a altas cargas y viceversa. El control debe además proveer suficiente agua de alimentación para tomar en cuenta las pérdidas de fluido por purgas y asegurar que se tenga agua en todos los tubos del generador, resolviendo en esta forma su refrigeración para protección por sobrecalentamiento e inducir una mejor circulación. Otra función que cumple este sistema es mejorar la separación vapor/agua en el domo del generador.

#### 4.2 NECESIDAD DEL CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.

La regulación del suministro de agua de alimentación es la forma más antigua de control aplicada a generadores. En un principio esto se consideraba desde el punto de vista de seguridad, sin embargo con la tendencia presente para diseñar generadores con alta relación de evaporación, la importancia de diseñar el mejor sistema posible de control de alimentación ha aumentado notablemente.

Actualmente, las funciones presentes de control de agua de alimentación son tres. Primero es necesario evitar que los tubos del generador se quemen debido a un bajo nivel en el domo. Cuando hay bajos niveles de agua en el

domo del generador, algunos de los tubos no están completamente llenos con agua y es muy posible que los tubos se quemen.

Niveles altos de agua, anormales, también son peligrosos y la prevención de esto es la segunda función del control de agua de alimentación. Si el nivel del agua fuera anormalmente alto en el domo superior, el agua junto con cualquier sólido presente en ella sería arrastrado con el vapor al sobrecalentador, causando daños a esta unidad y también posiblemente a los alabes de las turbinas y/o dispositivos que se estuvieran moviendo con el vapor recibido de este generador.

Estas dos consideraciones son las más importantes debido al costo de reparación de los posibles daños que fueran creados por ellos. Sin embargo, el sistema de agua de alimentación que cumpliera únicamente con estos dos requisitos no sería del todo satisfactorio. En muchos generadores, la diferencia de niveles entre los puntos peligrosos, el punto alto y bajo, es de algunas pulgadas, en ciertos generadores, dependiendo de su capacidad de producción, un simple regulador de abrir o cerrar podría en muchas formas satisfacer estos dos primeros requisitos. El efecto que éste pudiera tener en sobrecalentadores, economizadores, bombas y los choques térmicos en el generador, también deberán de ser considerados, así que la tercera función de un control de agua de alimentación es regular este líquido de tal forma que el domo superior se mantenga aproximadamente al nivel medio y no este sujeto a severos cambios en el flujo de agua.

#### 4.3 FACTORES QUE AFECTAN EL CONTROL DE NIVEL



FIGURA 4.1 – VÁLVULA DE CONTROL FLUJO DE AGUA

Se debe de considerar una presión y temperatura constante de agua de alimentación antes de la válvula de control de flujo de agua, un cambio de esta presión antes de la válvula de control (Figura 4.1), causará un correspondiente cambio en el flujo de agua de alimentación a través de la caldera, lo cual se refleja en el nivel y posteriormente, a través del sistema, se tendrá que reajustar la válvula de control. Donde existe una presión del agua de alimentación variable, el controlador de nivel enviara señales anormales de reajuste, con el consecuente desajuste del sistema completo de agua de alimentación.

Esta misma situación se obtiene si las características de la válvula no son lineales en lo que respecta al flujo contra el movimiento de la válvula.

Estas dificultades pueden disminuirse o incluso eliminarse si el flujo de agua de alimentación en el generador se mide y se compara con el flujo de vapor. En este sistema, el flujo de agua que entra se compara directamente con el flujo de vapor que sale y cualquier diferencia entre los dos se refleja inmediatamente en la salida de la estación de control. En otras palabras, si ocurre un aumento en el flujo de vapor, el error en la señal desarrollada por el control, será tal que haga que la válvula de agua de alimentación se abra. Esta condición existirá hasta que el cambio en el flujo de agua se iguale a las condiciones actuales de flujo de vapor. Cuando el nuevo flujo de agua sea igual a las nuevas condiciones de flujo de vapor, la salida de la estación de control, regresara a la posición neutral y el sistema estará en las condiciones de balance, suponiendo que el nivel en el domo esta en las condiciones deseadas.

Ya que la diferencia entre el flujo de agua que entra y el flujo de vapor que sale pudiera entonces compensarse para todas las variaciones mencionadas anteriormente, parece innecesario usar el nivel del agua como un tercer elemento. Sin embargo, debe recordarse que los medidores en si, no pueden ser 100 % perfectos y cualquier error pequeño en la medición ya sea de vapor o agua dará por resultado un efecto acumulativo en el suministro de agua en el generador, ya sea que mucha o no suficiente, sé este suministrando de tal forma que con el transcurso del tiempo las variaciones en el nivel del agua pudieran afectar al generador. Usando la señal del nivel de agua como un índice final, cualquier condición de desbalance en el flujo, por pequeña que sea, podrá corregirse rápidamente.



FIGURA 4.2 – ELEMENTOS EN EL CONTROL DE NIVEL

#### 4.4 SISTEMAS DE CONTROL DE NIVEL

La regulación del agua de alimentación que establece el nivel en el domo superior del generador depende de múltiples factores, entre ellos, de la carga, del tipo de bomba y del control de flujo del agua de alimentación.

El sistema de control de agua de alimentación puede realizarse de acuerdo con la capacidad de producción del generador. En la siguiente tabla se muestran valores que se deben de considerar como guía de selección de un control de nivel, teniendo presente que cada caso individual debe estudiarse separadamente.

Sistemas de Control de Nivel				
Tipo	Variable	Capacidad de la caldera, Kg/Hr.		
		< 6000	6000 – 15000	> 15 000
Un elemento	Nivel	Cargas irregulares	Pequeños cambios de carga	Cargas mantenidas
Dos elementos	Nivel Flujo de vapor	Cargas irregulares con grandes fluctuaciones	Cambios de carga moderados	Lentos cambios de carga moderados
Tres elementos	Nivel Flujo de vapor Flujo de agua			> 20 000

FIGURA 4.3

##### 4.4.1 SISTEMA DE CONTROL NIVEL DE UN ELEMENTO

En la regulación de nivel de un elemento (Figura 4.4), el único instrumento utilizado es el controlador de nivel que actúa sobre la válvula de agua alimentación. El instrumento medidor de nivel puede ser del tipo desplazamiento o de presión diferencial de diafragma.

En las calderas de pequeña capacidad, inferior a 1000 [Kg/hr], la regulación puede ser todo o nada, con dos alarmas de nivel, alto y bajo que ponen en marcha la bomba de alimentación del agua (Figura 4.5).

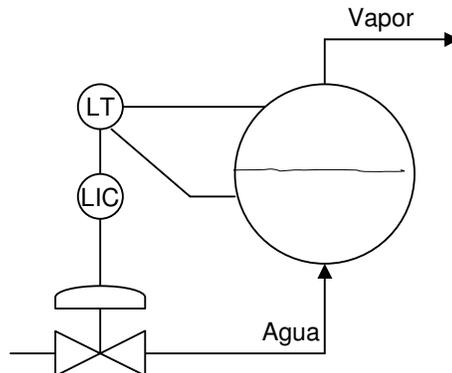


FIGURA 4.4 – UN ELEMENTO CON CONTROLADOR NEUMÁTICO

En las calderas de capacidad media, del orden de 2000 – 4000 [Kg/hr], puede utilizarse un controlador de flotador con reóstato acoplado eléctricamente a una válvula motorizada eléctrica. Este conjunto (Figura 4.6) actúa como un control proporcional con un punto de consigna: el punto medio del campo de medida del nivel flotador.

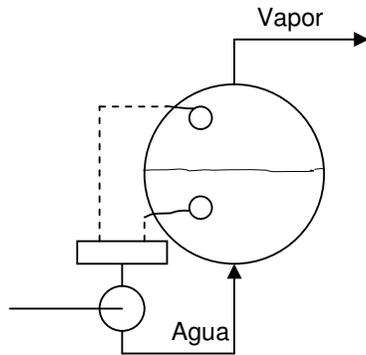


FIGURA 4.5 – UN ELEMENTO CON BOMBA DE ALIMENTACIÓN

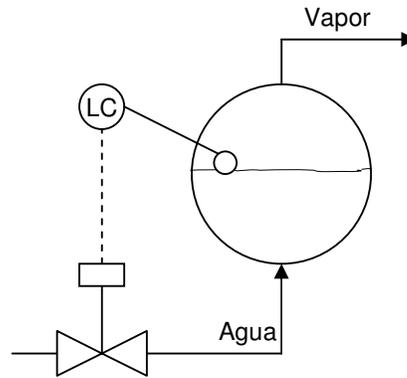


FIGURA 4.6 – UN ELEMENTO CON CONTROLADOR POTENCIOMÉTRICO

#### 4.4.2 SISTEMA DE CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE DOS ELEMENTOS

Como se requiere una libra de agua para generar un libra de vapor, parece un tanto lógico la medición del flujo de vapor que sale del generador y usar esto como un único índice en la operación del control de la válvula de agua de alimentación, en lugar de usar el nivel de agua como el índice, con sus errores consecuentes debido a la dilatación, contracción y otros factores.

Sin embargo existe la posibilidad de que la medición de flujo de vapor pudiera ser ligeramente errónea o que otros factores como la linealidad de la característica de la válvula, cambio en la presión de la bomba y quizá otros factores que pudieran hacer que la medición de flujo de vapor aplicado directamente a posicionar la válvula de control, fuera un tanto difícil.

Si un segundo elemento se introdujera, la medición del nivel de agua, como se hizo con el otro sistema, cualquier cambio con la presión de la bomba o no linealidad de la válvula que pudiera afectar el flujo actual del agua, sería detectado directamente en la medición del nivel del agua.

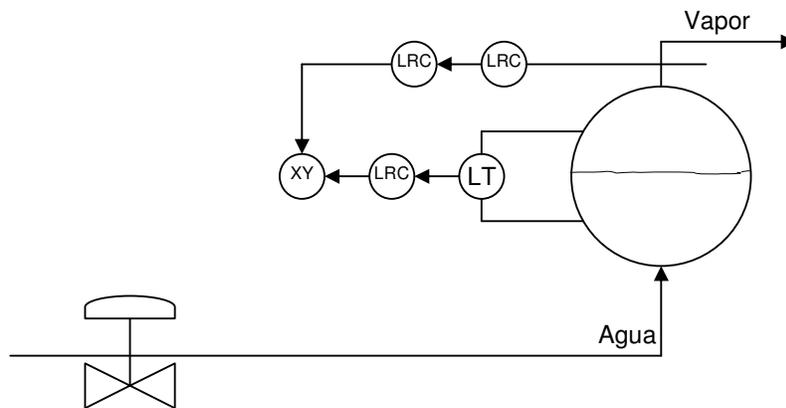


FIGURA 4.7 – CONTROL DE NIVEL A DOS ELEMENTOS

Con el control del tipo de dos elementos, la señal primaria de control es como se infiere en lo anterior, el flujo de vapor y la ganancia ó proporcionalidad del controlador se ajustará para permitir que la medición del flujo de vapor efectué el 80% del control de la posición de la válvula, con la medición del nivel de agua efectuando el resto. En otras palabras la señal de nivel es usada como un ajuste de la señal del flujo de vapor y el ciclaje del sistema de agua de alimentación se reduce por esto considerablemente.

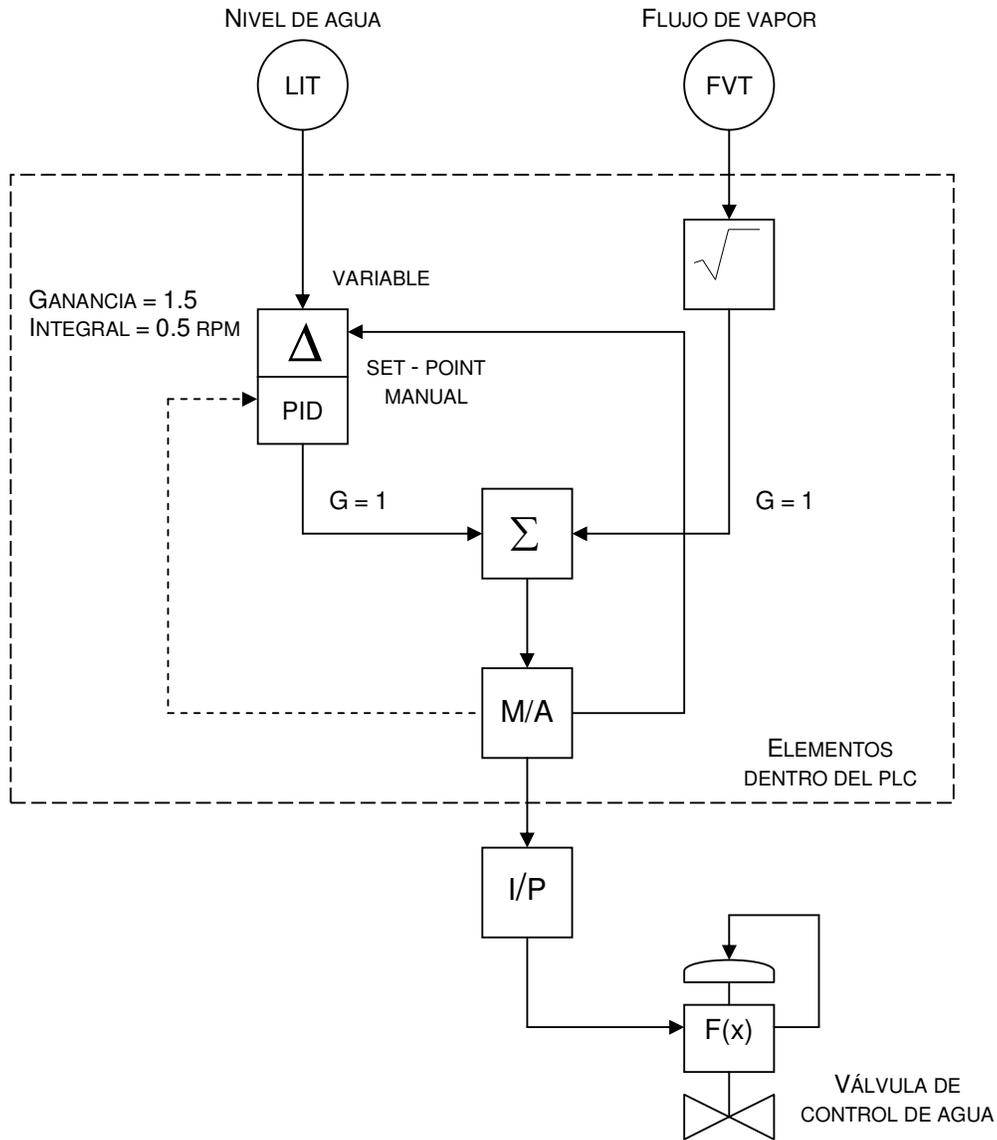


FIGURA 4.8 – CONTROL DE NIVEL A 2 ELEMENTOS

### 4.4.3 SISTEMA DE CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE TRES ELEMENTOS

El sistema de control de agua alimentación de tres elementos se usa en generadores de vapor que tienen grandes y rápidos cambios de carga, con la finalidad de mantener el nivel del domo estable. Para el caso del sistema de tres elementos, el objetivo es mantener el flujo de entrada de agua, igual al flujo de salida de vapor.

Para este sistema de control existen 3 variables a medir, estas son el flujo de vapor, el flujo de agua y el nivel del domo, de ahí que el sistema de control de nivel sea llamado de tres elementos.

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

Para que las condiciones de funcionamiento sean estables, el flujo de vapor y el de agua deben de ser iguales y de forma secundaria, el nivel de agua debe reajustarse periódicamente para que se mantenga dentro de unos límites determinados (normalmente son de unos 50 [mm] por encima o por debajo de la línea central de la caldera). Manteniendo estas funciones en las tres variables, los instrumentos correspondientes pueden estar relacionados entre si de varias formas. Las más representativas se muestran en la figura 4.9, en las que una señal anticipativa (feedforward) del flujo de vapor se superpone al control de nivel, y todas tienen por objeto dar prioridad a las diferencias entre los caudales de agua y de vapor frente a las variaciones de nivel que puedan producirse ante una demanda súbita, es decir el sistema de control en estas condiciones actúa obedeciendo a la diferencia relativa de caudales con preferencia a los cambios en el nivel. El caudal de agua alimentación puede medirse a través de una placa orificio o tobera.

De este diagrama observamos lo siguiente:

- El flujo de vapor pasa directamente como señal que acciona a la válvula, estando el control en automático, quedando la señal de nivel como corrección.
- El flujo de agua es una señal de retroaviso para estabilizar la relación de setpoint contra la variable.
- Si la relación agua vapor, vía señales, es igual a la demanda o rechazos de vapor, el primer PID manda corregir y la señal de corrección de este control pasa al sumador y finalmente a reposicionar la válvula de control de agua.
- La línea punteada (que une la estación manual automática con el PID) llamada track switch, hace referencia a la opción de operar el control de forma manual o automática.

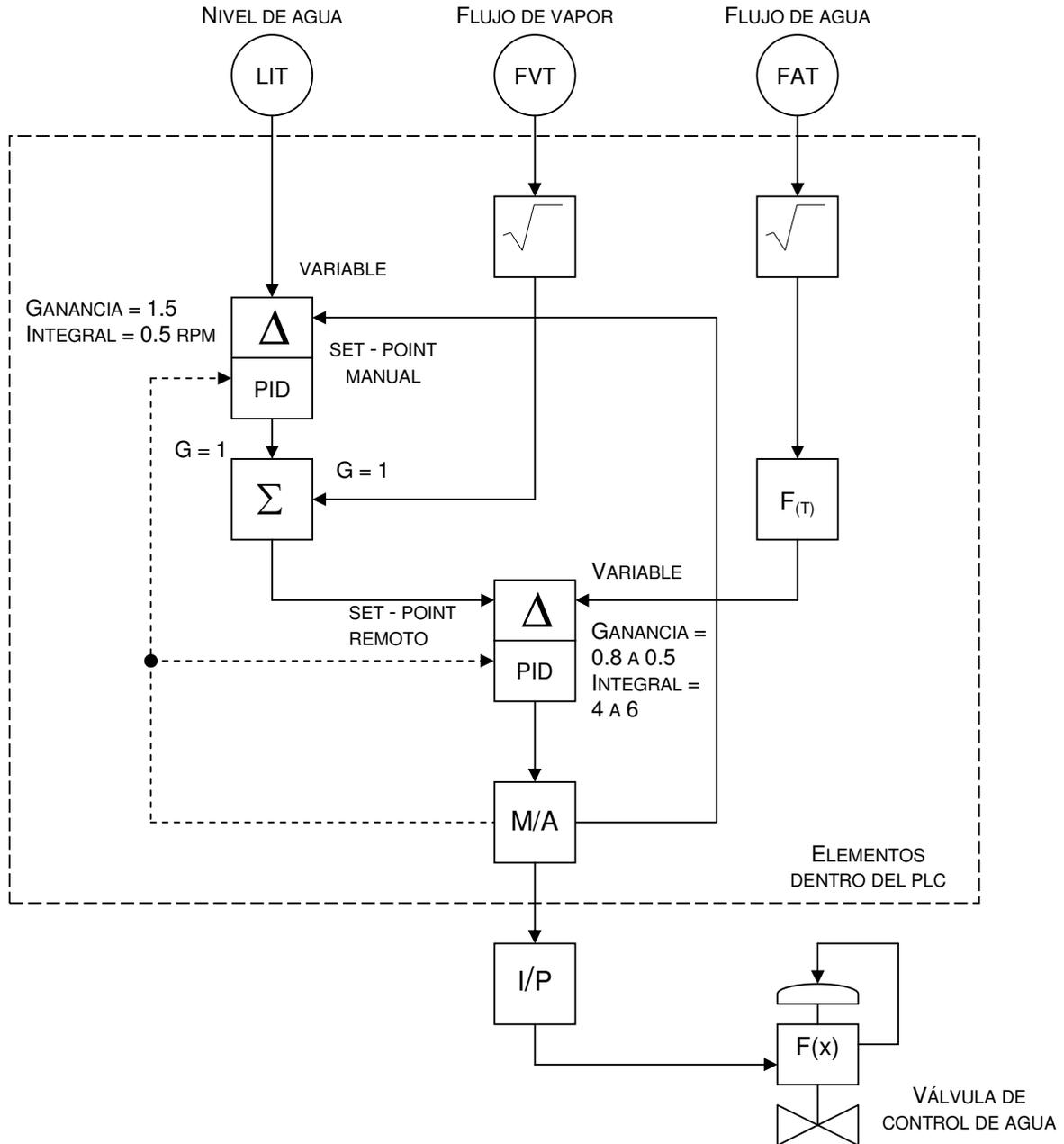


FIGURA 4.9 – CONTROL DE NIVEL A 3 ELEMENTOS

#### 4.5 ELEMENTOS DEL CONTROL DE NIVEL

Para realizar el control de nivel se necesita de un elemento primario, que sensa el caudal, ya sea una tobera o una placa de orificio, transmisores de presión diferencial que sensen ya sea el nivel, el flujo de vapor o de agua, y

una válvula de control de flujo de agua como elemento final. El principio de operación de una válvula de control, ya sea para el control del flujo de agua o de gas (combustible) es el mismo, por lo que esta explicación se aborda en el siguiente capítulo, el funcionamiento del resto de los instrumentos se explica a continuación.

### 4.5.1 PLACA DE ORIFICIO

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, sea directamente (desplazamiento), o bien indirectamente por deducción (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino).

La medida de flujo volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentra la placa de orificio o diafragma, la tobera o el tubo venturi.

Así pues, la medida de flujo en el cabezal de vapor se lleva a cabo a través de una placa de orificio, esta produce una presión diferencial la cual será aprovechada por el transmisor de presión diferencial, justo antes de la placa de orificio, aguas arriba, y después de esta, aguas abajo, se hace una toma de las condiciones de presión.

La placa de orificio o diafragma, consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal. La disposición de la tomas se muestra en la figura 4.11.

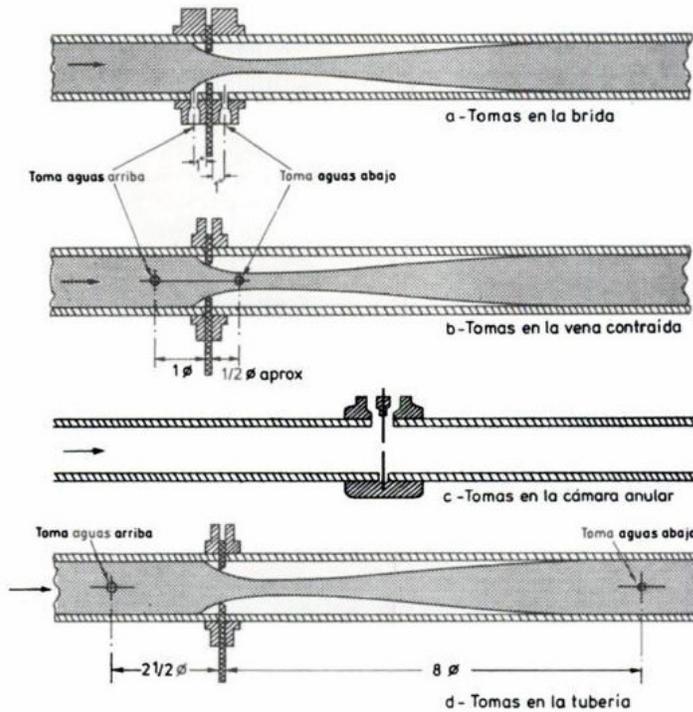


FIGURA 4.11 – DISPOSICIÓN DE TOMAS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Las tomas en la brida (flange taps) (figura 4.11 a) son bastante utilizadas porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída (vena contracta taps) (figura 4.11 b). La toma posterior esta situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a  $1/2 \phi$  de la tubería. La toma anterior se sitúa a  $1 \phi$  de la tubería.

