

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Sistema posicionador paralelo para control  
de combustión de calderas

Guatemala  
2008



Sistema posicionador paralelo para control  
de combustión de calderas

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Sistema posicionador paralelo para control  
de combustión de calderas

Trabajo de investigación presentado  
por Mario Rafael Marroquín Moya  
para optar el grado de Licenciado en  
Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2008

VoBo.:

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Sergio F Cabrera

Tribunal Examinador

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Sergio F. Cabrera

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. José Joaquín Garoz

(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Manuel Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala, 30 de Agosto de 2008.

## **PREFACIO**

Una gran cantidad de pensamientos y esfuerzos se han invertido en la elaboración y preparación de este trabajo de graduación, el cual se inició en el año 2007 con el fin de desarrollar la investigación sobre el sistema de control paralelo para el control de combustible en las calderas. La información obtenida ha sido planteada y revisada de manera que pueda ser comprendida de mejor forma por el lector.

El autor está en deuda con la empresa de Servicios Industriales y Agrícolas S.A., SIDASA por haber proporcionado la información necesaria para poder realizar este trabajo de graduación y en especial al Ingeniero Sergio Cabrera por la revisión que hizo del mismo por las valiosas sugerencias que proporcionó durante su desarrollo ya que éstas fueron invaluable y verdaderamente añadieron nuevas dimensiones al trabajo.

Las siguientes líneas están dirigidas a cuatro grupos: los profesores que espero que adopten este tema en futuras clases con el fin de introducirlo a los estudiantes para que conozcan el funcionamiento del sistema controlador paralelo y de su importancia en la actualidad; ingenieros practicantes que buscan resolver problemas y hacer de este mundo un mejor lugar donde vivir; a los estudiantes que utilicen este trabajo de graduación como fuente de información para su utilidad en el ámbito académico. Finalmente quisiera agradecer a mi familia, en especial a mi Papá, mi Mamá y a mi hermana por haberme apoyado en mis estudios y por la tolerancia en la realización de este trabajo de graduación.

Mario R. Marroquín M  
Estudiante de 5to año de Ingeniería Mecánica  
Universidad del Valle de Guatemala  
Ciudad de Guatemala

# ÍNDICE

	PÁGINA
PREFACIO	v
LISTA DE ILUSTRACIONES	viii
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
III. DATOS BÁSICOS DE CALDERAS	3
A. Funcionamiento de calderas	3
1. Tipos de caldera	5
a. Calderas pirotubulares	5
1) Accesorios exteriores	7
b. Calderas acuotubulares	9
1) Circulación natural	11
2) Circulación forzada	12
IV. QUEMADOR	15
A. Funcionamiento de quemador	15
1. Tipos de quemadores	16
a. Quemador de aire o vapor presurizado e implementación de orificios	16
b. Quemador de copa rotatoria	18
c. Quemador para combustibles gaseosos o combinados	19
2. Componentes de un quemador y accesorios	19
a. Motor de ventilador de corriente forzada	20
b. Motor modulador	21
1) Leva reguladora de combustible	23

	PÁGINA
c. Difusor y damper rotatorio de aire	25
d. Controles operadores del quemador	26
1) Control operador de límite	27
2) Control de alto límite	27
3) Control modulador	27
V. SISTEMA POSICIONADOR PARALELO	29
A. Sistema posicionador paralelo	29
1. Componente de un sistema posicionador y su funcionamiento	29
a. Actuadores	29
1) Funcionamiento e instalación de actuadores	30
b. Controlador de actuadores y su funcionamiento	32
c. Controlador de flama primaria y su funcionamiento	33
d. Control de operación-modulación	34
e. Pantalla de despliegue	37
2. Instalación de sistema posicionador	39
3. Ventajas y desventajas de un sistema posicionador	41
a. Ventajas	41
b. Desventajas	42
4. Manteamiento de un sistema de posicionamiento	42
5. Costo y justificación del sistema posicionador paralelo	42
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
VII. BIBLIOGRAFÍA	45
VIII. ANEXOS	46

## LISTA DE ILUSTRACIONES

FIGURA	PÁGINA
1. Representación gráfica de una caldera	3
2. Transferencia de calor de una caldera pirotubular	6
3. Representación de una típica caldera pirotubular de agua caliente	6
4. Flujo de gases de combustión en una caldera pirotubular de tres etapas de vapor	7
5. Accesorios principales de una caldera pirotubular	8
5a. Representación de una caldera pirotubular con sus partes principales	9
6. Transferencia de calor en una caldera acuotubular	10
7. Representación de una caldera acuotubular	11
8. Circulación natural en una caldera acuotubular	12
9. Circulación forzada en una caldera acuotubular	13
10. Representación de un economizador, evaporador y sobrecalentador utilizando gases extraídos de una turbina	13
11. Representación de sobrecalentadores, precalentadores y economizador utilizando los gases de combustión de una caldera acuotubular	14
12. Distribución del combustible antes de ser enviado a los quemadores	15
13. Quemador de mezclado interno	16
14. Prueba de llama de un quemador	16
15. Quemador de mezcla externa	17
15a. Otro tipo quemador de mezclado externo	17
16. Quemador de copa rotatoria	18
17. Quemador para comestibles gaseoso	19
18. Controles comunes para las calderas	20
19. Motor del ventilador del quemador	21