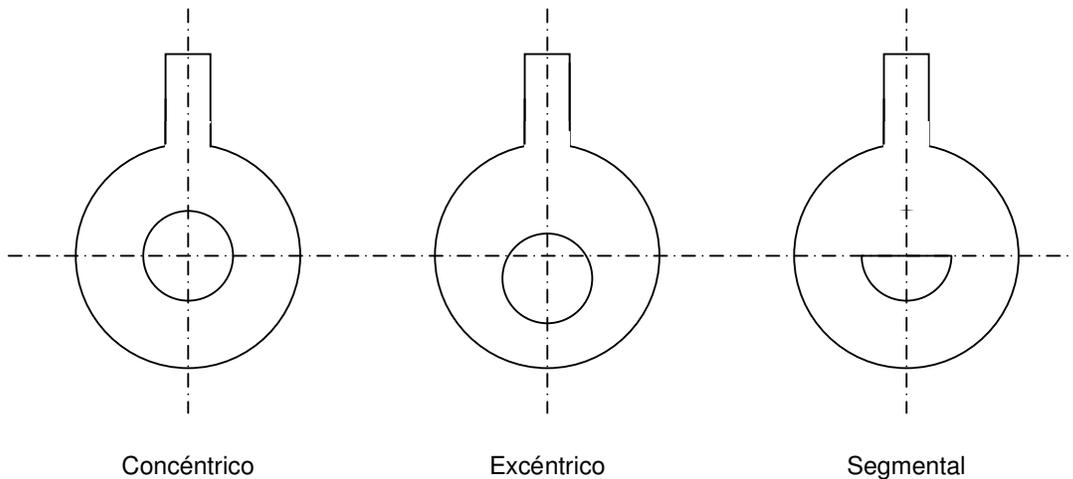


FIGURA 4.12 – TIPOS DE PLACAS DE ORIFICIO

Tomas radiales (radius taps). Son parecidas a las tomas de la vena contraída, pero fijando las tomas, anterior y posterior a  $1$  y  $\frac{1}{2} \text{ } \varnothing$  de la tubería, respectivamente.

Tomas en la cámara anular (corner taps) (figura 4.11 c). Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial.

Tomas en la tubería (pipe taps) (figura 4.11 d). Las tomas anterior y posterior están situadas a  $2\frac{1}{2}$  y  $8 \text{ } \varnothing$  respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas esta en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio en la placa puede ser concéntrico, excéntrico o segmental, (Figura 4.12) con un orificio de purga para los pequeños arrastres de sólidos o gaseosos que pueda llevar el fluido. Los dos últimos diafragmas permiten medir caudales de fluidos que contengan una cantidad pequeña de sólidos y de gases. La presión obtenida con la placa es del orden de  $\pm 1$  a  $\pm 2 \%$ .

### 4.5.2 TRANSMISOR DIGITAL

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la industria son las tres primeras, mientras que las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor.

Los transmisores electrónicos generan la señal estándar de  $4 - 20$  [mA c.c.] (ver Anexo 3), a distancias de  $200$  [m] a  $1$  [Km], según sea el instrumento transmisor. La señal electrónica de  $4$  a  $20$  [mA c.c.] tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, esta libre de corrientes parásitas y emplea solo dos hilos que no precisan blindaje.

La relación de  $4$  a  $20$  [mA c.c.] es de  $1$  a  $5$ , la misma que la razón de  $3$  a  $15$  [PSI] en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de  $4$  [mA] elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

El “cero vivo” con el que empieza la señal ( $4$  [mA c.c.]) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de un hilo (la señal se anula) y de permitir diferenciar todavía mas el “ruido” de la transmisión cuando la variable está en su nivel mas bajo.

Los transmisores inteligentes (smart transmitter), introducidos al mercado por la marca Honeywell en 1983, son instrumentos que tienen incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la medida exclusiva de la variable. Lógicamente dichas funciones son proporcionadas por un microprocesador.

Existen dos modelos de transmisores inteligentes:

- El capacitivo
- El de semiconductor

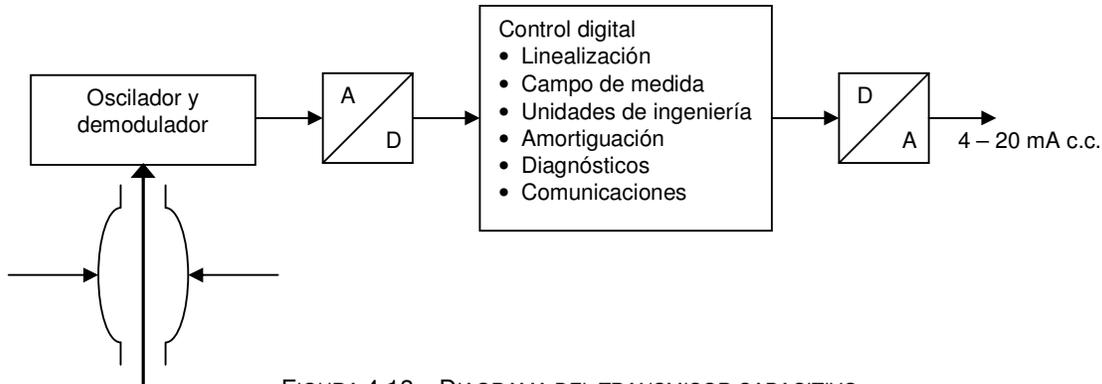


FIGURA 4.13 – DIAGRAMA DEL TRANSMISOR CAPACITIVO

#### CAPACITIVO

El transmisor capacitivo (figura 4.13), se basa en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos. La transmisión de la presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazamiento del diafragma sensible es de sólo un 0,1 [mm] como máximo.

Un circuito formado por un oscilador y demodulador transforma la variación de capacidad en señal analógica. Esta a su vez es convertida a digital y pasa después a un microprocesador que la transforma a la señal analógica de transmisión de 4 – 20 [mA c.c.].

#### SEMICONDUCTOR

Este tipo de transmisor aprovecha las propiedades eléctricas de los conductores al ser sometido a tensiones. El modelo de semiconductor difundido está fabricado a partir de una pequeña película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheatstone (figura 4.14) aplicable a la medida de presión, presión diferencial y nivel, formado por una pastilla de silicio difundido en el que se hallan embebidas las resistencias  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  y  $R_D$  de un puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente originado por cambios en la variable, da lugar a una señal de salida de 4 – 20 [mA c.c.].

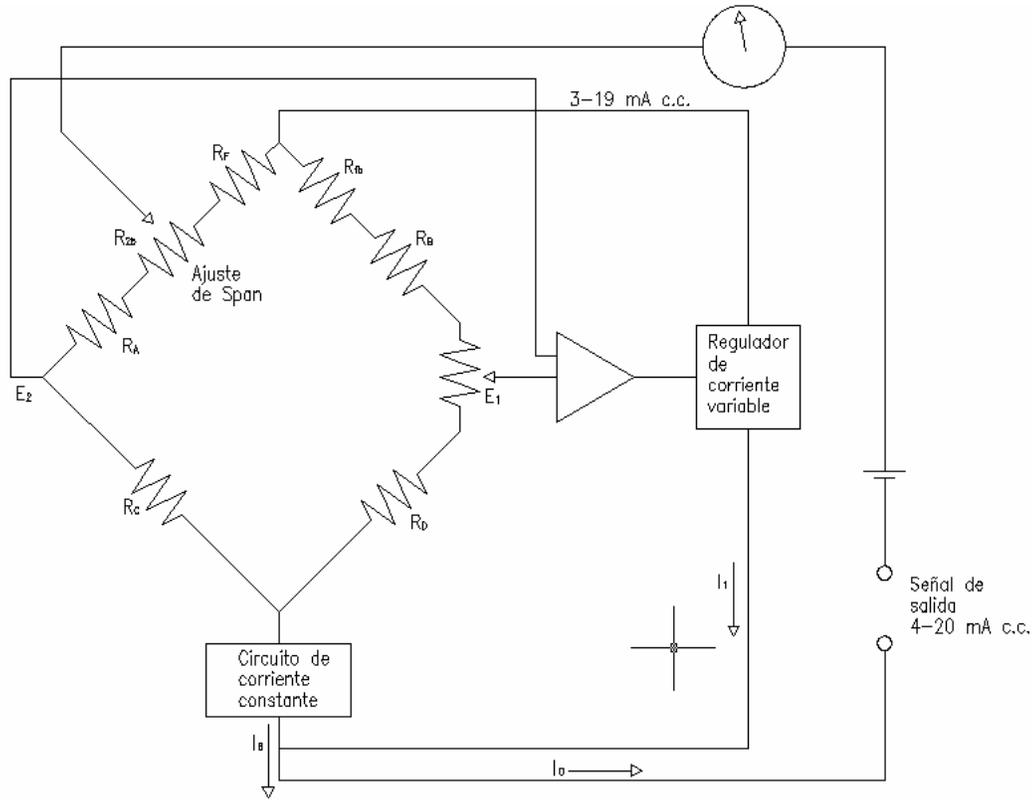


FIGURA 4.14 – DIAGRAMA DE TRANSMISOR SEMICONDUCTOR, PUNTE DE WHEATSTONE EN SILICIO DIFUNDIDO

Cuando no hay presión, las tensiones  $E_1$  y  $E_2$  son iguales, al aplicar la presión del proceso,  $R_B$  y  $R_C$  disminuyen su resistencia y  $R_A$  y  $R_D$  la aumentan, dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia de potencial ente  $E_1$  y  $E_2$ . Esta diferencia se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla a un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 [mA c.c.] con un 1 [mA] del puente produce una señal de salida de 4 a 20 [mA c.c.]. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación  $R_{fb}$ , y eleva  $E$  a una tensión equivalente a  $E_2$  y reequilibra el puente. Como la caída de tensión producida a través de  $R_{fb}$  es proporcional a  $R_{2b}$ , esta resistencia fija el intervalo de medida (span) del transductor. El cero del instrumento se varia intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

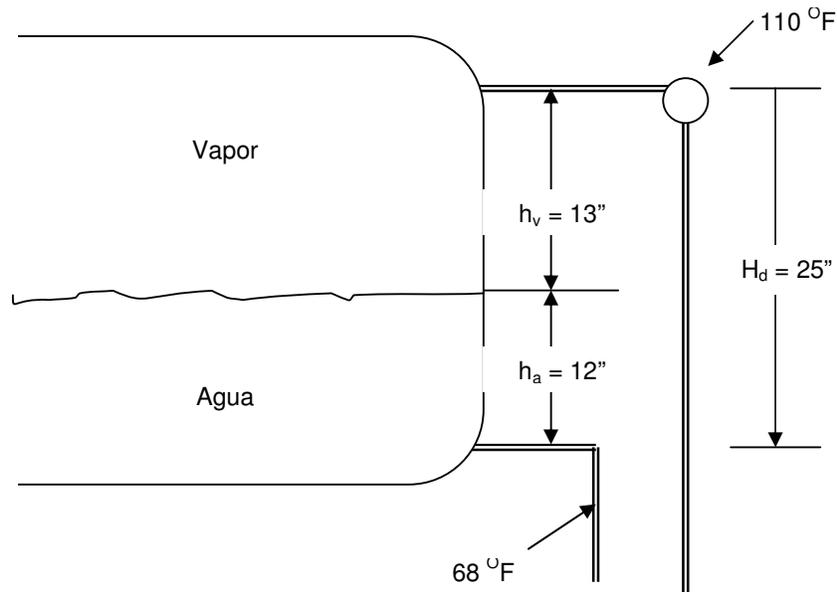
La pastilla de silicio contiene normalmente dos puentes de Wheatstone, uno de presión, y el otro de presión diferencial, y una termoresistencia. El microprocesador compensa las no linealidades de los elementos o sensores individuales, convierte las tres señales analógicas a impulsos y calcula, mediante datos prefijados en fábrica y almacenados en memoria, un valor digital de salida que es transformado a una señal analógica de 4 – 20 [mA c.c.]. Un comunicador portátil de teclado alfanumérico que puede conectarse en cualquier punto del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor, permite

leer los valores de proceso, configurar el transmisor, cambiar su campo de medida y diagnosticar averías.

CALIBRACIÓN DEL TRANSMISOR DE NIVEL

Esta calibración se lleva para saber entre que rangos vamos a ajustar el transmisor de nivel (diferencial). Para obtener los valores: mínimo, medio y máximo nos basamos en la presión de trabajo del domo, la presión atmosférica y la presión absoluta, todas expresadas en PSI, también se debe de conocer la altura del domo y las alturas en la que normalmente se ubica la altura del agua y la altura del vapor.

Para poder trabajar con la densidad debemos conocer el volumen específico a cierta temperatura, estas temperaturas son de 110 °F y de 68 °F. Sabemos que el inverso del volumen específico es la densidad, así que invirtiendo los valores obtenidos de los volúmenes específicos obtenemos la densidad.



Datos

$$P_T = \text{Presión de trabajo [PSI]} = 30 \text{ [Kg/cm}^2\text{]} = 426.6 \text{ [lb/pulg}^2\text{]}$$

$$P_{atm} = \text{Presión atmosférica} = 11.3 \text{ [PSI]}$$

$$P_{abs} = P_T + P_{atm} = 426.6 + 11.3 = 437.9 \text{ [PSI]}$$

$\gamma$  = Densidad

V = volumen

$$H_d = \text{Altura del domo [pulg]} = 25''$$

$$h_a = \text{Altura del agua [pulg]} = 12''$$

$$h_v = \text{Altura del vapor [pulg]} = 13''$$

Cálculo

$$1 \quad \gamma = \frac{1}{v}$$

$$2 \quad N_{.nor} = \frac{Hd(\gamma_{110^{\circ}F}) - [(h_v \gamma_v + h_a \gamma_a)]}{\gamma_{68^{\circ}F}} = \frac{(25)(61.842) - [(13)(0.940) + (12)(51.41)]}{62.32}$$

$$N_{.nor} = \frac{Hd(\gamma_{110^{\circ}F}) - [(h_v \gamma_v + h_a \gamma_a)]}{\gamma_{68^{\circ}F}} = \frac{1546.05 - [12.22 + 616.92]}{62.32} = 14.713''$$

$$3 \quad N_{max} = \frac{Hd(\gamma_{110^{\circ}F} - \gamma_a)}{\gamma_{68^{\circ}F}} = \frac{(25)(61.842 - 51.41)}{62.32} = 4.184''$$

$$4 \quad N_{min} = \frac{Hd(\gamma_{110^{\circ}F} - \gamma_v)}{\gamma_{68^{\circ}F}} = \frac{(25)(61.842 - .0940)}{62.32} = 24.431''$$

$$\gamma_{110^{\circ}F} = \frac{1}{0.01617} = 61.842$$

$$\gamma_a = \frac{1}{0.0194516} = 51.41$$

$$\gamma_{68^{\circ}F} = \frac{1}{0.01604} = 62.320$$

$$\gamma_v = \frac{1}{1.0630664} = 0.940$$

El nivel normal esta dado al centro de la mirilla, no al centro del domo. Con los valores obtenidos, menor y mayor, reflejamos este rango en una escala de 0% a 100%.

4.184" H <sub>2</sub> O	100 %	4 [mA]
6.208" H <sub>2</sub> O	90 %	5.6 [mA]
8.233" H <sub>2</sub> O	80 %	7.2 [mA]
10.258" H <sub>2</sub> O	70 %	8.8 [mA]
12.283" H <sub>2</sub> O	60 %	10.4 [mA]
14.308" H <sub>2</sub> O	50 %	12.0 [mA]
16.332" H <sub>2</sub> O	40 %	13.6 [mA]
18.357" H <sub>2</sub> O	30 %	15.2 [mA]
20.382" H <sub>2</sub> O	20 %	16.8 [mA]
22.406" H <sub>2</sub> O	10 %	18.4 [mA]
24.431" H <sub>2</sub> O	0 %	20 [mA]

## 5.1 ¿QUE ES UN CONTROL DE COMBUSTIÓN?

Es la regulación del proceso (de combustión) que se basa en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el calor suministrado.

El control de combustión, debe suministrar suficiente combustible para liberar el calor necesario y así convertir el agua en vapor, y el aire necesario para quemar completamente el combustible. Los diferentes circuitos funcionales de control deben estar coordinados para realizar estas funciones con máxima seguridad además de buena eficiencia.

Las principales funciones del control de combustión son:

- Regula la cantidad de combustible requerido en quemadores, el aire necesario para su combustión eficiente y el régimen en que la combinación apropiada de ambos se requiere para generar la energía necesaria en la caldera y satisfacer la demanda de vapor en cada momento a las condiciones de operación del vapor.
- Operar para mantener finalmente el valor de presión de vapor deseado y responder bajo diferentes condiciones dinámicas que dependen de características de quemadores, combustible, aire y características inherentes de la caldera para que coordinadamente se mantenga el valor de presión de vapor en el punto de ajuste independiente de las demandas del sistema de distribución.

El controlador de presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es modificada por un relé de relación para ajustar la relación entre el aire y el combustible, y pasa a un controlador que la compara con la señal de caudal de combustible. Si la proporción no es correcta, se emite una señal al servomotor de mando del ventilador o a la válvula de mariposa, de modo que el caudal de aire es ajustado hasta que la relación combustible – aire, es correcta.

En la regulación de la combustión puede darse preferencia en el mando al combustible o al aire para que la operación de la caldera corresponda a un sistema determinado de variadas características de seguridad. Estas características de combustión son las siguientes:

- Flujo combustible (para este caso es gas) caudal aire en serie.
- Flujo aire (caudal combustible en serie).
- Presión de vapor – flujo gas / flujo vapor – flujo aire en serie.
- Flujo aire – flujo combustible en paralelo.

El control de modernas unidades generadoras de vapor no varía grandemente de una unidad a otra con respecto al equipo esencial requerido para ponerlo en operación automática. Ciertamente las unidades mayores representan considerablemente una mayor inversión y pueden justificarse

sistemas de control mucho más refinados y arreglos de seguridad. El diagrama básico de un Sistema de Control de Combustión, permanecerá esencialmente igual, independientemente del tamaño de la unidad, su localización o el tipo de trabajo para el que esté diseñado el generador de vapor. Mientras que los grandes generadores de vapor para servicio público frecuentemente parecen ofrecer las mayores dificultades con respecto a los problemas de control, debe tenerse en mente que la mayoría de los generadores de vapor se encuentran dentro del rango de capacidad de 60,000 libras por hora de vapor.

## 5.2 NECESIDAD DEL CONTROL DE COMBUSTIÓN AUTOMÁTICO.

Un punto inicial para discutir el control de combustión, será investigar brevemente alguna de las razones por las cuales el control de combustión es necesario.

1. En los modernos generadores de vapor es necesario tener un sistema de control completo que opere la planta. Debido a la complejidad del proceso involucrado, pudiera ser muy difícil para el operador trabajar estas unidades sin tener la adecuada instrumentación y los dispositivos de potencia para mover las diferentes válvulas y compuertas que se tienen y que se deberán ajustarse durante la operación. Es un hecho que la inversión adicional necesaria para hacer una de estas unidades completamente automática, con referencia a los dispositivos necesarios para una operación manual de la planta, es un pequeño porcentaje del costo total de instrumentación y control.
2. Ofrecer una operación más conveniente que generalmente da por resultado una necesidad menor del esfuerzo humano, una mejor utilización de los hombres que intervienen y un método de operación mucho más sistemático de tal proceso.
3. Generalmente da por resultado una disminución en el costo de operación a través de la obtención de menos mantenimiento y una operación más uniforme y satisfactoria de la planta cada hora de operación. Como el control automático se tiene las 24 horas del día sin ningún cambio de eficiencia, se obtendrá un mejor trabajo.
4. Contribuye a aumentar la eficiencia de la operación total ya que es posible para los instrumentos y controles efectuar ajustes menores que los que se tendrían si se hicieran manualmente a través de la intervención humana y solamente a través de la sección humana y solamente ajustes muy finos son los necesarios.
5. Provee un margen de seguridad de operación relevando la operación del personal y muchos de los ajustes de rutina y modificaciones de sistema, y que es necesario tomar en cuenta día a día, que pudieran variar los

factores. Al liberar el personal de operaciones de rutina, le permiten una mayor concentración en pocas actividades.

7. La sección de instrumentos de este sistema de control generalmente suministra un registro casi completo minuto a minuto de los cambios y variaciones que pudieran ocurrir de tal forma que se puede hacer un análisis de estos factores día a día con los resultados finales y cualquier desviación con cambios en la operación pueden efectuarse para corregírseles antes de que se tenga una pérdida económica grande.

### 5.3 REQUISITOS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN.

1. El primer requisito de un sistema de control es suministrar una liberación de calor de acuerdo a la demanda del vapor. Esto deberá desde luego ser un índice a determinar en los requisitos o cambios de esta demanda. La medición más común, la cual es representativa de este balance de calor, ó relación de entrada contra salida de energía, es la presión de vapor de la caldera. Esta medición reflejara cambios en casi todas las variables del sistema de control. Un aumento en la carga causará una caída de presión, como un aumento en el flujo de agua de alimentación, causará una caída en la temperatura del vapor y como resultado frecuentemente una caída de presión.

Relaciones excesivas de combustión a cargas dadas podrán también aparecer como presión de vapor excesiva. Esto es, entonces un resultado de cierta interacción de una perturbación en cualquiera de las variables de operación de la caldera. Es posible variar un factor solamente y dejar a los otros elementos que permanezcan constantes.

En casi todos los generadores de vapor que controlamos, hemos encontrado que un índice de presión de vapor es suficiente para detectar las desviaciones o desbalances entre el calor que entra y sale. Algunas veces, sin embargo, cuando los generadores de vapor están destinados a responder variaciones de carga muy rápidas o debido al tipo de demanda de vapor, deberá aumentar o disminuir sus relaciones de combustión continuamente y muy rápidamente. En trabajos de este tipo frecuentemente aplicamos un sistema de medición de dos o tres elementos, para determinar las variaciones del balance del calor. El flujo de vapor es generalmente el más empleado como un segundo y cuando se requieren tres elementos, la demanda del generador frecuentemente se usa en el sistema de control.

Con una caldera normal, la presión de vapor es suficiente y suministra un índice de liberación de calor y como resultado, una señal al sistema de control la cual variará la cantidad de combustible que se esta consumiendo y la cantidad de aire que se esta mezclando con él, para la combustión.

A pesar de que existen varios tipos y métodos de combustión, casi todos ellos caen en uno u otro tipo de las dos categorías. El primero es la combustión en suspensión en el cual todo el combustible se quema sin necesidad de un colchón de combustible. Ejemplo de este método es la combustión de carbón pulverizado

2. El segundo requisito de un sistema de control de caldera, es la capacidad para dividir la carga entre varios generadores de vapor. Debe ser siempre capaz de dividir la carga o flujo a través de varias unidades auxiliares de una instalación si se encuentran conectadas en paralelo.
3. El aspecto más importante o requisito de un control de combustión es proporcionar económicamente la relación del combustible a aire para una eficiencia de combustión óptima. Una insuficiencia de suministro de aire dará por resultado que el combustible suministrado no se quemará completamente; un exceso de aire por el contrario, aumentará las pérdidas a través de la chimenea innecesariamente, ocasionando una eficiencia total menor de la operación. Un exceso de aire requiere también mayor consumo de potencia para el ventilador aumentando con esto la porción de energía de salida requerida para operar los auxiliares.
4. Mantener constante el tiro en el hogar en la zona de combustión ó en el caso de unidades presurizadas una presión dada. Referente al tipo de unidad, se indican las razones necesarias para mantener un tiro constante.

Primeramente, tan pronto como el tiro se mantenga constante, una de las variaciones en el sistema se elimina.

Con una posición dada de una compuerta, una variación en el tiro del hogar producirá un cambio proporcional en la relación de flujo. Por esta razón con objeto de asignar un valor a la posición de una compuerta o cualquier confiabilidad en las características de flujo producidas por una posición de un servomotor, es necesario mantener una diferencial, a través de una compuerta con un valor constante. En segundo término se tienen problemas de infiltración. Cualquier cantidad de aire que se introduzca a la unidad después que la combustión del combustible tuvo lugar, simplemente agrega trabajo al ventilador de tiro inducido y aumenta las pérdidas a través de la chimenea debido a que resta energía térmica. Manteniendo la presión del hogar tan cerca como sea posible a la atmosférica en una unidad de tiro balanceado, la presión diferencial entre el interior y la presión atmosférica circundante a la unidad, es mínima y entonces las infiltraciones serán mínimas también.

5. El quinto requisito en un sistema de control de caldera es regular el suministro de agua de alimentación en la unidad. Cualquier variación de este factor afectará el sistema de control de combustión completo más que cualquier otro elemento simple. Una acción cíclica del sistema de

control de agua de alimentación casi siempre repercute en el sistema de control de combustión dando por resultado un ciclaje serio.

6. El sexto requisito en un sistema de control de caldera es controlar la temperatura final de vapor con alto grado de exactitud. Ya que las modernas turbinas se diseñan para operar a presiones y temperaturas específicas, cualquier variación de estos factores afectará seriamente la eficiencia de la turbina.

## 5.4 ELEMENTOS DEL CONTROL DE COMBUSTIÓN

### 5.4.1 DAMPER (COMPUERTA DE AIRE)

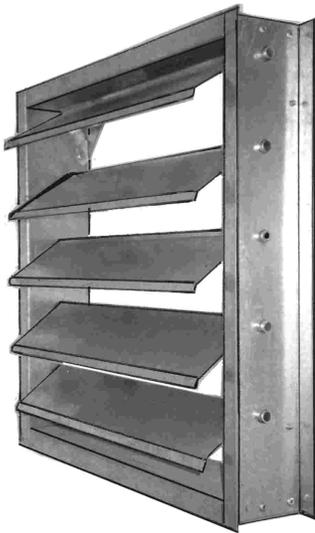


FIGURA 5.1 –  
COMPUERTAS DE AIRE

Parte de la caja de aire que controla la cantidad de aire de combustión a los quemadores. Las compuertas de aire se pueden instalar a la succión o a la descarga del ventilador, o en ambas partes. Siempre que se cuente con un conjunto motor ventilador cuya velocidad no sea variable, se deberá instalar una compuerta de succión. En cualquier caso, las compuertas de aire deberán ser del tipo aletas múltiples de apertura lenta diseñadas para proporcionar una característica lineal del flujo de aire contra apertura. (Figura 5.1)

El diseño de las compuertas deberá ser tal que a posición totalmente cerrada permita una fuga de aire mínima que sea compatible con la rangeabilidad de la caldera y con las curvas de exceso de aire de los quemadores. Esta última característica es importante para garantizar el exceso de aire a fuego mínimo.

### 5.4.2 SERVOMOTOR

El servomotor es una unidad de potencia cuya función es posicionar compuertas, brazos móviles ó levas de acuerdo a un sistema de control. Deberán ser lo suficientemente potentes para desarrollar esta función en cuestión de segundos, entregando la alta carga ejercida sobre ellos; por lo general estos equipos están localizados a una distancia considerable del tablero de control, donde el impulso de control, el impulso con que se accionan, ha sido generado.

La unidad de potencia más comúnmente usada es el servomotor por émbolo, el cual varía en tamaño dependiendo de las cargas que va a mover. Estos servomotores, cuando estén equipados con cubiertas a prueba de polvo, pueden localizarse convenientemente en cualquier lugar exterior ó interiormente y conectarse al dispositivo que operaran mediante eslabones

estándar. La cubierta protege las partes de trabajo del polvo y la intemperie, además de presentar una apariencia estática.

Cada servomotor puede ser operado ya sea automáticamente desde un relevador de control, ó manualmente a través de un relevador manual de la estación selectora, o manual localmente mediante una leva localizada en uno de los costados de los controladores pequeños y mediante un volante en las unidades de mayor tamaño. Cada uno de los servomotores se podrá bloquear localmente mediante una palanca de bloqueo localizada en el costado de la unidad, la leva de cambio pondrá a la unidad en operación manual local. La fricción del sistema manual es suficiente para actuar como un bloqueo de posición.

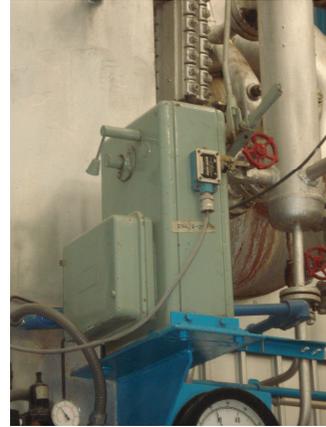


FIGURA 5.2 – SERVMOTOR

De acuerdo a este servicio este elemento recibe el nombre de servomotor de tiro forzado porque controla la entrada de aire que inyecta a la caja de aire el ventilador de tiro forzado. Se basa en el funcionamiento de un pistón de doble efecto, ya que necesitara aire para cerrar y aire para abrir. Cuenta con un posicionador el cual recibe de un transductor electroneumático (I/P) una señal de 3- 15 [PSI] la que transmitirá a ambas cámaras del pistón. Un desbalance provocado en una de las dos definirá apertura o cierre proporcional.

Las persianas de aire o Damper se accionan por un eslabonamiento mecánico (Figura 5.3), la acción de la palanca, provocada por el pistón de doble efecto, acciona una varilla que esta conectada con el movimiento de apertura de las persianas. Si esta palanca sube las persianas abrirán, si baja, además de cerrarlas, accionara un contacto que avisara que las persianas están cerradas.



FIGURA 5.3 – ESLABONAMIENTO MECÁNICO

#### 5.4.3 VÁLVULA DE CONTROL

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal de fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador. Una válvula de control se compone del cuerpo y del actuador.

La siguiente figura, 5.4, muestra una válvula de control, ya sea que controle el flujo de gas o de agua, las partes y el accionamiento de estas, es igual para cualquier servicio. Las variaciones significativas serán en la "camisa", elemento que permite un distinto paso de flujo dependiendo de la sustancia que opere. Los números indican una secuencia de funcionamiento común en la válvula.

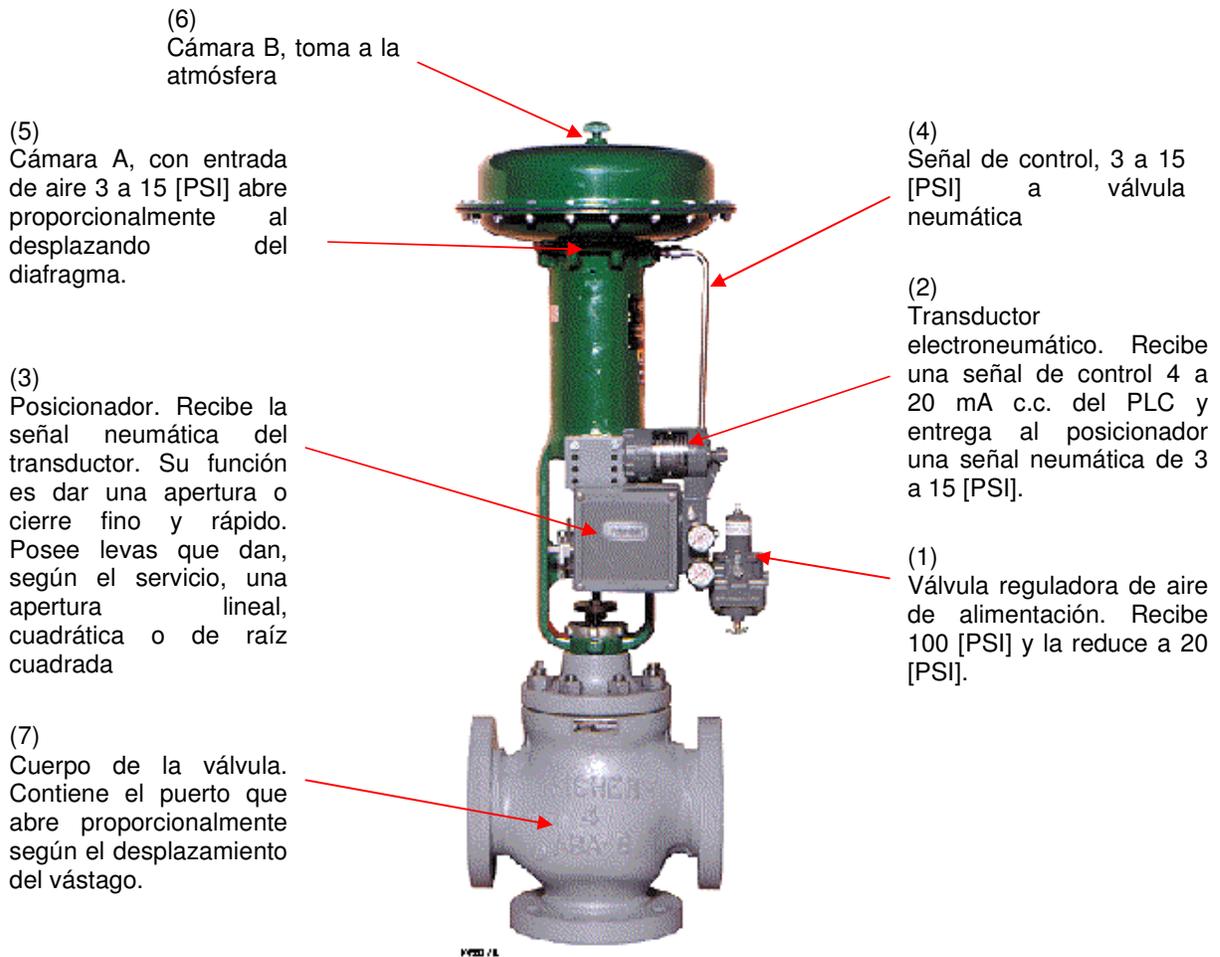


FIGURA 5.4 – FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y lo asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que se acciona por el servomotor.

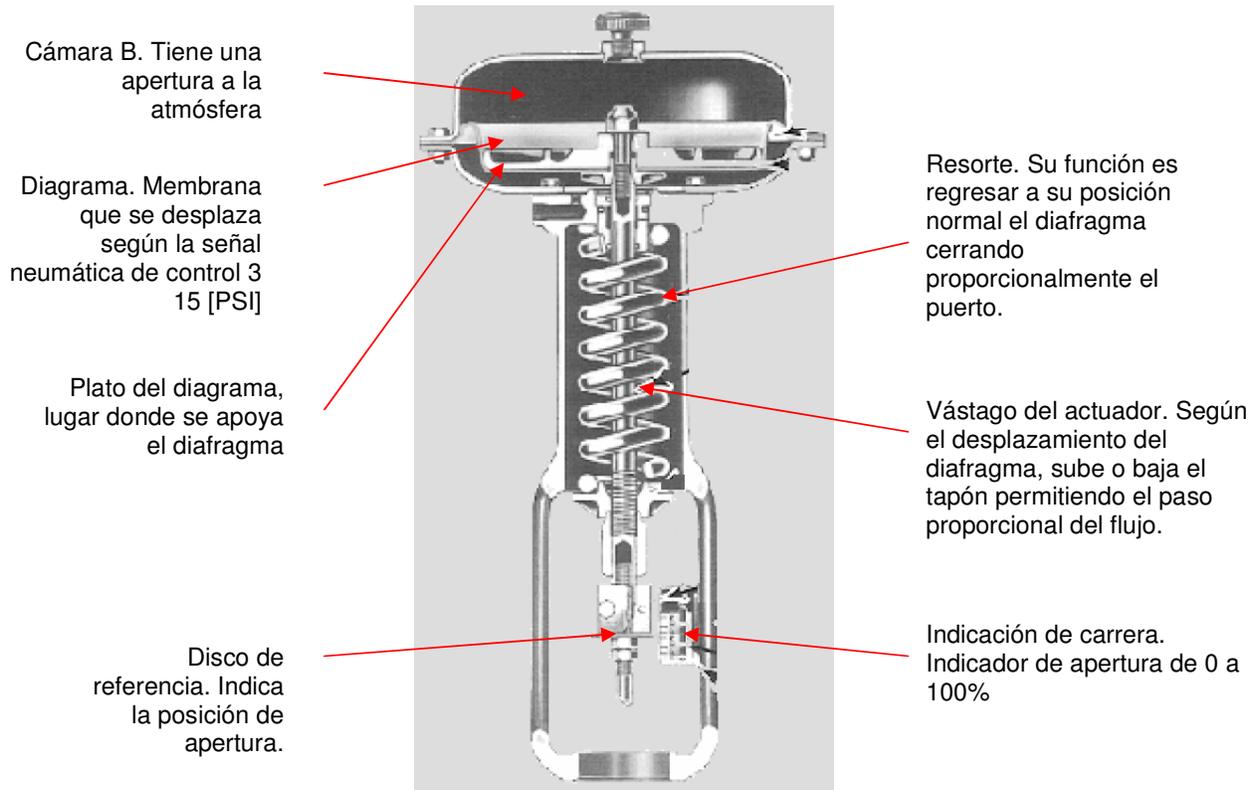


FIGURA 5.5 – PARTES INTERNAS DEL ACTUADOR NEUMÁTICO

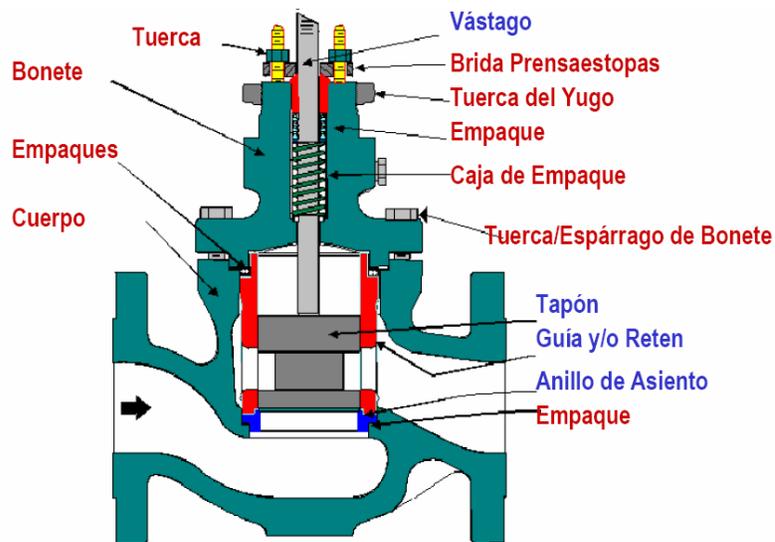


FIGURA 5.6 – PARTES INTERNAS DEL CUERPO

## 5.5 CONTROL MAESTRO DE LA UNIDAD

La presión de vapor en el domo ó en la salida del sobrecalentador, según sea el caso, es el punto de equilibrio entre la demanda de energía del sistema de distribución de vapor, el ingreso de agua a la caldera y el suministro de combustible y aire para establecer el régimen de combustión requerido, este parámetro rige las acciones principales de la unidad y la señal que aquí se genera usualmente se conoce Control Maestro.

Al demandarse más vapor de los diferentes usos finales (Figura 5.9) del sistema de vapor hay una caída de presión y esta desviación crea demanda para más energía. Se usa la interacción de varios circuitos de vapor para asegurar que la presión de vapor se mantenga constante y que los flujos de agua, aire, combustible y gases de combustión correspondientes sean manejados en forma coordinada para satisfacer las necesidades del sistema en cada momento, en forma segura y eficiente. El control maestro es parte integrante del control de combustión.

La función de este control es la de sensor y mantener en forma constante la presión del cabezal (para este caso 30  $[\text{Kg}/\text{cm}^2]$ ). Esta presión será sensada por tres transmisores de presión y de los cuales se obtendrá el promedio mediante una lógica. Cada transmisor deberá ser colocado en un modulo de entradas analógicas independiente.

En caso de que uno ó dos de los tres transmisores fallen (bajo rango, sobrerango, falla del modulo del PLC), se obtendría el promedio del restante o restantes transmisores. Además de este chequeo se verifica si uno de estos tres transmisores de presión se desvía en su valor de medición con respecto a los otros dos, y si es así se dejara fuera de servicio su señal, no se promediara y se alarmara. El valor de desviación puede ser ajustado entre 0.3 y 0.5  $[\text{Kg}/\text{cm}^2]$ .

La forma en la que opera este control será enviando su señal de carga (0 – 100%) vía la red de ControlNet, a los procesadores (CCS). El control maestro será manipulado mediante una pantalla de operación el cual contiene una carátula similar a la de control de la marca Bailey, Foxboro, entre otras. Y desde la cual se puede hacer las siguientes operaciones:

- Selección del modo en auto o manual
- Ajuste de Set Point (S.P.) o salida de control (C.V.)
- Visualización de la variable de proceso

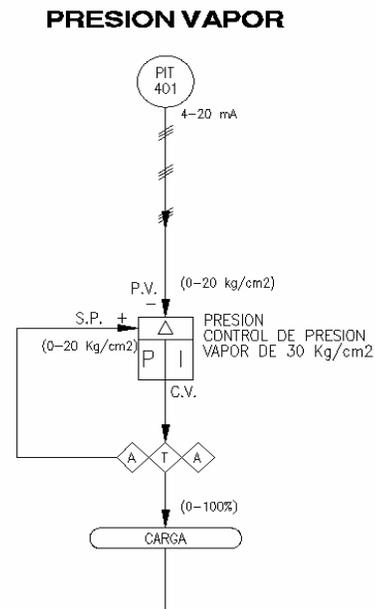




FIGURA 5.8 – CARÁTULAS CONTROLADORAS

El control de combustión maestro opera dos controles mas, el control de flujo gas y flujo aire, idealmente, un sistema de monitoreo debe presentar las carátulas controladoras para que el operador visualice y manipule esta información. La figura muestra una pantalla donde del lado izquierdo aparece el control de presión de vapor, la carátula central representa el control de flujo gas y la de la derecha el control de flujo aire. En ellas se fija el set point y la variable de control (en verde) oscilará hasta alcanzar este valor. Así también tiene la opción de operarse ya se en modo manual, automático o el intermedio de ellos que es semi-automático.

La presión del cabezal de vapor es sensada por un transmisor de presión. Esta variable de proceso se compara con el punto de ajuste (set point) de la presión de cabezal en el controlador maestro de la planta para generar la señal de demanda de la relación de fuego la cual es transmitida a cada una de las estaciones de control maestras automático/manual.

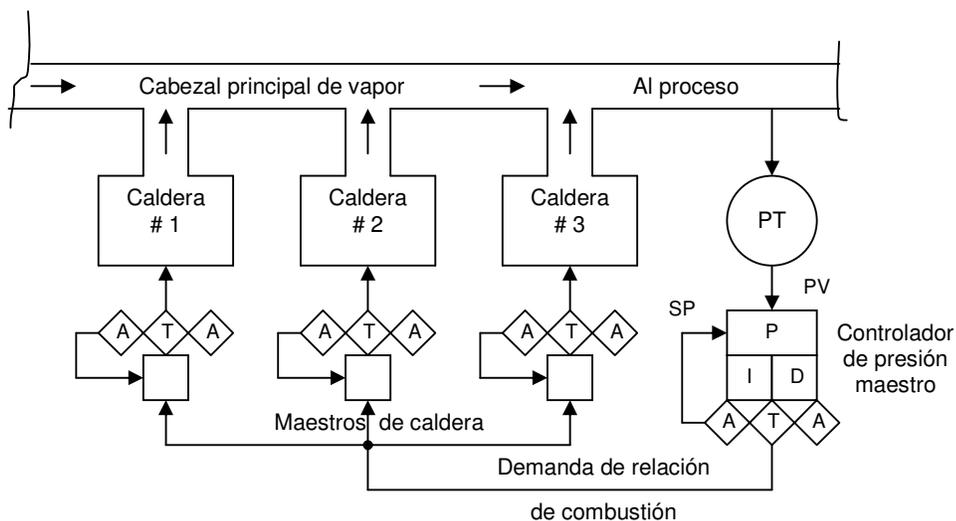


FIGURA 5.9 – SISTEMA DE CONTROL MAESTRO

## 5.6 CONTROL DE LÍMITES CRUZADOS.

Sistema de control cuya función principal es prevenir una mezcla rica en combustible durante cambios de carga, prevención requerida en razón de que la respuesta del combustible que es mucho más rápida que la del suministro de aire. Esto se debe a la naturaleza compresible del aire y la respuesta lenta de los posicionadores de compuerta y cambio de velocidad en algunos tipos de ventiladores. Conociendo el comportamiento del aire, se seleccionan los rangos de retraso para ajustarse de manera que la disposición de aire suficiente para combustión se tenga en cualquier momento, evitando las condiciones de producción de humo durante los cambios de carga y deficiencia en incremento de demanda.