FIGURA	PÁGINA
20. Ventilador de corriente forzada	21
21. Motor modulador	22
22. Sistema articulado para un combustible combinado	22
23. Válvula reguladora de vapor con sus respectivos eslabones o brazos	23
24. Leva reguladora de combustible	24
24a. Controlador de combustible ligero	24
25. Damper y difusor	25
26. Damper rotatorio de aire	26
27. Eslabonamiento y quemador instalado en una caldera	26
28. Controles operadores de vapor	28
29. Representación de actuador en vista frontal y trasera	30
30. Actuador para aire de combustión	30
31. Actuador para flujo de combustible pesado	31
32. Válvula reguladora de combustible	31
33. Controlado de actuadores por sistema de led's	33
34. Control de seguridad de flama	34
35. Control de operación y modulación (3 en 1)	35
36. Relación entre el controlador de actuadores y control de seguridad de flama	36
37. Esquema de sistema posicionador paralelo	37
38. Desplegando de selección de combustible y configuración	38
39. Configuración de actuador	38
40. Ajuste de apertura de los actuadores	38
41. Elaboración de gráfica aire-combustible	39
42. Quemador con típico eslabonamiento para la mezcla de aire-combustible	40
43. Quemador con sistema controlador paralelo	40
44. Sistema posicionador paralelo	41

FIGURA	PÁGINA
45. Grafica de ahorro de combustible	42
46. Grafica de ahorro de combustible con el tiempo	43

## **RESUMEN**

En la actualidad el costo de los derivados del petróleo han aumentado continuamente debido a diversa causas; por eso es necesario reflexionar para poder encontrar la soluciones necesarias que contribuyan a disminuir el consumo del mismo ya que los costos del combustible aumentarán en el futuro. En este trabajo de graduación se hace referencia a un dispositivo que contribuye a reducir el consumo de combustible en las calderas, el sistema posicionado paralelo para el control de combustible es un sistema que sirve a grandes compañías que utilizan calderas ya sea para generar potencia o para algún proceso de manufactura el cual necesite la utilización de caldera.

Básicamente un sistema posicionador paralelo se utiliza para reducir el consumo de combustible por medio de diversos actuadores que sustituyen varios acoples mecánicos, estos actuadores son accionados por un controlador electrónico, el cual reacciona a las señales emitidas por un controlador que esta monitoreando constantemente los parámetros de encendido y apagado de la caldera.

Con un sistema de posicionamiento paralelo se logra reducir el consumo de combustible de manera significativa, en la actualidad muchas empresas en otros países han logrado reducir sus costos de operación ya que estos sistemas son fáciles de instalar y su funcionamiento es bastante simple. El costo del sistema es una inversión que retorna por los beneficios del ahorro de combustible, mientras más grande y más constante sea la demanda de vapor la inversión retornará mas rápidamente.

Guatemala es un país en el que se está introduciendo este sistema y a medida que se vayan obteniendo resultados tangibles económicamente se irá generalizando su uso en la industria nacional.

# I. INTRODUCCIÓN

Un sistema posicionador paralelo para el control de combustible en calderas es un sistema de gran utilidad en la industria de las calderas ya que con base a este sistema se logra el ahorro significativo de combustible, es importante mencionar que este sistema posicionador se elimina el uso de acoples mecánicos como los eslabones, los brazos rotatorios, las levas reguladoras de flujo de aire y combustible y se sustituyen por actuadores electrónicos los cuales funcionan por medio de señales establecidas por controles generales los cuales miden los parámetros necesarios para hacer funcionar los actuadores, estos a su vez accionarán diversas válvulas para el control de aire y combustible volviendo la mezcla de aire-combustible lo más homogénea posible para tener una eficiencia de caldera más alta y por ende una transferencia de calor de mejor calidad, basados en la precisión del ajuste del sistema.

Al utilizar un sistema de posicionamiento paralelo se logra minimizar los costos de combustible debido a que el sistema le permite consumir la menor cantidad de combustible a cargas de vapor muy bajas las cuales pueden estar por debajo del límite normal del arranque del motor de quemador; sin embargo, por el sistema controlador se logran trabajar a esta cargas tan bajas, de esta manera la caldera se apagará menos veces y por ende se utilizará menos combustible.