El control de combustión tipo límites cruzados es el más seguro de los controles aplicables en la actualidad, por el hecho de que previene una mezcla rica en combustible en el hogar de la caldera. Este tipo de control de combustión se especifica como práctica normal, independientemente del tipo o tamaño de la caldera o de la naturaleza del combustible.

Por ejemplo, un selector de alta recibe la señal de demanda de combustible y la señal de flujo de combustible real, este enviará el valor más alto de los dos a la compuerta de aire y lo tomará como el punto de ajuste para el flujo de aire requerido. Por otra parte un selector de baja compara las señales de demanda y flujo de aire que puede quemarse con combustible disponible y envían la más baja de las dos a la válvula de combustible.

Si existe un mal funcionamiento que cause una disminución del flujo de aire, el selector de baja acoplará esta señal de aire disminuyendo hacia el control de flujo de combustible. El flujo de combustible disminuirá en proporción al flujo de aire independiente de la demanda de vapor; esta disminución prevendrá la creación de una mezcla rica en combustible en el hogar de la caldera.

En un sistema de límites cruzados, el flujo de aire incrementa siempre antes que el flujo de combustible aumente, y el flujo de combustible disminuye siempre antes que el flujo de aire disminuya.

### 5.6.1 INCREMENTO O RECHAZO DE CARGA

Al presentarse una demanda de carga en el Sistema, el Control de Límites Cruzados (figura 5.10) opera de la siguiente forma:

El control Presión\_30\_Kgs incrementa su salida de control (carga) la cual llegara a los selectores de menor (SEL\_301\_1) y mayor (SEL\_201\_1), comparándose en primera instancia contra el flujo de gas (selector de mayor) el cual dejara pasar la mayor de las dos variables comparadas, en este caso se dejara pasar la señal de carga del controlador (PRESION\_30\_Kgs) y esta será el S.P. del controlador de flujo de aire FIC\_301, quien mandara abrir las compuertas del Servomotor SM-201, para dejar entrar mas aire, hasta alcanzar el S.P. requerido, en este controlador FIC\_201.

Al mismo tiempo, el selector de menor dejara pasar la menor entre el flujo de aire caracterizado (igual a flujo de gas) y la señal de carga (PRESION\_30\_Kgs).

Para este caso se dejara pasar la señal de flujo de aire caracterizado, quien será el S.P. para el control de flujo de gas (FIC\_301) quien deberá de incrementar la salida hacia la válvula de control FCV\_301, hasta igualar la variable de flujo con el S.P. requerido en este control (FIC\_301).

Esta acción se repetirá cuantas veces se tenga demanda de carga, es decir, se incremente primero el flujo de aire y después el flujo de gas, con lo cual se asegura que nunca exista una cantidad de aire menor para la cantidad de gas a quemar.

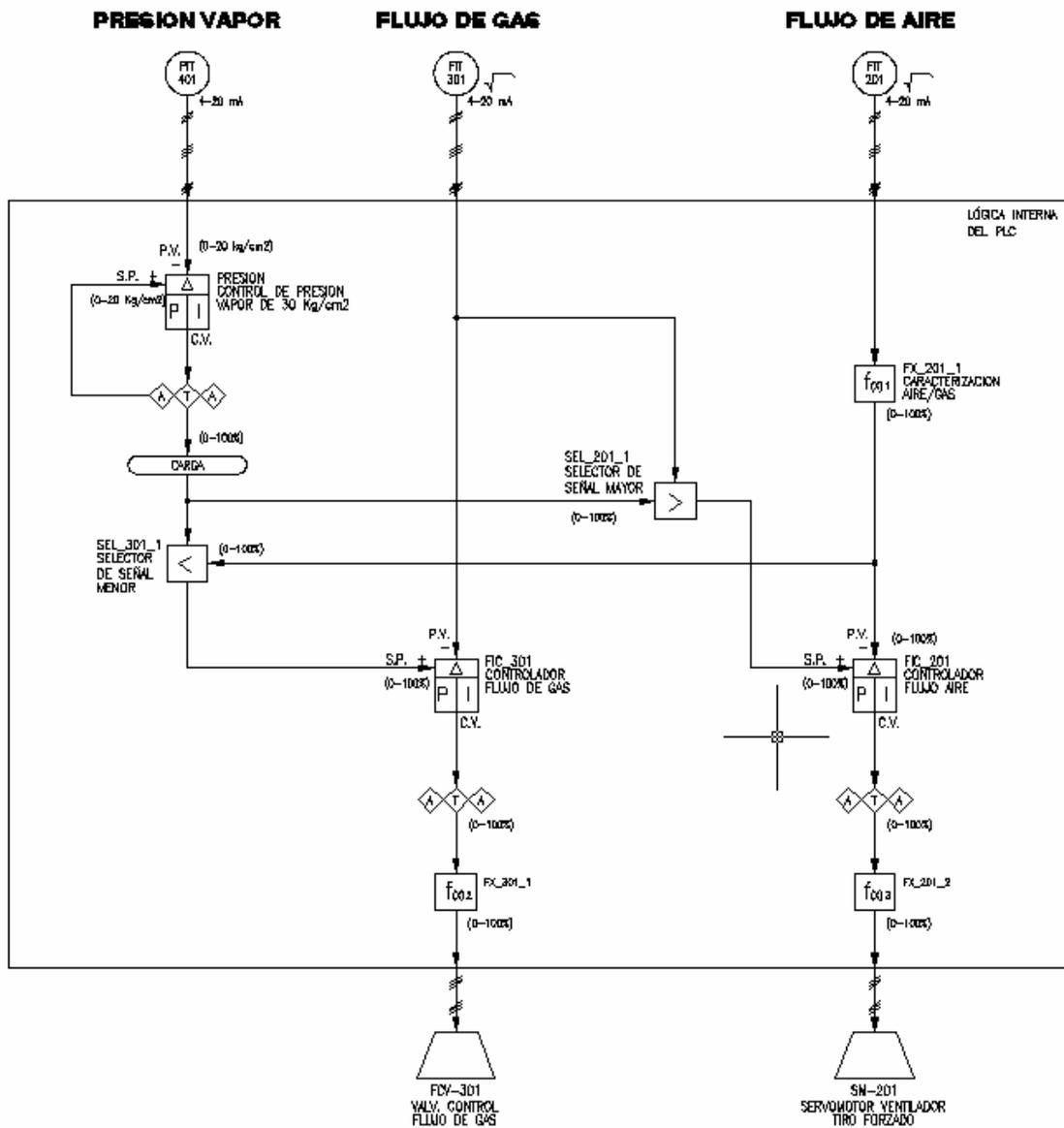


FIGURA 5.10 – CONTROL DE LIMITES CRUZADOS

### 5.6.2 DECREMENTO O RECHAZO DE CARGA

Al presentarse un decremento en la carga del sistema, el control de límites cruzados operara de la siguiente forma:

El control PRESION\_30\_Kgs decrementará su salida de control (C.V.) y la cual llega a los selectores de menor y mayor, respondiendo primero el selector de menor en la cual se compara el flujo de aire caracterizado y la señal de carga, dejando pasar la menor de estas, que en esta caso será la señal de carga, siendo el S.P. para el control de flujote flujo de gas (FIC\_301), quien deberá de decrementar la salida hacia la válvula de control FCV\_301, hasta igualar la variable de flujo con el S.P. requerido.

En paralelo, el selector de mayor comparara que la señal es mayor entre el flujo de gas y la señal de carga, dejando pasar la mayor de estas, que en este caso será la de flujo de gas y la cual será el S.P. para el control de flujo de aire FIC\_201, quien deberá de decrementar la salida hacia el servomotor cerrando las compuertas de aire del V.T.F., hasta igualar la variable de flujo con el S.P. requerido.

Una vez que el flujo de aire caracterizado es igualar a la señal carga, el S.P. que dejara pasar el selector de menor puede ser cualquiera de las dos variables, así como una vez que el flujo de combustible es igual a la señal de carga, el S.P. que dejara pasar el selector de mayor puede ser cualquiera de estas 2 variables. Esto último aplica tanto para demanda como rechazo de carga.

Si se observa la operación del sistema, lo que siempre se trata de asegurar que el flujo de aire cuando exista una demanda de carga, sea el que suba o se incremente primero y enseguida el flujo de gas, con lo que se asegura que no existía más flujo de gas que el flujo se aire. Caso contrario, cuando se presente un rechazo de carga de carga el flujo de gas bajara primero y luego lo seguirá el flujo de aire, asegurándose de nuevo que le flujo de aire sea el necesario y no menor al requerido, para la cantidad de gas a quemar.

## 6.1 DEFINICIÓN

El Sistema de Manejo de Quemadores, también llamado Sistema de Protección y Encendido, es una práctica para controlar de manera segura el suministro de combustible al generador bajo todas las condiciones de operación. La lógica del BMS (Burner Management System) es determinada por la National Fire Protection Association (NFPA) (Ver Anexo 4). Dentro de las funciones del BMS se encuentran:

- Vigilar y controlar las secuencias de arranque y paro del quemador (o quemadores) y su equipo asociado.
- Vigilar la operación del equipo en cada momento y proveer información sobre su estado al operador.
- Iniciar un procedimiento de paro seguro al detectar una condición de operación peligrosa.

El BMS es un sistema de seguridad compuesto por los siguientes subsistemas:

- Sistema de purga del generador
- Sistema de lógica del encendido
- Sistema de seguridad contra falla de flama
- Sistema de lógica para el Disparo Maestro de Combustible (MFT, Main Fuel Trip)
- Sistema de monitoreo

El Sistema Protección y Encendido está diseñado para asegurar la ejecución de una secuencia de operación segura y ordenada en el arranque y paro del equipo para el quemado de combustibles, así como prevenir errores de omisión o funcionamiento en dichos procedimientos de operación.

El sistema provee protección contra mal funcionamiento del equipo para el quemado de combustible y de los sistemas de aire asociados. Las características de seguridad del sistema están diseñadas para protección en la mayoría de las situaciones de emergencia más comunes; sin embargo el sistema no puede reemplazar la inteligencia y juicio razonable del operador en estas situaciones.

### 6.1.1 SISTEMA DE PURGA DEL GENERADOR

La condición de arranque o encendido es una de las condiciones que presenta mayor riesgo de explosión. Puede decirse que la mayoría de los accidentes de explosión en generadores suceden durante el encendido o cuando estos salen de servicio. Esta purga sirve para evacuar los gases o mezclas de combustible antes de usar o accionar cualquier fuente de ignición, asegurándose que cuando exista el flujo de combustible la ignición será inmediata.

La operación de purga del horno se realiza usualmente con el ventilador (V.T.F.) para combustión del generador, un relevador de tiempo permitirá la

ignición únicamente después de que el ventilador haya operado por un periodo previamente determinado para circular cuando menos el volumen equivalente a ocho cambios de aire y quede establecido al menos el 60% del flujo máximo de aire durante el periodo requerido. En cualquier caso se verifica por medición del relevador, o bien, mediante interruptores de posición en las compuertas (damper) o interruptores de presión en la descarga del ventilador.

#### 6.1.2 SISTEMA DE LÓGICA PARA EL DISPARO MAESTRO DE COMBUSTIBLE (MFT, MAIN FUEL TRIP)

En algunas fases de la operación, el Sistema de Protección y Encendido cuenta con permisivos y disparos, con el fin de tener seguridad en la secuencia de encendido del equipo.

Un circuito alambrado de falla deberá tener un relevador electromecánico, que implemente un disparo maestro de combustible por falla, conocido como Master Fuel Trip (MFT) cuando el operador presione el pushboton MFT, cuando el contacto del Watchdog se abra, o cuando falle una salida crítica que tenga que energizar una condición o estado muy importante. Como parte de las acciones a las que se programa el MFT para que exista corte de combustible, están:



FIGURA 6.1 – DISPARO MFT

- Una fuente de ignición pudiera introducirse en un horno que contiene una mezcla acumulada de aire y vapores de combustible en proporciones explosivas.
- Se alimenta combustible en un horno durante el arranque sin que se produzca la ignición adecuada o cuando haya transcurrido algún tiempo que eso suceda.
- La flama del quemador se extingue en operación normal sin que la alimentación del combustible se haya cortado.
- Se detecta un mal funcionamiento ya sea en el quemador o en el sistema de agua alimentación.

- Se presentan variaciones en la presión del combustible que puedan causar inestabilidad de la flama.

#### 6.1.3 SISTEMA DE SEGURIDAD CONTRA FALLA DE FLAMA

Los sistemas de protección contra falla de flama monitorean continuamente la zona de flamas del quemador principal y piloto para detectar la presencia ininterrumpida de estas, o de otra manera actuar sobre la alimentación de combustible.

La acumulación de combustible no quemado en el generador establece el riesgo de una explosión y este sistema tendrá, por lo antes expresado, la capacidad de interrupción sobre el sistema de alimentación del combustible en forma inmediata. En los sistemas con medición confiable de combustible no quemado puede incorporarse también una señal de respaldo que tenga el mismo efecto aumentando de esta manera la protección por este riesgo. La verificación de la flama se logra mediante detectores de flama una vez que se inicia la alimentación del combustible al piloto o quemador principal. Estos detectores pueden ser del tipo de rayos infrarrojos o ultravioleta.

En los sistemas más modernos para seguridad de falla de flama se han introducido tecnologías de microcomputadoras con capacidad para analizar condiciones de combustión y flama y actuará en forma programada para automáticamente realizar y supervisar la secuencia de arranque y paro, las comunicaciones de alarma y el monitoreo de las funciones de conservación de energía estableciendo en cada caso y previamente el diagnóstico correspondiente.

#### 6.1.4 SISTEMA DE MONITOREO

Un sistema de control para quemador, debe ser diseñado para operar de acuerdo a las secuencias de operación, normas del fabricante y de la NFPA. Los códigos y estándares de seguridad definen los modos de falla que el ingeniero de diseño deberá usar para detectar o responder a una falla específica.

Un BMS bien diseñado además de contar con una buena programación de las secuencia de operación (purga de hogar, bujía de chispa y scanner de flama, lógica de transferencia de combustible, etc.) también debe ser capaz de detectar potenciales modos de falla en cualquiera de los sistemas creados para su operación. Para ello se deben de tomar ventajas de las capacidades del microprocesador referentes al diagnóstico, es decir un monitoreo constante, y consecuentemente activar el número adecuado de alarmas.

La NFPA requiere que el sistema de control del quemador sea del tipo des-energizar para apagar, en el cual las válvulas de paro de seguridad, bloquean el flujo de combustible hacia el quemador si se pierde la energía del sistema, o si son desenergizadas las salidas. Un sistema basado en un PLC debe incluir revisiones de integridad de seguridad para cumplir con los requerimientos de la NFPA.

Los canales de entrada de cada modulo de entradas/salidas deben ser probados periódicamente con el fin de verificar su habilidad para detectar cambios de estado en los dispositivos de campo durante las fallas o condiciones de desenergización.

Las salidas que son alambradas para las válvulas de paro de emergencia deberán ser monitoreadas por un canal de entrada por separado para asegurar que el estado demandado por el procesador en ese momento, realmente este siendo suministrado por el canal de salida.

Un sistema Watchdog (Perro de guardia) que es completamente independiente del controlador, monitoreara continuamente las funciones de temporización del procesador y su habilidad para ejecutar la lógica y salidas de control.

## 6.2 ELEMENTOS EN EL BMS

### 6.2.1 DETECTORES DE FLAMA

La detección de llama en la industria es muy importante desde el punto de vista de seguridad. El quemador de gas utilizado en el generador de vapor, necesita para su funcionamiento correcto que la llama producida por el combustible sea estable y de calidad, y que se mantenga en estas condiciones mientras el quemador esta en funcionando. Ante un fallo en la flama, el sistema de protección debe de actuar inmediatamente excitando el circuito eléctrico de enclavamiento previsto en la instalación para que el conjunto caiga en seguridad, y evite la entrada de combustible sin quemar eliminando el peligro de su eventual encendido y explosión subsiguiente. Los detectores de flama aprovechan varias características de la flama para su funcionamiento: calor, ionización y radiación.

Los detectores de radiación se fundan en la emisión de energía que una llama irradia en forma de ondas que producen luz y calor. Los detectores de radiación ultravioleta consisten en un tubo que contiene dos electrodos, normalmente de tungsteno. El tubo es de material permeable a la radiación ultravioleta, cuarzo por ejemplo, esta lleno de un gas inerte.

Si una radiación ultravioleta penetra en el tubo e incide sobre el cátodo este emite electrones que son atraídos por el ánodo a causa del campo eléctrico establecido entre ambos. Este proceso ioniza el gas en el tubo con lo que éste conduce una corriente.

Para asegurar una verificación constante de la presencia de llama, es preciso interrumpir periódicamente la tensión entre cátodo y ánodo, con el fin de que se establezca la conductividad del tubo un número de veces por segundo, dado que dicho tubo una vez excitado presenta una descarga automantenida en tanto que exista un campo eléctrico entre los electrodos. Las llamas de gas generan radiaciones ultravioletas, de ahí que este tipo de detectores sean idóneos para estos procesos.



FIGURA 6.3 – DETECTOR DE FLAMA

El sistema detector debe ser capaz de captar la llama en un tiempo lo mas breve posible, entre mas tiempo tarde mas cantidad de combustible entra a la cámara de combustión (hogar) provocando una mezcla explosiva.

Este tipo de detectores están en combinación con un programador (PLC), así pueden abarcar desde alarmas de fallo de flama hasta la puesta en marcha y paro de la instalación, incluyendo las fases de purga, supervisión, pospurga, interruptores de enclavamiento para fallos y otros. Este tipo de sistemas disponen de una autocomprobación de sus componentes en cada arranque. Esto con la finalidad de que al disminuir el número de ciclos operativos en una planta, aumenta la posibilidad de un doble fallo, ya que el tiempo entre puestas en marcha y por tanto entre verificaciones de componentes, es mayor.

La protección total se logra con una autocomprobación periódica de los componentes durante el funcionamiento del generador. Si presenta una simulación de fallo de flama, el dispositivo de autocomprobación impedirá el arranque del quemador, o si dispone de autocomprobación periódica, lo para si estaba en marcha.

Esta autocomprobación se logra con un detector ultravioleta dotado de un diafragma oscilante que dispara unas 50 – 90 veces por minuto de acuerdo con los impulsos emitidos por un relevador en el programador. De esta forma, la flama deja de ser vista por el detector y el relevador de impulsos asegura la autocomprobación del circuito una vez por segundo. Cualquier defecto en los componentes electrónicos del detector y del programador da lugar a un paro de seguridad en unos 4 segundos.

#### 6.2.2 VÁLVULAS DE SEGURIDAD

El propósito de las válvulas de seguridad es prevenir explosiones mediante la instalación en las partes a presión. Las válvulas de seguridad son dimensionadas para descargar el vapor a una velocidad y con capacidades mayores que las de la generación de este por la caldera aún en las condiciones de máximo régimen.

A pesar de que las válvulas no son monitoreados por el BMS, es decir no son dispositivos alambrados al PLC, su funcionamiento solo se limita a la parte mecánico, es importante mencionarlo ya que son elementos que garantizan seguridad en la operación, aun en las partes mas críticas, ya que respaldan a la planta en el caso de una alta presión, actúan para liberar la presión y evitar la inminente explosión. Los sistemas de control de los generadores cuentan también con sensores de sobre presión, sobre poniéndose su señal al sistema de control principal para cortar el flujo de combustible a la caldera en condiciones peligrosas.

Las válvulas de seguridad se encuentran en el domo superior, la calibración de ellas hace que una se distinga como primaria y otra como secundaria. La primera de ellas se calibrara para que accione al 10% más de la presión de trabajo mientras que la segunda accionará con un 15% más de la presión de trabajo por alta presión de vapor. Para este generador donde la presión de trabajo es de 30 [Kg/cm<sup>2</sup>] la calibración de la válvula primaria es de 33 [Kg/cm<sup>2</sup>] mientras que la válvula secundaria se calibrará en 34.5 [Kg/cm<sup>2</sup>]. Este procedimiento es marcado por la ASME.

### 6.2.3 INTERRUPTORES DE PRESIÓN

Estos interruptores de presión, también llamados micro switches dependiendo del servicio, pueden ser de un polo un tiro (IP1T) o un polo dos tiros (IP2T) y se pueden conectar para abrir o cerrar el circuito, al aumentarse o disminuirse la presión. Las terminales están marcadas como NC para normalmente cerrado, NA para normalmente abierto y C para circuito común a tierra. La mayoría de los interruptores son micro switches con terminales de tornillo. Esta forma de alambrado es muy conveniente.

Combinando la sensibilidad de un diafragma y la robustez de un pistón, se obtiene este dispositivo de control. Un elastómero o diafragma metálico es fijado herméticamente en su lugar por un anillo "O" estático, aislándolo completamente del proceso. Este arreglo permite que únicamente haya 3 partes húmedas: El puerto de presión, el diafragma y el anillo "O".

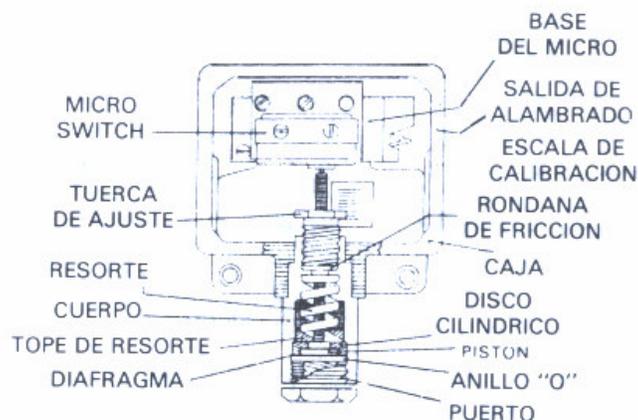


FIGURA 6.4 - INTERRUPTOR DE PRESIÓN

Para ciertas aplicaciones puede soldarse el diafragma con el puerto de presión, eliminando así el anillo "O". Para aplicaciones de altas presiones se elimina el diafragma y se utiliza un pistón con el pivote sellado. Ambos tipos son dispositivos de balance de fuerza. El pistón se mueve únicamente unas milésimas de pulgada, eliminando prácticamente toda fricción y desgaste. Este arreglo ofrece una repetibilidad superior, bandas muertas angostas, altas repeticiones de operación, una vida excepcionalmente larga, altos sobre rangos y muy altas presiones de prueba.

El micro switches es un elemento de conmutación calibrado con cierta tolerancia, este elemento es independiente del ajuste de presión de trabajo a la que se calibra el interruptor. Este elemento se monta sobre las líneas de aire y gas para sensar la presión dentro de las tuberías, un aumento o disminución de presión será motivo para que se active el interruptor, cerrando o abriendo un circuito que dispara una alarma.



FIGURA 6.5 - INTERRUPTOR DE PRESIÓN ALTA O BAJA

### 6.3 FUNCIONAMIENTO DEL BMS.

Los dispositivos de campo para la supervisión y manejo del quemador son típicamente dispositivos On/Off. El número total de Entradas/Salidas digitales asociadas con las válvulas de disparo, válvulas de venteo, switches límite, monitores de flama y otros dispositivos de campo aumenta de acuerdo al número de quemadores a controlar. El BMS interactúa principalmente con Entradas/Salidas digitales y ejecuta únicamente operaciones secuenciales.

#### 6.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FUNCIONAMIENTO

Las secuencias de arranque automático se diseñan para asegurar que el combustible y aire que ingresa a la combustión ocurre bajo condiciones controladas y de seguridad. Cada generador debe estar equipado con un sistema de seguridad aprobado que tenga la capacidad de cortar la secuencia de operación en el caso de una condición de inseguridad que se presente durante el arranque.

El sistema de seguridad del generador coordina con entrelaces de seguridad el paro de la secuencia de arranque, cerrando las válvulas de corte de combustible. La pérdida de flama en la zona de combustión debe tener como respuesta un paro inmediato para así prevenir la acumulación de vapores de combustible y el riesgo de una explosión.

El monitoreo de la ignición de flamas de piloto y flama principal es importante para prevenir la acumulación de mezcla de combustible. Las válvulas de corte combustible cerraran totalmente el suministro a quemadores cuando el detector de flama indique ausencia de ésta en un quemador. Los productos de combustión y las acumulaciones posibles de vapores explosivos de combustible deben purgarse antes de cada encendido y después de cada paro.

El generador debe pararse también si el suministro de aire es insuficiente para la combustión segura y estable evitando también así la generación de mezcla en el horno del generador. Si la presión de combustible es baja hasta el punto en que se tenga inestabilidad de flama, combustión errática, atomización pobre del combustible y posibilidad de explosión, el generador debe de ponerse fuera de servicio.

Ya que la temperatura desarrollada por la combustión en la flama puede ser superior a 1650 °C (3000 °F), valor que esta por encima de los puntos de fusión para generadores si el nivel de agua es demasiado bajo, los componentes expuestos a estas temperaturas podrán sufrir fallas con liberación instantánea con la energía de agua y vapor y una explosión como resultado de perder la refrigeración en el lado de agua vapor.

### 6.3.2 LÓGICA DE ESCALERA

La lógica de escalera de relevadores coloca instrucciones de entrada y salida en los renglones. Mientras se programa, se asigna a cada interruptor un tag, también llamado etiqueta, para poder identificar el servicio de cada interruptor. Si las condiciones de entrada cumplen, se accionará la salida, mientras alguna falle, la salida no se accionará dejando de enviar una señal a campo.

No hay un límite del número de niveles de bifurcación en paralelo que se puedan introducir. El renglón principal es el primer nivel de bifurcación, de igual forma de se pueden anidar las bifurcaciones hasta en 6 niveles.

Los elementos de lógica de escalera que se pueden editar son los siguientes:

- Renglón: Determina el orden de ejecución de las instrucciones de entrada y salida.
- Bifurcación: Consta de dos o mas instrucciones en paralelo, existiendo niveles de bifurcación
- Instrucción de entrada: Instrucción que verifica, compara o examina condiciones específicas del proceso.

- Instrucción de salida: Instrucción que realiza una acción, tal como encender un dispositivo, apagar un dispositivo, copiar datos o calcular un valor.

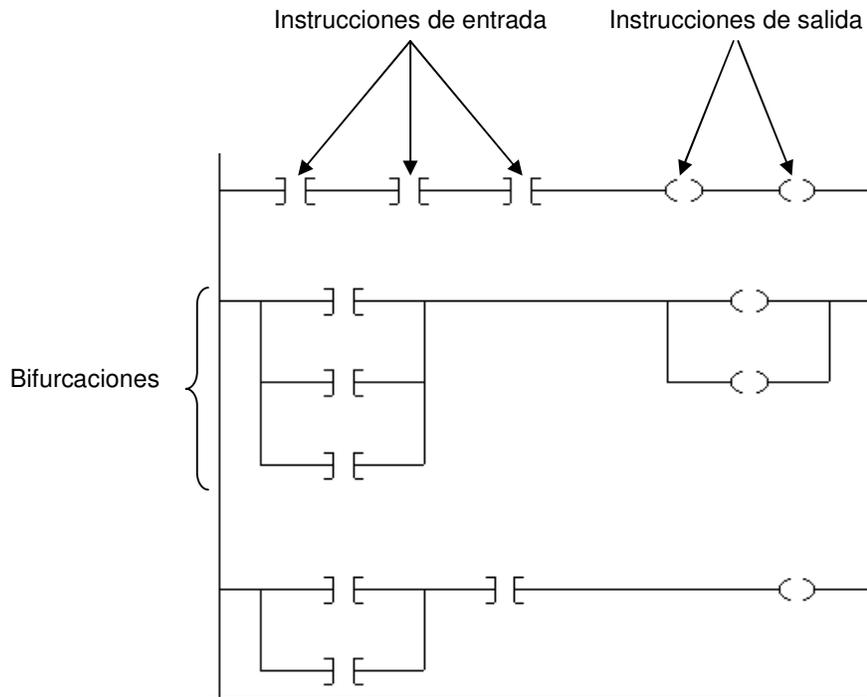


FIGURA 6.6 – LÓGICA DE ESCALERA

### 6.3.3 CONDICIÓN DE RENGLÓN

El controlador evalúa las instrucciones de lógica de escalera según la condición de renglón que precede a la instrucción (condición de entrada del renglón).



FIGURA 6.7 – CONDICIÓN DE RENGLÓN

Sólo las instrucciones de entrada afectan la condición de entrada de renglón de instrucciones subsiguientes en el renglón.

Si la condición de entrada del renglón a una instrucción de entrada es verdadera, el controlador evalúa la instrucción y establece la condición de salida del renglón para que coincida con los resultados de la evaluación.

- Si la instrucción se evalúa como verdadera, la condición de salida del renglón es verdadera.
- Si la instrucción se evalúa como falsa, la condición de salida del renglón es falsa.

Una instrucción de salida no cambia la condición de salida del renglón.

- Si la condición de entrada del renglón a una instrucción de salida es verdadera, la condición de salida del renglón se establece como verdadera.
- Si la condición de entrada del renglón a una instrucción de salida es falsa, la condición de salida del renglón se establece como falsa.

La figura 6.8 muestra una rutina en el PLC, al cumplirse todas las condiciones de la izquierda, una a una las condiciones de la derecha se encienden, lo que indica que algún elemento empezara a trabajar.

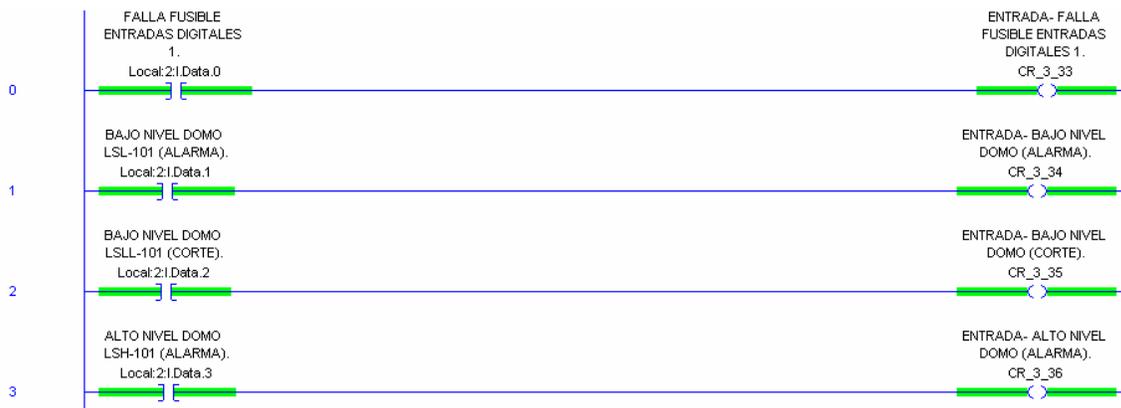


FIGURA 6.6 – RUTINA DE EN EL PLC

En el renglón uno, “BAJO NIVEL DOMO”, nombre de la variable, el cual también se identifica para el programa por medio de un “tag” LSL – 101 (ALARMA), existe una dirección Local 2:I Data 1, que hace referencia a la ubicación donde está variable se alambra en el PLC, es una señal de entrada, alambrada a la tarjeta número 2 y en el orden de las variables será el Dato 1.

Un interruptor en campo, al accionarse, cierra o abre un circuito, el PLC lee esto como “0” o “1”, se identifica un cambio al iluminarse el interruptor en verde, así el programador verifica que la señal en el campo realmente tenga comunicación con el PLC. Un programa de seguridad en el generador tendrá tantos programas, como sistemas internos existan, para este caso, existe un subprograma para el MFT, uno para monitoreo, otro para

- MFT
- Monitoreo
- Purga
- Secuencia de entradas
- Alarmas y disparos

#### 6.3.4 DIAGNÓSTICOS MENSAJES Y ALARMAS

Los sistemas basados en la tecnología de microprocesadores proporcionan mensajes, alarmas y diagnósticos comprensivos. El sistema quemador deberá indicar las causas de lo que sucede pero restringiendo las acciones del operador, también provee la causa del paro del Generador, identifica cualquier falla en un dispositivo final de control, ayuda a identificar fallas en el hardware del sistema y anuncia alarmas antes de que se dispare la caldera, es decir primero nos avisara de una falla baja (alarma) antes de una baja – baja (disparo), o una falla alta (alarma) antes de una alta – alta (disparo).

Los mensajes de diagnóstico al arranque simplifican las operaciones indicando el estado de algún permisivo que no este satisfecho cuando el operador intente iniciar alguna operación deseada. Cuando algún operador inicia una secuencia de apagado del quemador, por ejemplo, la lógica checa que todos los permisivos del quemador están satisfechos. Permisivos o no satisfechos son mostrados.

En las alarmas la causa del disparo de la caldera le dice al operador cual fue la primera entrada recibida por el sistema que dio inicio al paro de la caldera (shut-down). Armados con esta información los técnicos de mantenimiento pueden rápidamente diagnosticar la causa de falla y poner nuevamente en servicio el Generador.

Las alarmas de falla en los elementos finales de control alertan al operador a fallas en válvulas. Todas las válvulas con switches de límite y que están controladas por el sistema de control del quemador son continuamente revisadas para comprobar que su posición corresponda con el estado que este mandando el procesador. Cualquier válvula que no este en la posición mandada por el procesador es alarma al operador.

Las alarmas de falla en el hardware del sistema indican fallas en los módulos de entradas – salidas basados en el chequeo de la integridad de seguridad, fallas del procesador y fallas en el sistema de comunicación.

Los mensajes de alarmas de fallas en los módulos dicen el tipo de modulo que fallo, su localización en el rack y el canal de entrada o salida específica que fallo. Esto ayuda a identificar el mantenimiento y a remplazar los componentes del sistema que fallaron.

Más de 100 alarmas y mensajes de diagnóstico deberán ser programados en un sistema típico de control de quemador. Los mensajes deberán ser específicos y detallados que permitan identificar y remediar los problemas del sistema.

Una de las ventajas de operar los generadores de vapor con estos sistemas (Master Burners) es que ahora están siendo manipulados por el personal de mantenimiento. Ellos no han tenido ni siquiera que hacer uso de los diagramas para aislar los problemas, y el departamento de ingeniería no se ha tenido que involucrar.

Los diagnósticos y alarmas están residentes en el procesador. El operador y el personal de mantenimiento pueden acceder esta información a través de un dispositivo de interfase incluyendo terminales de operador Panel View, o una computadora personal corriendo con un software de monitoreo llamado RSVIEW32.

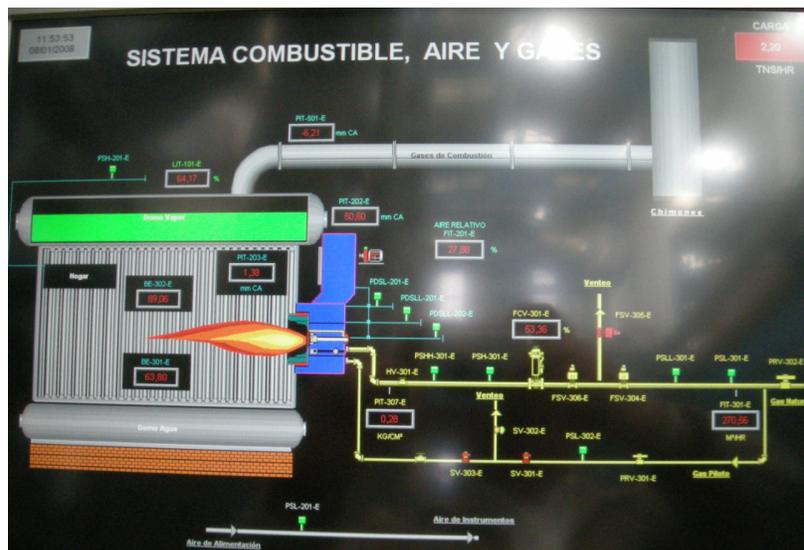


FIGURA 6.7 – MONITOREO DEL PROCESO EN PANEL TACTIL (TOUCHSCREEN)  
(IMAGEN TOMADA DE MONITOR)

La presentación visual o mímica en las consolas puede configurarse incorporando a voluntad del usuario las formas (tuberías, tanques, bombas, etc.) disponibles en la librería gráfica, situando colores diferentes y haciendo que el diagrama visualice los valores medidos en la pantalla, y que el aspecto de proceso sea lo mas real posible, por ejemplo con tanques que se llenan o vacían, con tuberías que cambian de color según el valor de la temperatura. La llamada a la información se agiliza con paneles táctiles (touch screen) que detectan la posición del dedo del operador, al tocar este la pantalla (figura 6.6). De este modo, aparte de las entradas por teclado, el operador, aunque no tenga experiencia, puede pedir al sistema menús de ayuda, diagramas de flujo, presentación de alarmas, entre otras. Sin tener que preocuparse por la sintaxis de los ordenes.

## 7.1 CONTROL POR PLC

### 7.1.1 DEFINICIÓN

El PLC, nombre formado del acrónimo de Programmable Logic Controllers es un instrumento electrónico de panel, dotados de las mismas funciones de los viejos controladores neumáticos. Contiene un microprocesador que permite la incorporación de “inteligencia”, para permitir, entre otras funciones, el ajuste de punto de consigna y de las acciones PID sin extraer el instrumento de su base en el panel, el autoajuste del instrumento (fijación de los valores de las acciones proporcional, integral y derivada) para acomodarse a las variaciones de régimen de carga del proceso, y el autodiagnóstico del aparato.

El controlador digital contiene el procesador o microprocesador (CPU), una memoria principal, comunicados entre sí a través de tres conductores o canales de señales o buses: el bus de datos, el bus de direcciones y el bus de control. El procesador contiene la unidad aritmética y lógica (ALU) que efectúa las operaciones aritméticas básicas de suma y resta, y que dispone de los operadores básicos de comparación AND, OR, NOT, XOR, entre otros.

La unidad de control constituye el verdadero “cerebro” del ordenador y organiza el trabajo de la unidad aritmética y lógica, mediante los pulsos de frecuencia del reloj del microprocesador, que determina el tiempo de ejecución de las tareas confinadas al operador. Además también contiene un oscilador de cuarzo típico que genera hasta 230 millones de pulsos por segundo (230 MHz).

Los PLC's, al estar dotados de microprocesadores, realizan directamente las funciones de control auxiliar expuestas antes en los instrumentos neumáticos y electrónicos, y no precisan de ningún otro instrumento. Este tipo de controladores digitales permiten el ajuste de sus acciones de control ante las perturbaciones periódicas del proceso. Por este motivo pueden trabajar con varios algoritmos de control P + I + D.

### 7.1.2 ARREGLO FISICO DEL PLC Y CONTROL

En el PLC uno o varios microprocesadores controlan las variables que están repartidas por la planta, conectados por un lado a las señales de los transmisores de las variables y, por el otro, a las válvulas de control o elementos finales.

Así, con un PLC análogo, el operador puede cambiar el punto de consigna, modificar los valores de las alarmas, los valores de las acciones de control PID, visualizar el gráfico del lazo de control, cambiar los márgenes de medida de los transmisores y de las alarmas, examinar el control ó visualizar las curvas de tendencia de las variables. Desde el punto de vista de mantenimiento, puede ser avisado por el sistema si se presenta algún fallo en los instrumentos o en el cable de comunicaciones.

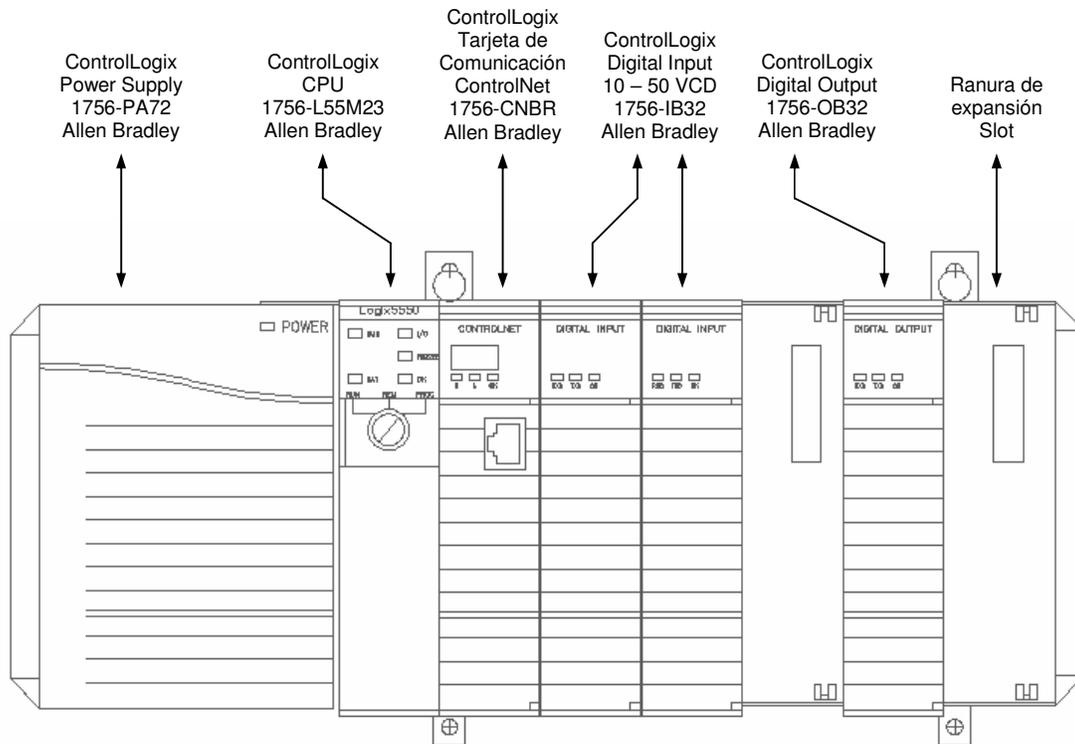


FIGURA 7.1 – ARREGLO FÍSICO DEL P.L.C.

La figura 7.1 muestra un PLC con un arreglo de entradas y salidas digitales, los detalles de los elementos que lo conforman son los siguientes

Controlador de automatización programable	Allen Bradley	1756-L55M23
Módulo de batería externa	Allen Bradley	1756-BATM
Fuente de alimentación	Allen Bradley	1756-PA72
Chasis de 7 ranuras	Allen Bradley	1756-A7
Módulo de comunicación redundante ControlNet	Allen Bradley	1756-CNBR
Modulo de 32 entradas digitales	Allen Bradley	1756-IB32
Modulo de 32 salidas digitales	Allen Bradley	1756-OB32
Conector tipo T para red ControlNet	Allen Bradley	1786-TPR

Sin embargo, físicamente un PLC que opera con señales digitales de uno que trabaja con señales continuas se diferencia solo por el tipo de tarjetas de entradas y salidas con las que cuenta, en cualquier PLC el arreglo de la fuente de poder, el procesador, en donde se almacena una memoria, y la tarjeta de comunicación, que en este caso es controlnet con entrada Ethernet para configuración, se mantiene, solo se debe diferenciar si las señales con las que operara serán analógicas o digitales.

Para el caso de un PLC con manejo de señales continuas, analógicas los elementos serán los siguientes

Controlador de automatización programable	Allen Bradley	1756-L55M13
Módulo de batería externa	Allen Bradley	1756-BATM
Fuente de alimentación	Allen Bradley	1756-PA72
Chasis de 7 ranuras	Allen Bradley	1756-A7
Módulo de comunicación redundante ControlNet	Allen Bradley	1756-CNBR
Modulo de 16 entradas análogas 4 – 20 [mA]	Allen Bradley	1756-IF16
Modulo de 16 salidas análogas 4 – 20 [mA]	Allen Bradley	1756-TBNH
Conector tipo T para red ControlNet	Allen Bradley	1786-TPR

Solo los módulos de entradas y salidas, tarjetas de conexión, son los que varían de un PLC a otro, es decir según el servicio para el que esté planeado.

Existen varias marcas de PLC, Siemens, Festo, Emerson, Mitsubishi Electric, Allen Bradley, sin embargo, las variaciones que existe de un PLC a otro serán en las opciones de configuración a nivel software, la velocidad de respuesta, la capacidad de memoria, el número de entradas y salidas que manejen. Mientras que el arreglo físico será similar a todas las marcas, es decir en todas encontraremos fuente de alimentación, tarjetas de entradas y salidas, un procesador y la tarjeta de la comunicación que utilicen.

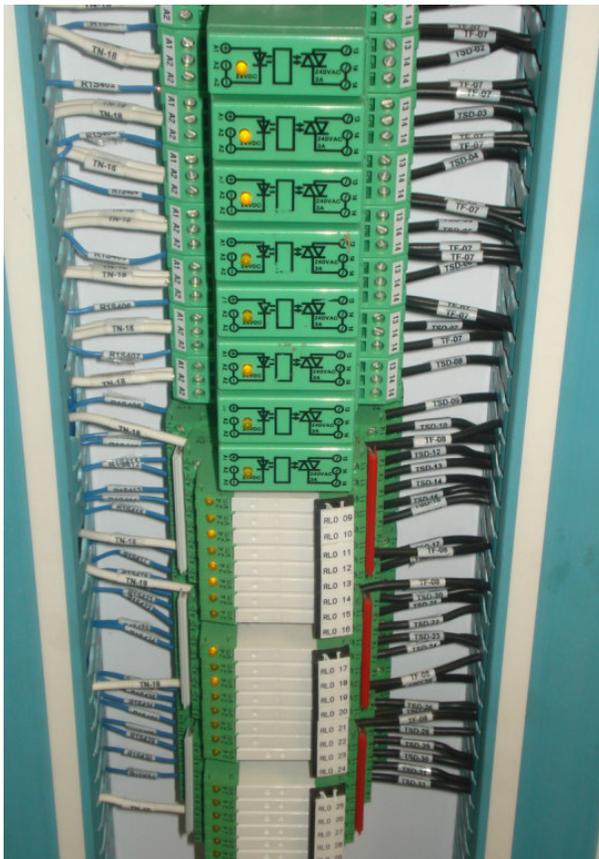


FIGURA 7. 2 – PARTE INETRNA DEL TABLERO DE CONTROL

La implementación de una estrategia de control de combustión en un PLC no representa un manejo intensivo de Entradas – Salidas. Para esto se requieren 2 tarjetas de entradas analógicas (asumiendo al menos 8 entradas de 4 – 20 [mA] por tarjeta) y una tarjeta de salidas analógicas (asumiendo al menos 8 salidas de 4 – 20 [mA] por tarjeta).

Estas 3 tarjetas pueden manejar las entradas – salidas asociadas directamente con los lazos de control de combustión y nivel de domo y deja previsto un 40% de la capacidad para manejar los lazos auxiliares del generador y los lazos relacionados con el balance de la planta. Con la simple adición de un modulo de entradas y salidas, pueden ser adicionados los dispositivos de potencia al sistema de control de combustión.

Las entradas y salidas con las que opera el PLC, ya sean desde interruptores, hasta transmisores o elementos finales de control como posicionadores o transductores electroneumáticos no son cableados desde campo directamente a las tarjetas de entradas y salidas en el PLC por varias razones:

- Orden en el cableado, identificación de los elementos en cada entrada del PLC,
- Seguridad para el PLC, se trabaja con fusibles que cortan el circuito en caso de un sobrevoltaje, así el procesador no sufrirá alguna falla por elemento externo,
- Por seguridad varios elementos incluyen en el circuito de cableado diodos u optoacopladores como medidas de respaldo para el PLC, ya que una falla por corto circuito dañaría el procesador.

Así, estas conexiones se agrupan ordenadamente en un tablero, el cual agrupa circuitos de soporte de alimentación al tablero, fuentes y baterías para el funcionamiento continuo del PLC (existe la redundancia por alimentación), la parte de control del sistema, bornes de conexiones agrupados por servicio. Toda esta conexión es puesta a tierra para seguridad.

El tablero cuenta con clemas que no son más que piezas de plástico con “almas” de metal conductor que permitan tener facilidad en las conexiones y realizar de forma rápida y segura los empalmes eléctricos. En la cema se introduce el cable conector y este se sujeta con un tornillo.

Dentro del tablero (Figura 7.2) de conexión existen básicamente 4 grupos de clemas, estas son entradas digitales, salidas digitales, entradas análogas y salidas análogas.

Así, para cualquiera de estos 4 casos, existirán en cada grupo tantas clemas como numero de instrumentos haya en campo, ya sean análogos, digitales, entradas o salidas. Para la cema de la figura 7.3, cuyo modelo en el mercado es DOK 1,5-2D marca Phoenix Contac sus puntos de conexión eléctricos son los siguientes (Figura 7.4)



FIGURA 7. 3 – CLEMAS, ELEMENTO DE CONEXIÓN

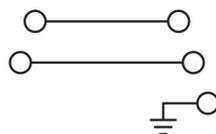


FIGURA 7.4 – BORNES DE CONEXIÓN ELÉCTRICOS EN CLEMA

El trabajo con programas en PLC's sustituye a los relevadores convencionales utilizados en la industria. En lugar de disponer de pulsadores y relevadores para los circuitos de enclavamiento y para el accionamiento de los motores de la planta con el correspondiente panel o cuadro de mando y con los consiguientes cables de conexión, voluminosos y caros, el controlador programable aporta la solución versátil práctica y elegante del software con un lenguaje especial, basado en la lógica de relevadores.

El controlador lógico programable dispone de símbolos que representan la lógica de los contactos: NA (normalmente abierto), NC (normalmente cerrado), temporización ON u OFF, contador, constante, etc. De este modo, pueden desarrollarse programas que representen cualquier circuito de enclavamiento, y comprobarlos con un simulador de contactos, antes de acoplar el controlador programable de la planta.

### 7.1.3 FUNCIONAMIENTO DEL PLC

El procesador lleva a cabo todos los cálculos que realizaban individualmente los controladores P, P + I, P + I + D generando directamente las señales que van a las válvulas. Este tipo de control se denomina "Control digital directo o DDC (direct digital control)" y realiza las siguientes funciones:

- Explora las variables de entrada analógicas o digitales;
- Las compara con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el algoritmo de control correspondiente;
- Envía las señales de salida a las válvulas de control del proceso;
- Se disponen instrumentos analógicos en paralelo con el computador en los puntos críticos y actúan como reserva en caso de fallo.

En este control, el procesador está enlazado con la planta en las partes que muestra la figura 7.4, las señales procedentes de los transmisores de campo se reúnen en una terminal y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento donde son convertidas a señales digitales, para ser usadas en los cálculos posteriores de control.

Estas señales de entrada pueden tener varios orígenes:

- Señales de tensión procedentes de:
  - Termopares, que se caracterizan por una f.e.m pequeña que les hace sensibles al ruido eléctrico, no mantiene una linealidad entre la f.e.m. y la temperatura y necesitan una compensación de la unión fría.
  - Reóstatos
  - Tacómetros
  - pH y conductividad
- Señales de corriente procedentes de transmisores
- Variaciones de resistencia de sondas que se caracterizan por una relación no lineal con relación a la temperatura

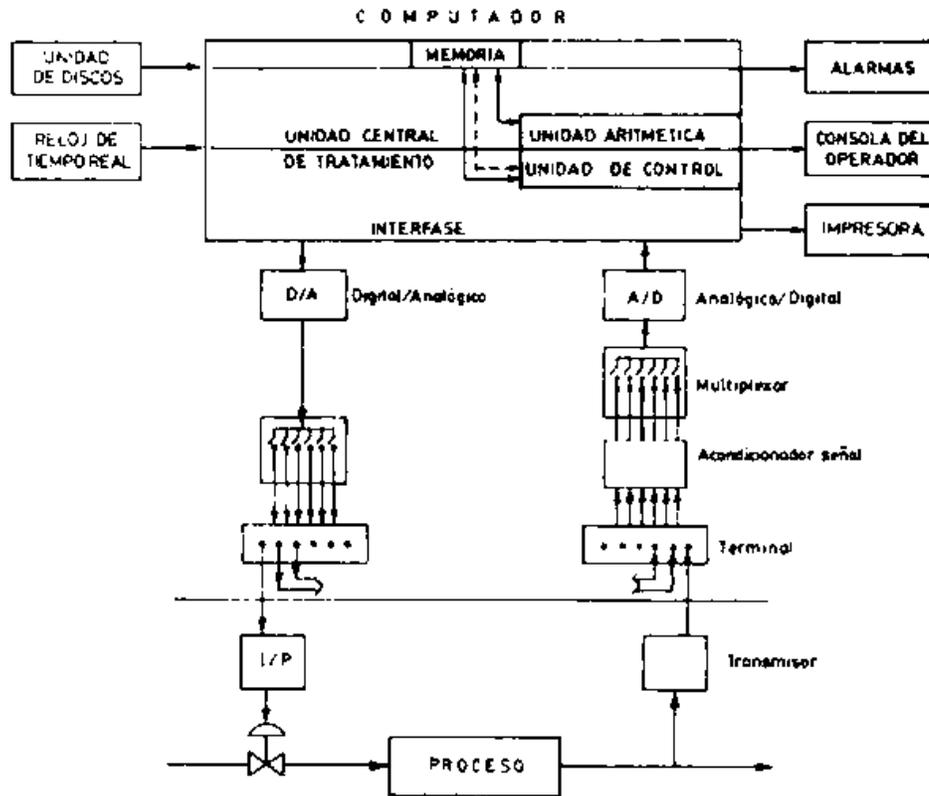


FIGURA 7.4 - COMPONENTES DEL SISTEMA DDC

A continuación un multiplexor trabajara para que de forma aleatoria o secuencial pasen al procesador. El procesador permite comprobar cada señal de entrada y compararla entre límites prefijados para detectar si sale fuera de estas magnitudes y determinar así, a través de la lógica programada, las causas de la desviación iniciando una alarma o bien imprimiendo instrucciones para la operación de la planta.

Las señales con las que opera el PLC son señales digitales que consisten en una serie de impulsos n forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Por ejemplo dentro de la señal electrónica de 4 – 20 [mA c.c.] los valores binarios de 4, 12 y 20 [mA] son respectivamente 00000000, 01111111 y 11111111. Si la señal digital que maneja el microprocesador es de 8 bits, entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente.

#### 7.1.4 MONITOREO DEL CONTROL

La estación del operador proporciona (figura 7.5) la comunicación con todas las señales de la planta para el operador de proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de los se realiza mediante programas de operación. De este modo:

- El operador de procesos ve en la pantalla (o pantallas) un gráfico o gráficos del proceso que le interesa y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, las curvas de tendencia, las estaciones controladoras, en general variable a medida.
- El ingeniero de proceso puede editar programas del proceso, construir las representaciones en la pantalla de partes del proceso, etc.
- El técnico de mantenimiento puede fundamentalmente diagnosticar y resolver problemas en los elementos de control distribuido de la planta.



FIGURA 7.5 – ESTACIÓN DEL OPERADOR

El PLC permite implementar los programas de aplicación de los usuarios, destinados a obtener información determinada de la planta que se refleja en una pantalla (solo para información) o en un touchscreen (para información y control) de esta forma la información se puede procesar y analizar más adelante.



FIGURA 7.6 – ALARMAS

Las alarmas son importantes en el control de procesos (figura 7.6). Existen alarmas de alto valor de la variable, alarmas de desviación entre el punto de consigna y bajo valor de la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada o de salida, etc. Conviene evitar la instalación de un número excesivo de alarmas ya que el operador se ve obligado a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente y, además, le predisponen a no prestarles atención, Los casos en que la alarma actúa durante varias veces en el día son causa de un diseño o una condición de proceso que hay que corregir.

## 7.2 DISPOSITIVOS DE COMUNICACIÓN

### 7.2.1 CONTROLNET

Red de control basada en CIP que proporciona transmisión de alta velocidad de datos de E/S en tiempo real con tiempos críticos y envío de mensajes, incluida la carga y descarga de datos de programación y configuración, y el envío de mensajes entre dispositivos similares a través de un solo vínculo físico. Al ser determinista y repetible, las capacidades de transmisión de datos y control de alta velocidad de ControlNet mejoran en gran medida el rendimiento de las E/S y las comunicaciones entre dispositivos similares.

ControlNet se basa en una solución innovadora en tecnología de red abierta: Proveedor /Consumidor. Diferente de sus precursores, el modelo de Producer/Consumer permite que todos los nodos en la red tengan acceso simultáneamente a los mismos datos de una sola fuente. En última instancia, este modelo proporciona:

- Mayor funcionamiento del sistema para una productividad más alta.
- Eficacia creciente porque los datos necesitan ser producidos solamente una vez, sin importar el número de consumidores.
- Precisa la sincronización porque los datos llegan a cada nodo el mismo tiempo.

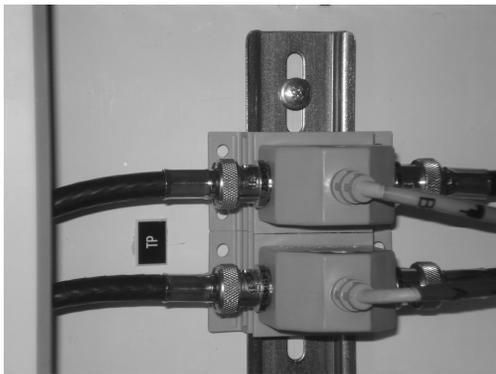


FIGURA 7.7 – CONECTORES CONTROLNET

ControlNet esta formada por: Nodos, líneas de transmisión, conectores de red (Figura 7.7), software de red y software SCADA.

ControlNet permite que los reguladores múltiples controlen I/O (input/output) en el mismo lazo de transmisión. Esto proporciona ventaja significativa sobre otras redes, que permiten solamente un regulador principal en el alambre. ControlNet también permite el multicast de entradas y de datos de peer-to-peer (ver Anexo 7), así reduciendo tráfico en el alambre y aumentando funcionamiento del sistema.

#### CARACTERÍSTICAS

La red de ControlNet utiliza el protocolo industrial común probado (CIP) para combinar la funcionalidad de una red de I/O y de una red peer-to-peer que proporcionan el alto funcionamiento de la velocidad para ambas funciones. Programando, se conecta de procesador a procesador, y al control de I/O en el mismo acoplamiento sin la afectación del tiempo crítico de I/O.

- Anchura de banda para I/O, conexión en tiempo real, peer-to-peer para mensajería y programación en el mismo acoplamiento.
- Determinista, funcionamiento repetible para aplicación de procesos.
- Reguladores múltiples que controlan I/O en el mismo acoplamiento.
- Multicast de entradas y de datos de peer-to-peer.
- Redundancia de los medios y opciones intrínsecas seguras.
- Instalación simple que no requiere ninguna herramienta especial instalar la red.
- Acceso a la red de cualquier nodo.
- Flexibilidad en opciones de topología (árbol, star, bus) y tipos de conectores (coaxial fibra u otro).

#### OPERACIÓN

El acceso de red es controlado por un algoritmo de time-slice llamado: Múltiple acceso en el dominio del tiempo (CTDMA), que regula la oportunidad de un nodo de transmitir en cada intervalo de la red. La información que esta en tiempo crítico es enviada durante la programación de el NUT. Información que se puede entregar sin contradicciones del tiempo (por ejemplo datos de la configuración) se envía durante la pieza no programada de el NUT.

#### APLICACIONES

ControlNet resuelve las demandas de usos en tiempo real, de alta velocidad en la capa de la automatización y del control para la integración de los sistemas de control complejos tales como sistemas de impulsión coordinados, del control de la autógena, del control del movimiento, de sistemas de la visión, de sistemas de control complejos de hornada, de sistemas de control de proceso con requisitos grandes de los datos, y de sistemas con los reguladores múltiples y los interfaces human-machine. ControlNet es ideal para los sistemas con la comunicación múltiple PC-basada en controladores, del PLC a PLC y PLC y de PLC a DCS.

#### 7.2.2 ETHERNET

Los medios físicos de Ethernet – el cable y los conectores utilizados por los PC's en las oficinas, impresoras y demás dispositivos periféricos – trabajan con una gama de protocolos de comunicación tales como IP (Protocolo Internet), TCP (Protocolo de Control de Transmisión) y muchos otros protocolos de envío de información por red. Estos tipos de protocolos van muy bien en el ambiente de oficina. Permiten que los usuarios compartan archivos, accedan a impresoras, envíen e-mails, naveguen por Internet y realicen todo tipo de comunicación normal en un ambiente de oficina. Sin embargo, las necesidades a pie de fábrica, en la planta, son mucho más exigentes y demandan la adecuación de algunos requerimientos especiales. A pie de fábrica, los controladores tienen que acceder a datos en los mismos sistemas operativos, estaciones de trabajo y dispositivos I/O (Input/Output). En una situación normal, los softwares dejan al usuario esperando mientras realizan su tarea. Pero en planta todo es distinto. Aquí el tiempo es crucial y ello requiere una

comunicación en tiempo real. Para la apertura de una válvula o sensor una señal, en este tipo de aplicaciones se requiere un ajuste de tiempo sumamente preciso, comparativamente a lo que se exige para acceder a un archivo en un servidor remoto o sencillamente hojear un sitio Web por Internet.

Ethernet/IP es un protocolo de red en niveles, apropiado al ambiente industrial. Es el producto acabado de cuatro organizaciones que aunaron esfuerzos en su desarrollo y divulgación para aplicaciones de automatización industrial: La Open DeviceNet Vendor Association (ODVA), la Industrial Open Ethernet Association (IOANA), la Control Net International (CI) y la Industrial Ethernet Association (IEA). Ese cometido común demuestra hasta qué punto Ethernet/IP puede significar todo un estándar tallado a la perfección para un vasto número de dispositivos de automatización. Estas mismas organizaciones se están esforzando para atender a las demandas de conectividad física que el ambiente severo de la planta exige.

Ethernet/IP es un protocolo de red en niveles para aplicaciones de automatización industrial. Basado en los protocolos estándar TCP/IP, utiliza los ya bastante conocidos hardware y software Ethernet para establecer un nivel de protocolo para configurar, acceder y controlar dispositivos de automatización industrial. Ethernet/IP clasifica los nodos de acuerdo a los tipos de dispositivos preestablecidos, con sus actuaciones específicas. El protocolo de red Ethernet/IP está basado en el Protocolo de Control e Información (Control and Information Protocol - CIP) utilizado en DeviceNet y ControlNet. Basados en esos protocolos, Ethernet/IP ofrece un sistema integrado completo, enterizo, desde la planta industrial hasta la red central de la empresa.

### 7.3 ARQUITECTURA DE CONTROL

El Control de Combustión mantiene constante la presión del cabezal de vapor por medio de la sintonización de los parámetros de las acciones de control proporcional, integral y derivativo. Un generador de vapor que quema gas tiene entre otros lazos de control el maestro de combustión, flujo de gas, flujo de aire y nivel del domo.

La estrategia del control de combustión en el PLC requiere que el procesador controle de forma coordinada el combustible, aire y la válvula de alimentación de agua. Al incrementar la carga del generador, la válvula de combustible, las persianas de aire y la válvula de agua deberán abrir en coordinación. Puesto que el sistema del PLC emplea un solo procesador para implementar la estrategia de control de combustión, la coordinación de lado fuego y lado agua del generador es simplificado. Las Entradas – Salidas para implementar el control de prealimentación (FeedForward) y límites cruzados esta totalmente disponible sin la necesidad de realizar comunicaciones en red entre una serie de controladores de lazo simple (auto contenidos).

## 7.4 CONTROL DE COMBUSTIÓN EN EL PLC

### 7.4.1 PID

El control de lazo cerrado PID mantiene una variable del proceso en un punto de ajuste deseado. La figura 7.9 muestra un ejemplo de régimen de flujo/nivel de fluido:

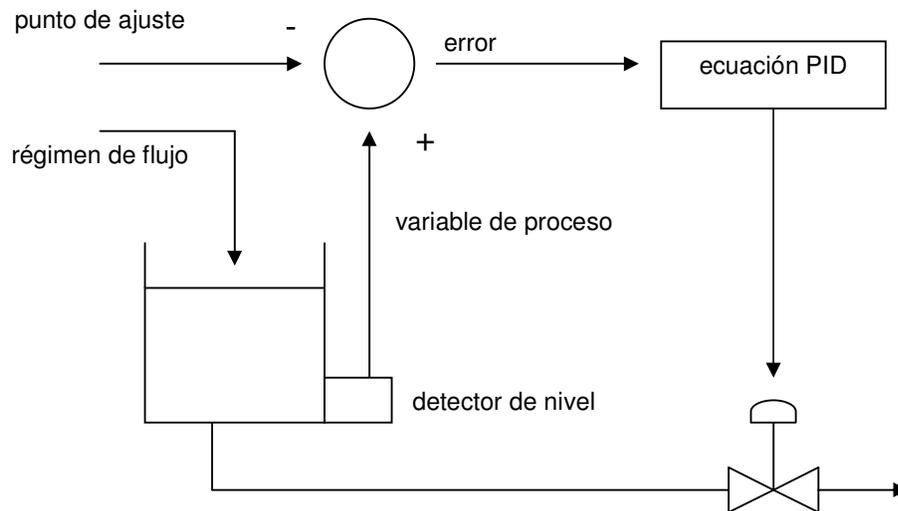


FIGURA 7.9 – PID EN FLUJO

En el ejemplo anterior, el nivel del tanque se compara con el punto de ajuste. Si el nivel es más alto que el punto de ajuste, la ecuación PID aumenta la variable de control y hace que se abra la válvula de salida del tanque, disminuyendo de esta manera el nivel del tanque.

La ecuación PID usada en la instrucción PID es una ecuación de formato de posición, con la opción de usar ganancias independientes o ganancias dependientes. Cuando se usan ganancias independientes, las ganancias proporcional, integral y derivada sólo afectan sus términos específicos proporcional, integral o derivado respectivamente. Cuando se usan ganancias dependientes, la ganancia proporcional es reemplazada con una ganancia de controlador, la cual afecta los tres términos. Se puede usar cualquier formato de ecuación para realizar el mismo tipo de control. Se proporcionan dos tipos de ecuación para que usted pueda usar el tipo de ecuación con el cual está más familiarizado.

El PLC dispone de varios algoritmos de control, de los cuales el más típico es el PID cuya fórmula clásica es:

$$\Delta P = K_p \Delta E + K_i \tau E + K_d \frac{\Delta^2 E}{\tau}$$

- $\Delta P$  = Valor incremental de salida
- $\tau$  = Intervalo de muestreo
- $E$  = Error de la muestra
- $\Delta E$  = Variación del error durante el intervalo de muestreo
- $\Delta^2 E$  = Grado de variación del error durante el intervalo de muestreo
- $K_p$  = Factor de control proporcional
- $K_i$  = Factor de control integral
- $K_d$  = Factor de control derivativo

#### 7.4.2 SISTEMA DE CONTROL DE COMBUSTIÓN

Los ingenieros que programan un sistema de control de combustión basado en PLC's determinan que tan amigable y mantenible será el sistema. Actualmente los PLC's tienen las herramientas necesarias para implementar los controles de procesos efectivos, pero el ingeniero debe asegurarse de que las estrategias sean implementadas adecuadamente y así tomar ventaja de todas las características inherentes del producto.

La meta de utilizar un sistema como este es dar acceso a todos los parámetros sintonizables del sistema, a través de la pantalla del operador protegiéndolos previamente por un password. Una vez que el sistema es instalado el cliente no puede cambiar la estrategia de control drásticamente.

La "estrategia de límites cruzados", estrategia ya medida, permanecerá así por toda la vida de ese Generador, lo que cambiara serán las constantes del PID, los límites de las alarmas, las constantes de variación de rampa y curvas de datos del generador. Todos estos datos deberán ser fácilmente accesibles para el ingeniero desde la terminal del operador.

Analizando el sistema de límites cruzados encontramos un selector de alta recibe la señal de demanda de combustible y la señal de flujo de combustible real, este enviará el valor más alto de los dos a la compuerta de aire y lo tomará como el punto de ajuste para el flujo de aire requerido. Por otra parte un selector de baja compara las señales de demanda y flujo de aire que puede quemarse con combustible disponible y envían la más baja de las dos a la válvula de combustible.

El PLC cuando se configura para sistemas análogos, para sistemas de control, es llamado PAC, acrónimo de Programmable Automation Controllers, debido a que el alcance para estos instrumentos

7.4.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 7.11

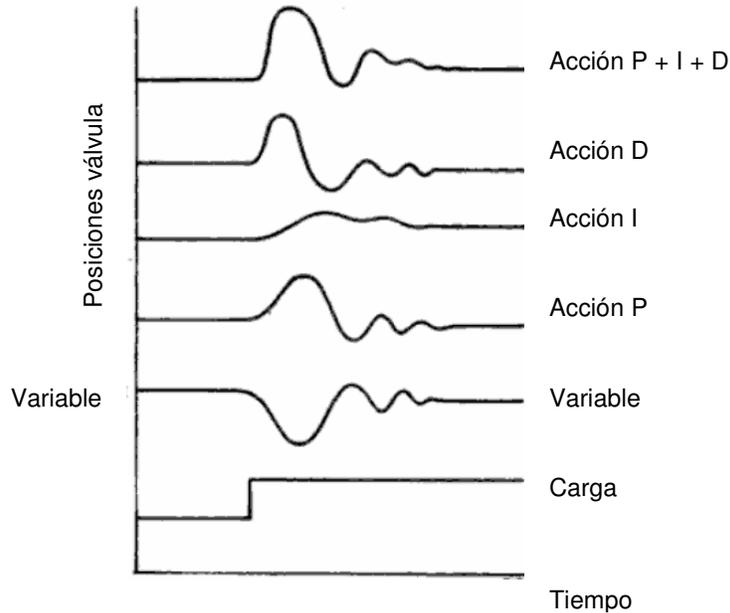


FIGURA 7.11 – ACCIONES PID

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe de incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente existe poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser mas barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso.

Actualmente, los instrumentos modulares admiten fácilmente la adición de una o mas acciones. Los controladores digitales incorporan las tres

acciones, de modo que la elección de las mismas es una razón técnica, para que el proceso este bien controlado, y no económica.

#### 7.4.4 MÉTODOS DE AJUSTE DE CONTROLADORES

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivativa (minutos de anticipo) del controlador, caso que posea las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control (proceso + transmisor + válvula de control). Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios mencionados para que el control se a estable, en particular el área mínima con una relación de amortiguación de 0.25 entre crestas sucesivas de la onda.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental.

El método analítico se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales y al control distribuido, que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real. Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de tres formas principales.

1. Método de tanteo (lazo cerrado)
2. Método de ganancia límite (lazo cerrado)
3. Método de curva de reacción (lazo abierto)

#### MÉTODO DE TANTEO

Este método requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal, el procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas medias, el 25% de esta arriba y abajo del set point, en todas las acciones, y estrecharlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Es necesario que pase un tiempo suficiente después de cada desplazamiento del punto de consigna, para observar el efecto total del último ajuste obteniendo algunos ciclos de la respuesta ante la perturbación creada. En procesos muy lentos ello puede requerir hasta 2 o 3 horas, para este generador bastara con 5 minutos para observar.

Para ajustar los controladores proporcionales, se empieza con una banda proporcional ancha y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Hay que hacer notar que al estrechar la banda proporcional, aumenta la inestabilidad y que al ampliarla se incrementa el error del offset.

Al ajustar los controladores P + I + D, se procede primero con la banda derivada e integral a 0, o al mínimo, se estrecha la banda proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0.25.

Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivativa. Después de estos ajustes puede estrecharse normalmente la banda proporcional con mejores resultados en el control.

Hay que señalar que una acción derivada óptima después de una perturbación lleva la variable a la estabilización en muy pocos ciclos.

En otra forma de ajuste, para obtener una óptima banda derivada se trabaja primero con una banda proporcional que da lugar a una ligera oscilación (varios ciclos) ante una perturbación con la acción integral reducida al mínimo. Se aumenta la acción derivativa hasta eliminar el ciclo de la proporcional. Se estrecha de nuevo la acción proporcional hasta que los ciclos se inician y se aumenta todavía mas la banda derivada hasta eliminarlos, continuando con estos pasos hasta que el aumento de la acción derivada no mejore la eliminación de los ciclos producidos. Finalmente se ajusta la acción integral en la forma descrita anteriormente para eliminar el offset.

Si los ajustes efectuados son excesivos, pueden obtenerse las oscilaciones:

- Oscilación proporcional, la cual se caracteriza por tener un periodo relativamente moderado.
- Oscilación integral, que tiene un periodo relativamente largo.
- Oscilación derivada que presenta un periodo muy largo y la variable tarda bastante tiempo en estabilizarse.

Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar normalmente un primer ajuste de los controladores, es decir, la fijación de los valores de las acciones PID. Dado que en la puesta en marcha el tiempo es limitado, los instrumentistas, según su experiencia, prefijan dichos valores, y más adelante los ajustan definitivamente. El siguiente cuadro muestra una guía de aplicación de valores iniciales.

Valores de las acciones de control

	% Banda proporcional (ganancia)	Tiempo integral (min/rep)	Tiempo derivativo (minutos)
Presión	25 (4)	0.8	
Caudal	80 – 250 (1.25 – 0.4)	0.5 – 15	
Nivel	50 – 100 (2 – 1)		
Temperatura	20 – 50 (5 – 2)	0.5 – 15	0.5 – 3

## 7.5 CARACTERIZACIÓN DEL GENERADOR

El método de caracterización sea quizá el más importante para el control de la caldera. Sin este procedimiento sería difícil tener una operación segura del manejo de la combustión, es decir, gracias a la caracterización, la cual se apoya en el control de límites cruzados, se asegura que cuando el generador trabaje en modo automático todo el tiempo habrá mas aire que combustible lo que garantiza una mezcla pobre en gas, de esta forma se evita, en el mejor escenario, altas emisiones a la atmósfera y en el peor escenario una posible explosión.

### 7.5.1 DEFINICIÓN

Este método consiste en igualar dos señales de control, estas dos señales son las que recibirán los elementos finales de control, uno de ellos es el servomotor de tiro forzado (elemento que controla el aire), el otro elemento es la válvula de control de flujo gas (suministro de combustible). Estas dos señales deben ser iguales tanto en su funcionamiento en modo manual como automático.

### 7.5.2 PROCEDIMIENTO

Antes de iniciar con el procedimiento existen condiciones de operación que deben de ser revisadas para un funcionamiento seguro del generador, estas condiciones son las siguientes:

- Abrir válvula general de gas y verificar la presión correcta de gas regulado (para este caso 18 [PSI]).

- Llenar de agua todo el generador a nivel medio del domo superior.
- Verificar voltajes de 440 [V] y 110 [V].
- Verificar rotación correcta del ventilador de tiro forzado (Especificado por el fabricante).
- Verificar las RPM del motor ventilador de tiro forzado conforme a datos de placa del motor.
- Verificar rotación correcta de la bomba de alimentación de agua (recomendación del fabricante) así como las RMP.
- Verificar la presión correcta de aire comprimido (alimentación a instrumentos), esta oscila entre 4.5 [Kg/cm<sup>2</sup>] donde arranca y 7 [Kg/cm<sup>2</sup>] donde para.
- Verificar presión correcta, entrada de agua a bomba alimentación y presión de salida de bomba alimentación.

Después de cumplir con estas condiciones es seguro arrancar el generador. Cuando se arranca un generador, ya sea que estuvo parado por mantenimiento general o por ser la primera vez que opera, el generador tendrá que trabajar desde fuego mínimo a fuego máximo. El proceso de caracterización consistirá en el análisis de al menos 6 “puntos” (recomendación del fabricante del generador para una correcta operación), en donde además de observar el límite mínimo y máximo también se analizan 4 condiciones mas, condiciones intermedias.

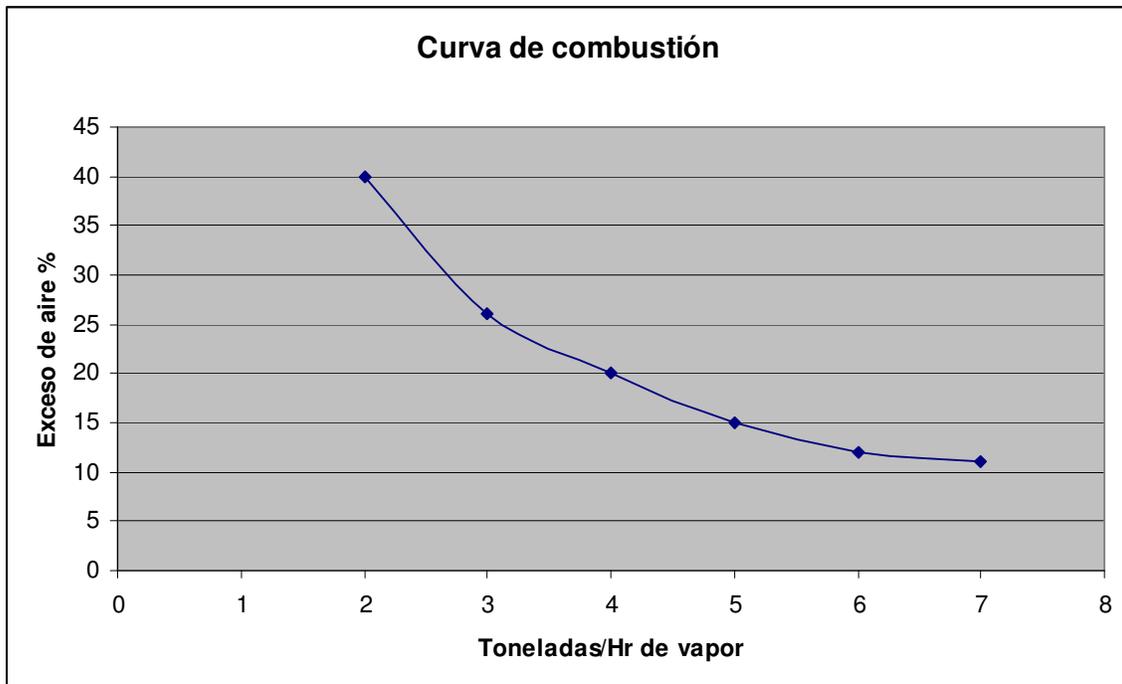


FIGURA 7.12 – CURVA DE COMBUSTIÓN

Cada generador tendrá una curva de combustión (Figura 7.12) dada por el fabricante y reafirmada por la experiencia del instrumentista, esta curva

indica el exceso de aire con respecto a la capacidad del generador. El objetivo de la caracterización es “dibujar” esta curva, es reproducir lo más cerca posible el comportamiento de esa gráfica. Al obtener los valores que en ella se nos marca el generador trabajara correctamente. El generador de vapor de este análisis es de marca Babcock and Wilcox, genera 6 [Ton/hr] a una presión de 30 [Kg/cm<sup>2</sup>]

Al encender el generador asignamos una apertura mecánica en la válvula de gas para fuego mínimo (apertura de entre 10% y 20%), a esta apertura le corresponderá una señal de control de 0%. También asignamos una apertura mecánica para el flujo de aire y a la que también le corresponderá una señal de control de 0%.

El fuego mínimo es el punto de operación en que el generador trabaja con las condiciones necesarias para respetar el exceso de aire recomendado por el fabricante y vigilado por ecología (entre 30 y 40% de exceso de aire) mientras que el fuego máximo es un punto de operación en el que el generador trabaja a su mayor capacidad y se requiere un exceso de aire de entre 10 y 12%. Al saber la capacidad de producción de vapor del generador (para este generador 6 [Ton/hr] a 30 [Kg/cm<sup>2</sup>] con un exceso de aire mínimo de entre 10 y 12%) conocemos las condiciones necesarias para generar el fuego máximo.

Con las aperturas mínimas para la válvula de control de gas y las persianas de suministro de aire se generan los siguientes parámetros:

- Exceso de aire en % de 30% a 40%
- Oxígeno en % de 5.5 a 6.5
- NOx en P.P.M. lo indicado por ecología debajo de 110 P.P.M.
- CO en P.P.M. lo indicado por ecología, de 0 a 50 P.P.M.
- En caso de este generador, la producción solicitada por las plantas es de 2 [Ton/Hr]

## 7.6 SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La función del sistema de control de combustión es regular el combustible y el flujo de aire que entra al hogar y mantener la relación aire/combustible dentro de los límites requeridos para una combustión continua y una flama estable en todo el rango de operación de la caldera de acuerdo con la demanda. Al fijar los controles, uno debe ajustar y fijar el sistema de control de combustión para una operación estable en el rango de trabajo. Este proceso incluye la sintonización y ajustes del control de combustión limitando el O<sub>2</sub> permisible para cada punto de carga y entonces verificar la correcta operación y respuesta del quemador/caldera dentro de esta banda bajo condiciones de carga variables de un mínimo a un máximo de carga.

- Esta sintonización y procedimientos de prueba para ajustar los controladores y verificar la operación satisfactoria quemador/caldera en el rango de carga.
- Este procedimiento es aplicable específicamente para un sistema de control de combustión por límites cruzados. Pruebas similares deben realizarse con otros esquemas de control de combustión para verificar la conveniencia del control. Las pruebas son para confirmar la operación aceptable en el rango cuando funciona con variaciones normales en la temperatura del aire de combustión.
- La sintonización base para el sistema de control es el establecimiento de los datos de combustión (caracterización), el número de datos varía entre 7 y 10 “puntos” de operación de baja a alta carga. Durante el proceso de sintonización, la relación permisible aire/combustible es determinada y los controladores son ajustados para mantener una operación satisfactoria.
- La velocidad de respuesta del sistema de control debe tomar en consideración las capacidades dinámicas de respuestas de los controladores del aire y combustible además de sus habilidades para mantener la relación aire/combustible dentro de los límites prescrito bajo condiciones de carga variables. En situaciones donde la demanda de vapor y el control de combustión están en desventaja, los requerimientos del control de combustión deben tomar precedencia.

#### Procedimiento

Una secuencia sugerida para lograr esta tarea es la siguiente:

1. Coloque todos los controles de combustión (los lazos de control aire y combustible) en manual. Entonces ajuste manualmente el flujo de aire y combustible en cada uno de los puntos de la carga de la caldera en cuestión.
2. A cada carga dada, incremente manualmente el nivel de exceso de aire para determinar el aire práctico a la relación de combustible. Esto servirá como un límite superior del límite para las curvas aire/combustible del control de combustión.
3. A cada carga dada, reduzca manualmente el nivel de exceso de aire para determinar el aire más bajo práctico para la relación de combustible (mientras no se produzca una condición) este servirá como el límite inferior del límite para las curvas combustible/aire de control de combustión.
4. Repita los pasos 2 y 3 tanto como sea necesario para varias cargas.
5. Verifique los puntos de ajuste combustible y aire en el control de combustión para igualar lo dicho anteriormente durante las pruebas manuales.
6. Cambie el control de combustión aire/combustible a automático. Asegúrese de que el control mantendrá automáticamente los puntos de ajuste aire/combustible para todos los puntos y en condiciones estables.

7. Varié manualmente la señal del control maestro de la caldera para determinar como el aire y el combustible siguen los cambios de demanda. El nivel del exceso de aire debe permanecer dentro de los límites inferior y superior determinados anteriormente. Si el nivel exceso de sirve excede uno o ambos de estos limites, el control de combustión tendrá que ser ajustado.
8. Repetir el paso No. 7 con oscilaciones cada vez mas largas de la señal de control hasta que la unidad este simulando una demanda de vapor realista en la planta.
9. Regrese el maestro de la caldera a control automático , observe las oscilaciones

## 8.1 CONSIDERACIONES AMBIENTALES ECOLÓGICAS

Las calderas y hornos industriales son fuentes fijas e importantes de emisión de contaminantes a partir de los combustibles de mayor consumo en nuestro país como el gas natural, combustóleo, gas oil, bagazo de caña, diesel, carbón, etc.

El impacto que cualquier planta de calderas impone al ambiente debe mitigarse manteniéndolo al nivel más bajo posible. Si esto puede lograrse con una razonable relación de costo y resultados obtenidos, ésta debería ser una línea de referencia aún para quienes tienen la responsabilidad de elaborar y promover el uso de reglamentos.

Las emisiones de una planta que afectan directamente el ambiente son las siguientes:

- Productos de combustión
- Calor de desperdicio
- Ruido

### 8.1.1 PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.

Los productos en la descarga de chimeneas incluyen los siguientes componentes:  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $C_nH_n$  (hidrocarburos no quemados, HNQ),  $SO_2$ ,  $SO_3$ , partículas (polvo, cenizas volantes, metales pesados, etc.).

Los tres primeros componentes no son realmente dañinos, los demás sí tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Su concentración en los gases de escape depende de la composición del combustible que se quema y del tipo de instalación que se analiza, sin embargo una alta eficiencia de operación siempre opera positivamente ya que la proporción de emisiones por unidad de vapor o unidad de energía eléctrica producida se reduce.

Los gases de escape de todos los sistemas de combustión contienen una variedad de subproductos algunos de los cuales están considerados como contaminantes ambientales.

Algunos de estos contaminantes tienen efecto tóxico inmediato mientras otros representan riesgos a la salud por su habilidad de reaccionar con otros contaminantes en el aire para formar componentes de riesgos mayores. Adicionalmente estos contaminantes también son distintos por la forma en que se generan en los procesos de combustión, algunos están más relacionados con la composición del combustible mismo mientras otros son dependientes de las características del proceso de combustión al quemarse dicho combustible y como tales son sensibles al diseño y a las variables de operación de los sistemas de combustión.

Una fuente de información mas amplia se encuentra actualmente en manuales y tablas de combustión de dominio público con lo que los operadores de calderas pueden familiarizarse y también el personal que trata con los aspectos ambientales de combustión. En los Estados Unidos de América la EPA (Environmental Protection Agency) es una de las fuentes principales mientras que en México la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL) y sus agencias cuentan con la reglamentación, disposiciones y cifras o valores permisibles de cada contaminante en función de las características de la localidad que se trate. (Ver Anexo 7).

Frecuentemente las disposiciones sobre emisiones o los criterios de operación relacionados con contaminantes están dispuestos por la operación de los sistemas o dispositivos de combustión; sin embargo actualmente se esta promoviendo un conocimiento de las reglamentaciones para protección de salud y del ambiente con un mejor acceso para todo el personal que se relaciona con este problema.

#### PARTÍCULAS.

El material de las partículas es la porción no gaseosa de los escapes de combustión consiste de los materiales sólidos y líquidos (exceptuando las gotas de agua) suspendidos en los gases de escape. Pueden definirse en general como cualquier material que no pase a través de un medio filtrante muy fino.

Las partículas que se originan en el proceso de combustión pueden ir en tamaño desde diámetros inferiores a 1 micron (menos de una millonésima de metro) hasta dimensiones mayores a un milímetro. Las partículas mayores no viajan lejos en la atmósfera y normalmente se precipitan cerca del punto de emisión.

Las partículas pequeñas que constituyen el grueso de este contaminante pueden permanecer en la atmósfera por periodos de tiempo largos y contribuyen a enturbiar u oscurecer la visibilidad a distancia. Esas “partículas finas” Son potencialmente las mas peligrosas para la salud ya que fácilmente se aspiran a través de los pasajes de las vías respiratorias en su funcionamiento normal.

El material de las partículas puede estar compuesta de una variedad amplia de materiales que incluyen combustible, compuestos de azufre, carbón, componentes de ceniza en el combustible (incluyendo muchos metales tóxicos) y aún polvo no combustible que es arrastrado al sistema de combustión por el aire. Muchos de esos materiales están identificados como riesgosos a la salud y al inhalarse subsecuentemente son absorbidos por el organismo.

Las altas concentraciones de partículas en el aire que se inhala pueden tener efectos más directos sobre la salud al irritar o bloquear las superficies de las vías respiratorias causando deterioros temporales o permanentes de la respiración y por lo tanto daños físicos. La ingestión oral de estos materiales también es posible ya que hay depositación en la vegetación y alimentos provenientes de las cosechas así contaminadas.

La cantidad y composición de partículas generadas en las calderas tiene la influencia de varios factores incluyendo el tipo de combustible que se quema, el modo de operación de la caldera, las características de los quemadores y el horno.

Los diseñadores de quemadores y los modos de operación que promueven la combustión completa y eficiente reducen generalmente la fracción de material combustible en las partículas.

Desde el punto de vista de operación de las calderas es deseable reducir estos materiales derivados del combustible ya que representan un desperdicio de energía disponible y pueden a su vez producir condiciones problemáticas en las superficies de intercambio de calor, del horno o bien humo no aceptable en la chimenea. El quemador y la relación aire – combustible representa uno de los parámetros importantes de la operación y tiene influencia en la cantidad de partículas de combustible que se generen.

El gas natural y la mayoría de los aceites combustibles son identificados como de “combustión limpia” debido a que tiene tendencia baja a la formación de combustibles sólidos (humo, hollín carbón, etc.) y que dejan un contenido bajo de cenizas.

Comparativamente algunos de los aceites pesados y la mayoría de los carbones combustibles contienen cantidades substanciales de ceniza que forman subsecuentemente nódulos de partículas no combustibles que se generan en el horno.

En el caso del carbón por ejemplo, las cenizas pueden representar valores tan altos como 30% y en algunos casos más, del peso total del combustible que se quema. La prevención de su acumulación en las superficies internas de las calderas es una de las consideraciones principales en el diseño de una caldera.

Actualmente se emplean técnicas para remover estas partículas de los gases de escape, tales como filtración, separación mecánica y precipitación electrostática. Muchos diseños han comprobado su capacidad para retirar más del 99% de esas partículas y se aplican también en las calderas que queman petróleo, combustible en donde el control de este contaminante es mandatorio.

#### BIÓXIDO DE AZUFRE.

El  $\text{SO}_2$  es un gas incoloro, no inflamable, que puede inclusive “probarse”, o sentirse en concentraciones menores a 1 ppm en el aire, en concentraciones mayores presenta olor picante e irritante, El bióxido de azufre se forma durante el proceso de combustión cuando el azufre (S) contenido en el combustible se combina con el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) del aire de combustión.

El trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) es óxido de azufre que puede formarse de la misma manera. El bióxido junto con el trióxido de azufre forman el total de

óxidos de azufre presentes, éste se identifica generalmente como “SO<sub>x</sub>”. El trióxido de azufre generalmente no excede del 3 al 5 % de este total.

Con excepción de los compuestos de azufre presentes como partículas, todo el azufre contenido inicialmente en el combustible se convierte a SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>, éste último antes de abandonar la chimenea puede combinarse con la humedad en los gases de escape para formar ácido sulfúrico que se condensará para formar partículas o permanecerá suspendido en los gases de la chimenea en forma de niebla ácida.

Lo anterior, además de dañar las partes frías de la caldera, ya en la atmósfera una porción del SO<sub>2</sub> se convierte a SO<sub>3</sub> que en forma similar resultará en ácido sulfúrico, y el SO<sub>3</sub> podrá formar también otros componentes tales como sulfatos al contacto con otros medios. Los sulfatos y la niebla ácida contribuyen en forma significativa a reducir la visibilidad en la atmósfera.

Otros efectos al ambiente son la corrosión de materiales expuestos al aire y daños a la flora. Los efectos sobre la salud de los óxidos de azufre, ácido sulfúrico y algunos sulfatos están relacionados principalmente con irritación de las vías respiratorias que podrán generar problemas a las vías y sus superficies del sistema pulmonar.

La cantidad de SO<sub>x</sub> generada en una caldera depende principalmente de la cantidad de azufre en el combustible y no está afectada significativamente por las condiciones de operación o diseño de la caldera.

La regulación de la cantidad de azufre permitida en el combustible es un método primario para controlar las emisiones de SOX, esto sin embargo, no se realiza actualmente en nuestro país.

Los separadores “scrubbers” que segregan el SO<sub>2</sub> de los gases de combustión en las chimeneas pueden también ser efectivos cuando se usan combustibles de “alto azufre”.

#### ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

El óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) son las dos formas de óxidos de nitrógeno generadas en el proceso de combustión, juntos estos componentes son referidos en la terminología ambiental como óxidos totales de nitrógeno o simplemente “NO<sub>x</sub>”. El NO es un gas incoloro y sin olor y no está considerado como peligroso a la salud en las concentraciones que normalmente se encuentran en la atmósfera, sin embargo el NO<sub>2</sub> se considera una sustancia dañina y aunque el NO<sub>2</sub> comprende alrededor de 5% o menos del NO<sub>x</sub> emitido a través de las chimeneas de calderas una porción importante del NO se convierte a NO<sub>2</sub> en la atmósfera.

El NO<sub>2</sub> es un gas de color amarillento que puede afectar la visibilidad atmosférica y tiene un olor picante (como a sudor) que es fácilmente detectable en las concentraciones que se alcanzan en el aire contaminado. En concentraciones más altas (100 ppm) el NO<sub>2</sub> puede ser fatal al inhalarse y la

exposición prolongada aun en concentraciones bajas puede causar daños acumulativos y epidemias respiratorias.

El  $\text{NO}_x$  se forma espontáneamente durante el proceso de combustión cuando el oxígeno y nitrógeno están presentes a altas temperaturas. Los tres ingredientes, oxígeno, nitrógeno y alta temperatura, son elementos esenciales para el proceso de combustión por lo que sería muy difícil prevenir la formación de  $\text{NO}_x$ . El nitrógeno está presente en aire de combustión y en el combustible mismo.

Se ha comprobado que la reducción en el contenido de nitrógeno en el combustible reduce el  $\text{NO}_x$  pero esto no es una forma práctica para controlarlo, las técnicas que se aplican normalmente y en la mayoría de los casos para reducir el  $\text{NO}_x$  y que han sido efectivas son resultado de abatir las temperaturas de flama en el horno, reducir la disponibilidad de oxígeno en la flama o de lograr una combinación de ambas.

Esas técnicas incluyen la operación con bajo exceso de aire, la combustión “rica en combustible” (stanged) y la recirculación de gases al horno. Aún cuando estas son las técnicas actuales para limitar la formación de  $\text{NO}_x$  en el horno es posible que en el futuro se desarrollen otras para “separarlo” de los gases de escape antes de que entren a la chimenea. La desulfurización y otros tratamientos de “limpieza” de combustible pueden asociar otros beneficios en los combustibles con contenido reducido de nitrógeno.

El  $\text{NO}_x$  se produce en grandes cantidades solamente a muy altas temperaturas. Otros factores que afectan la producción de  $\text{NO}_x$  en la combustión son la temperatura y presión de aire para combustión y la duración del proceso de combustión.

Las relaciones con muy bajo exceso de aire son benéficas desde el punto de vista de la formación de  $\text{NO}_x$  pero representan detrimento importante en la eficiencia y pueden generar cantidades importantes de  $\text{CO}$  y de hidrocarburos no quemados.

Los óxidos de nitrógeno es el término genérico para un grupo de gases altamente reactivos, los cuales contienen nitrógeno y oxígeno en cantidades variables. Muchos óxidos de nitrógeno son incoloros e inodoros. Sin embargo, un contaminante común, el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) junto con partículas del aire se pueden ver generalmente como una capa rojiza y café sobre muchas áreas urbanas. Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible se quema a altas temperaturas, como ocurre en los procesos de combustión. La fuente principal de los  $\text{NO}_x$  son los vehículos automotores, las plantas de electricidad y otras fuentes que queman combustible como fuentes industriales, comerciales y residenciales.

### Causas principales de Preocupación sobre los NOx

- Es uno de los muchos ingredientes envueltos en la formación de ozono a nivel terrestre, el cual puede detonar serios problemas respiratorios.
- Reacciona para formar partículas de nitrato, aerosoles ácidos, así como dióxido de carbono, el cual también causa problemas respiratorios.
- Contribuye a la formación de lluvia ácida.
- Contribuye a sobrecargar de nutrientes que deterioran la calidad del agua.
- Contribuye a formar partículas atmosféricas que causan impedimento en la visibilidad.
- Reacciona para formar químicos tóxicos.
- Contribuye al calentamiento global.

### Impactos en la salud y en el ambiente de los NOx

Los óxidos de nitrógeno causan una amplia variedad de impactos en la salud y en el ambiente por los varios componentes y derivados de la familia de los óxidos de nitrógeno, incluyendo, dióxido de nitrógeno, ácido nítrico, óxido nitroso, nitratos y óxido nítrico.

### MONÓXIDO DE CARBONO.

El monóxido de carbono (CO) es un producto de la combustión incompleta y su concentración en los gases de escape de la caldera es sensible generalmente a las condiciones de operación, por ejemplo, ajustes inapropiados de quemadores e insuficiente aire para combustión pueden conducir a altas emisiones de CO. Las mediciones de éste en la chimenea frecuentemente se usan como un indicador de condición ineficiente de combustión.

El CO es un gas sin sabor, sin color y sin olor que puede causar dolor de cabeza, somnolencia e incapacidad de oxigenación de la sangre. La exposición a gases de escape que contiene CO produce el “envenenamiento con CO”, bien conocido y cuyos efectos pueden ser fatales. La emisión de CO de las chimeneas de calderas es dispersada a la atmósfera y aun junto con el CO proveniente de otras fuentes no representan una concentración suficientemente alta para producir efectos inmediatos sobre la salud (con la excepción que puede representar la exposición en áreas de alta densidad de tráfico de automóviles). Hay sin embargo una preocupación sobre la exposición prolongada a estas concentraciones que pudiera causar eventualmente problema de salud.

## EXCESO DEL AIRE DE COMBUSTIÓN

Una primera fuente de las pérdidas de la eficiencia de los sistemas generadores de vapor es el exceso de aire en los gases de combustión arriba del necesario para llevar a cabo la combustión completa. Esta pérdida es causada por el calentamiento innecesario del aire de alimentación de la temperatura de entrada de salida de los gases de combustión.

El calentamiento del aire de alimentación requiere de combustible extra y esta energía es perdida en el medio ambiente.

Existen cuando menos 4 factores limitantes en minimizar los excesos de aire en un generador de vapor industrial. Tales factores son: El diseño del quemador de la caldera para dar un buen mezclado, la elección de los controles de la combustión, el tipo de combustible y la necesidad de prevenir las pérdidas de este último. El ingeniero de diseño de la caldera tiene un importante número de opciones para con los dos primeros factores, sin embargo, el tipo de combustible y la relación para minimizar los requerimientos de excesos de aire para prevenir las pérdidas del combustible son más difíciles de elegir.

La prevención de la pérdida en la eficiencia debida a niveles impropios de exceso de aire es un problema de dos partes. Por un lado el límite físico para el mínimo exceso de aire es determinado por el combustible y los sistemas de combustión, mientras que por otro lado, la habilidad de la caldera para operar a estos niveles es una función del sistema de control usado para regular el suministro de aire y combustible en respuesta a la demanda de carga.

Un factor dominante en los requerimientos de exceso de aire para una caldera es el tipo de combustible y el procedimiento de preparación de la combustión.

Pero de todos los combustibles el gas natural es más fácil de quemar a bajos niveles de exceso de aire, debido a su buen mezclado con el aire de combustión. Las limitaciones en mantener o controlar el exceso de aire a los niveles deseados son, primeramente asociados con el diseño de control del sistema.

Estos diseños varían en complejidad desde una simple válvula del combustible y un regulador de flujo (mariposa) en la chimenea, hasta los sistemas de control con retroalimentación que miden los excesos de oxígeno de los gases de combustión, el ajuste del combustible y controles de aire de acuerdo con la carga deseada.

## HIDROCARBUROS.

En forma análoga de monóxido de carbono, los hidrocarburos son una indicación de combustión incompleta o ineficiente y pueden eliminarse esencialmente de los productos de combustión de las calderas por operación apropiada del sistema de combustión, sin embargo esto podría malentenderse ya que estrictamente hablando los hidrocarburos no pueden eliminarse

completamente y siempre se encontrarán trazas de ellos independientemente de cómo se opere la caldera.

Debido a la gran variedad de compuestos involucrados y de los efectos no conocidos sobre la salud de algunos de estos es difícil precisar su impacto sobre el ambiente.

Algunos de estos hidrocarburos son muy parecidos a los componentes en el combustible y con toda razón son llamados “combustible no quemado”, hay en cambio otros que tienen formas totalmente distintas generadas a través de reacciones químicas durante el proceso de combustión.

Es bien conocido que los contaminantes a través de hidrocarburos en el aire son ingredientes importantes en la fotoquímica del smog y bajo ciertas condiciones atmosféricas pueden transformarse en otros derivados potencialmente más peligrosos y algunas manifestaciones del smog como la irritación de los ojos y las dificultades respiratorias son en parte asociados con hidrocarburos y sus derivados.

#### OXIDANTES.

El término “oxidante” se aplica generalmente a las sustancias que contiene oxígeno y que toman parte en las complejas reacciones químicas en atmósferas contaminadas, estas reacciones llamadas fotoquímicas que se intensifican frecuentemente en presencia de la luz solar incluyen óxidos de nitrógeno y sustancias orgánicas reactivas (incluyendo hidrocarburos y sus derivados) como uno de sus principales ingredientes químicos. Esos reaccionan para formar nuevos componentes químicos incluyendo el ozono considerado como uno de los principales oxidantes en la contaminación fotoquímica del aire (smog). El término oxidante también se usa algunas veces para los reactivos químicos originales,  $\text{NO}_x$ , hidrocarburos y otros.

Aunque el ozono no se genera generalmente en la caldera los principales ingredientes, especialmente el  $\text{NO}_x$  están presentes en los productos de combustión de la caldera y la reducción de sus emisiones y la de otras fuentes en el área (automóviles, aviones, hornos, industrias, etc.) reduciría los efectos de los subproductos oxidantes generados.

Los oxidantes fotoquímicos producen efectos adversos en las materias vegetales que pueden afectar su crecimiento y la cantidad y calidad de los productos agrícolas. El deterioro de varios materiales, especialmente el hule, es también el efecto ya conocido de una atmósfera contaminada y que puede atribuirse especialmente a la presencia del ozono. El efecto mayor en los humanos es irritación en los ojos y en cantidades mayores a las que típicamente se encuentran en atmósferas contaminadas, los oxidantes tienen ese efecto en las vías respiratorias y también en padecimientos como dolores de cabeza y fatiga severa. En concentraciones bajas los efectos no están bien definidos sin embargo se atribuye también a oxidantes el agravamiento de padecimientos respiratorios tales como el asma.

PERMANENCIA DE LOS CONTAMINANTES.

Independientemente de las cantidades en que se emitan, estos contaminantes siguen un proceso de degradación en la atmósfera hasta alcanzar concentraciones de equilibrio que los hace permanecer periodos largos de tiempo como se muestra en la tabla 1.

8.1.2 CALOR DESPERDICIAO.

Otros de los problemas ambientales generados por las instalaciones de combustión como son las centrales termoeléctricas de servicio público o industrial, o las calderas y hornos en general, es el calor disipado por pérdidas en los procesos de transformación y otros productos de ineficiencias y prácticas inadecuadas de operación y mantenimiento.

Además de la cantidad de calor de desperdicio o de pérdidas es importante la forma en que ese calor se disipa al ambiente. Su efecto es menor si el medio receptor de ese calor es el aire y no otro como puede ser el agua de un río o el mar. Cuando se estudia ese punto se concluye siempre que la alta eficiencia de las plantas de ciclo combinado en sus diferentes esquemas es ventajosa ya que a partir de una cantidad dada de energía primaria la porción de energía es aprovechada por la instalación es mayor.

En la tabla 2 se muestran cifras de los porcentajes de energía primaria disipados a los medios de enfriamiento.

En las plantas de fuerza normalmente la mayor cantidad de calor se transfiere al agua como conductor y receptor. Esto, desde el punto de vista ambiental, es una desventaja. La alternativa de disiparlo al aire por medio de torres de enfriamiento o aero – condensadores tiene un costo importante en la operación e instalaciones. La cantidad de agua de enfriamiento requerida es mucho menor en una planta de ciclo combinado.

8.1.3 RUIDO.

Otro producto final como contaminación al ambiente de instalaciones de calderas y otras es el ruido generado por la caldera propiamente o por sus equipos auxiliares. La solución de estos problemas generalmente es aceptable con la aplicación de materiales acústicos de los que hay una variedad amplia disponible. Los costos de estos son aproximadamente los mismos independientemente del tipo de instalaciones sobre la base de materiales y condiciones similares.

La operación eficiente y segura incluye el control adecuado de las condiciones de presión en el horno de caldera ya que la mezcla adecuada aire combustible en los sistemas de quemadores depende en buena medida de la presión diferencial a través del quemador.

En la figura se muestran los sistemas de tiro natural, balanceado, inducido y forzado así como las consideraciones que en cada configuración debe tomar en cuenta el sistema de control, ya que las aberturas de compuertas, los ventiladores de tiro forzado y tiro inducido y efecto de chimenea juegan un papel importante en estos sistemas de control en el lado de aire y gases.

Hasta cierto grado la eficiencia de una caldera depende del diseño de quemadores, elementos de intercambio de calor y de otros parámetros que no pueden fácilmente modificarse, sin embargo otras condiciones como los cambios en composición del combustible, temperatura, presión y humedad del aire, carga de la caldera y forma en que varía y condiciones del equipo modifican el comportamiento de la caldera y pueden coordinarse para mejorar su control que puede interpretarse como mejor el control de aire y combustible.

Los controles posicionados paralelo y serie tiene la limitación de que son retroalimentados únicamente por la presión de el cabezal de vapor, si esta cerca del valor deseado, el sistema de control no actuará para corregirlo.

Por lo anterior es altamente deseada modificar el sistema de control e incluir retroalimentación de información sobre la relación aire combustible ya sea adicionando analizador de oxígeno o monóxido de carbono y la señal correspondiente para incorporarla como elementos de corrección al sistema de control de la caldera.

La eficiencia de la caldera puede mejorarse operando en el punto en que las pérdidas por combustible no quemado y exceso de aire, combinadas, sean las mismas. La corrección por O<sub>2</sub> consiste en medir el oxígeno libre en los gases de combustión y ajustar en consecuencia el flujo de aire para eficiencia de combustión máxima.

El sistema de corrección por CO opera también sobre el exceso de aire y presenta varias ventajas y sobre la corrección de O<sub>2</sub>. Se mide la cantidad de combustible no quemado, en términos de CO, en los gases de combustión y se ajusta la relación aire combustible en el control para condiciones reales de combustión en lugar de niveles de oxígeno preestablecidos. De esta manera el sistema de corrección por CO verifica continuamente el punto de máxima eficiencia.

Otra ventaja de esta sistema es su independencia del tipo de combustible y que prácticamente no tiene efecto en sus funciones la infiltración de aire que se presenta en la calderas que operan con presión negativa en el sistema aire y gases.

Deben tenerse algunas precauciones con los sistemas de detección de CO ya que no siempre es una indicación del exceso de aire. Una atomización deficiente, enfriamientos en la flama, contacto en la flama o incidencia sobre tubos de la caldera, suciedad en quemadores o mezcla deficiente en aire combustible, pueden también causar elevación en el nivel de CO medido.

La aplicación de O<sub>2</sub> o bien de O<sub>2</sub> + CO como sistema de corrección o compensación para exceso de aire en el control de combustión es una solución muy atractiva. Las mediciones de oxígeno son una indicación cierta de exceso de aire pero no guardan relación con la calidad de combustión, y tampoco indica si el proceso fue completo.

Las mediciones de Monóxido de Carbono no tienen relación con el exceso de aire pero proveen un índice de la calidad y perfección del proceso de combustión. La combinación de las dos mediciones nos da la oportunidad de tomar lo mejor de cada uno de estos parámetros:

El control de combustión puede ser tan sofisticado como económicamente se justifique, la figura 6 y la tabla 11 es muy objetiva en cuanto a la precisión obtenida en el control de exceso aire según el esquema seleccionado.

Las ventajas de los sistemas de control operados por microcomputadora incluyen:

1. Las instrucciones y puntos de control pueden cambiar fácilmente.
2. Los sistemas pueden ampliarse fácilmente para incorporar otras funciones o atributos de control e inclusive otras calderas
3. Pueden tener redundancia de control de bajo costo.
4. Adquisición de datos de comportamiento y diagnóstico de operación de la caldera fácil y rápidamente generados para análisis.
5. Pueden generar autodiagnósticos del sistema de control.
6. Mediante entrelaces de telecomunicaciones puede tenerse información de tiempo real, importante, o histórica con fácil acceso al sistema.

Los sistemas de control digitales combinan frecuentemente las funciones anteriormente desarrolladas por sistemas separados de HARDWIRED tales como control de combustión, control de enlaces y seguridad, monitoreo y adquisición de datos.

En un sistema DDC típico los dispositivos generadores de señal tales como sensores, interruptores e indicadores de códigos de posición tienen acceso a intervalos de tiempo muy cortos asegurando que cualquier problema tiene respuesta y solución casi inmediatamente.

## ANEXO 1 – SEÑALES DE MEDICIÓN Y CONTROL COMUNES

Porcentaje de variable	Señal electrónica	Señal neumática	Señal neumática	Señal eléctrica
%	4 – 20 [mA]	3 – 15 PSI	3 – 27 PSI	1 – 5 Volts
0	4.0	3.0	3.0	1.0
10	5.6	4.2	5.4	1.4
20	7.2	5.4	7.8	1.8
30	8.8	6.6	10.2	2.2
40	10.4	7.8	12.6	2.8
50	12.0	9.0	15.0	3.0
60	13.6	10.2	17.4	3.4
70	15.2	11.4	19.8	3.8
80	16.8	12.6	22.2	4.2
90	18.4	13.8	24.6	4.6
100	20.0	15.0	27.0	5.0

## ANEXO 2 – CABALLO CALDERA

La cantidad de calor requerida para producir 15.65 kilogramos por hora de vapor saturado a una temperatura de 100 °C, utilizando agua a la misma temperatura, siendo equivalente a 35.32 megajoules por hora (Mj/hr).

### ANEXO 3 – USO DE LA SEÑAL 4 – 20 [mA C.C.]

En un ambiente industrial donde existen innumerables fuentes de ruido eléctrico y contaminación electromagnética, es necesario contar con una forma de comunicación que permita la transferencia de una señal de control que sea inmune a esas fuentes de ruido.

Con el fundamento de que la forma de ruido más común es el voltaje (se puede considerar ruido hasta 50 [mV]), se debe manejar una señal en corriente. Se maneja un rango de 4 – 20 [mA] (0 – 100 %) porque es relativamente fácil su generación al igual que su procesamiento para convertirlo a una señal manejable de voltaje.

Es suficiente hacer circular esos 4 – 20 [mA] a través de una resistencia de 250 [ $\Omega$ ] para que en los extremos de ésta podamos medir un valor de 1 a 5 V.D.C.

Así, por Ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R}$$

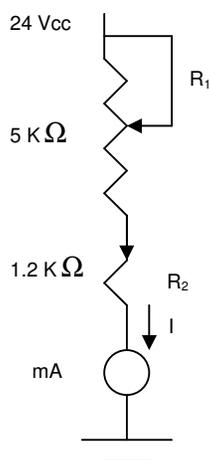
Despejando

$$V = R \times I = (250[\Omega])(0.004[A]) = 1[V]$$

$$V = R \times I = (250[\Omega])(0.020[A]) = 5[V]$$

Considerando que la gran mayoría de equipos eléctricos industriales funcionan con una fuente regulada de 24 V.C.C., podemos obtener fácilmente una señal de 4 – 20 mA a través de un simple circuito.

Si formamos un lazo de corriente con un arreglo de resistencias y una fuente de 24 Vcc, podemos obtener una corriente de 4 – 20 mA.



$$\text{Suponiendo } R_1 = 0 \Omega \therefore I = \frac{V}{R_2} = \frac{24V_{cc}}{1200\Omega} = 20mA$$

$$\text{Suponiendo } R_1 = 4.8K\Omega \therefore I = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{24V_{cc}}{6000\Omega} = 4.0mA$$

Por lo anterior concluye que a lo largo de la trayectoria de  $R_1$  podemos obtener cualquier valor del deseado entre 4 y 20 [mA].

Anteriormente existía una proliferación de estándares dependiendo del fabricante. Foxboro usaba 10 – 50 [mA]. A los que usaban 10-50 [mADC] les gustaba la resolución aumentada. Los alemanes usaban 0 - 20 [mA], lo cual requería un circuito de 3 hilos ya que, nuevamente, no se puede energizar un equipo con la señal de línea con corriente cero. Otros usaban 1- 5 [VAC].

El Currentronic de Honeywell usaba 4 - 20 [mA] en serie a través de todos los componentes del lazo. Taylor usaba 4-20 [mA] a través de una resistencia de 62.5 ohmios con 0.25 a 1.25 [V] paralelo a todos los componentes del tablero. Lentamente, todos se movieron a los 4-20 [mA] con resistencia de 250 ohmios como un estándar industrial. De esta manera se calibran los transmisores usando los valores de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% (se hace fácil la determinación del 25% (8 mA), 50% (12 mA), 75% (16 mA) y 100% (20mA). Los 24 [VDC] y 20 [mA] también hacen fácil la conversión a voltaje; 4-20 [mADC] a través de una resistencia de 250 ohm nos da 1-5 [VDC]. Y el nivel de señal normalmente es suficientemente alto para evitar el ruido, ya que se usa cable de par trenzado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ALLEN BRADLEY, *Manual de procedimientos para controladores Logix 5000*. En: pagina Web <http://www.allenbradley.com>
2. BAILEY. *Aplicación a generadores de vapor*, México: Medidores Bailey, 1980.
3. BAILEY. *Control*, México: Medidores Bailey, 1980.
4. CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación Industrial*, 6ª edición, España: Marcombo, 1997.
5. DÍAZ, Nestor. *Calderas, Un estudio sobre los factores que afectan su eficiencia*, 1ª edición, México: Instituto Politécnico Nacional, 1996.
6. PLAUCHÚ L. Alberto. *Eficiencia en calderas*, 1ª edición, México: FIDE, 1995.
7. STEAM its generation and use. The Babcock & Wilcox Company
8. NFPA 85 Boiler and Combustion Systems Hazards Code 2004 Edition (National Fire Protection Association)