Con respecto al mantenimiento del sistema posicionador se puede decir que es de bajo costo debido a su fácil instalación, porque posee ejes que son fáciles de acoplarse a los diversos dispositivos mecánicos, los actuadores no necesitan un mantenimiento muy extenso ya que poseen led's que informan su estado a cada instante, la información de cada actuador puede variar según sus especificaciones o su fijación en el sistema controlador de posición. Para realizar un mantenimiento sólo se debe verificar el encendido de los led's en cada actuador y en el sistema controlador de los actuadores los cuales son partes fundamentales para el funcionamiento del sistema.

Un sistema controlador se basa en cinco componentes: los actuadores, el sistema de control de actuadores, el control de razón de fogeo (firing rate control) , el control de operación-modulación y el sistema de despliegue para controlar las señales de la caldera ya que éstas se pueden observar en una pantalla PC o una pantalla especial. Es un sistema de control que se puede instalar en cualquier tipo caldera, la relación de aire-combustible se puede modificar con el fin de hacer la relación de aire-combustible óptima para utilizarla en el quemador.

La investigación del sistema posicionador consistió en la recolección de información como de la comprobación de su utilización en una caldera, esto para poder tener evidencia ilustrativa y de esta manera lograr que las explicaciones sean fáciles de desarrollar y que el lector entienda fácilmente el desarrollo del sistema posicionador paralelo para el control de combustible en calderas.

## **II. OBJETIVOS**

### **A. Generales**

- Establecer al sistema posicionador paralelo, como una herramienta fundamental para el ahorro de combustible en las calderas y que todas las empresas de Guatemala hoy en día deban de adquirirlo.
- La investigación sirva para futuras aplicaciones del sistema posicionador paralelo para demostrar la utilidad del mismo.

### **B. Específicos**

- Elaborar la investigación del sistema posicionador paralelo para poder entender de mejor manera el funcionamiento del mismo.
- Establecer las ventajas y desventajas del sistema posicionador paralelo comparado con los sistemas de brazos mecánicos, y analizar el impacto que estos tendrán en la industria guatemalteca.

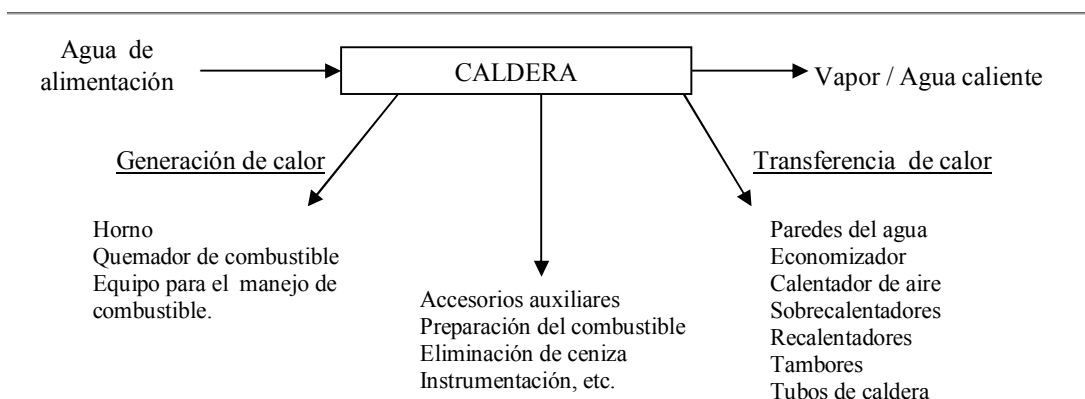
### III. DATOS BÁSICOS DE CALDERAS

#### A. Funcionamiento de calderas

Las calderas son dispositivos que se utilizan para la generación de vapor o agua caliente, utilizados para diversos procesos industriales o para la generación de potencia. Las calderas utilizan diferentes tipos de combustibles entre los cuales se pueden mencionar derivados del petróleo, carbón entre otros, en donde estos se utilizan para la generación de calor; es decir, se utiliza la energía de un combustible que se transforma en calor para el calentamiento de un fluido en donde posteriormente se evapora para ser utilizado en un proceso industrial requerido.

Para que una caldera tenga un mejor desempeño es necesario mejorar el ciclo energía térmica, es decir, mejorar el proceso de agua a vapor o a agua sobrecalentada. El equipo que las calderas utilizan es de gran importancia para el buen desempeño de las calderas, a continuación se presenta un diagrama del funcionamiento de una caldera.

**Fig.1 Representación de gráfica de una caldera**



Como se observa en la figura.1 una caldera depende de varias condiciones para producir vapor, sin embargo, existen dos condiciones que son claves para el buen desempeño de una caldera; los cuales son **la generación de calor** y **la transferencia de calor**, en el sistema de la caldera.

La generación de calor se realiza por medio del combustible como se mencionó anteriormente, el cual se utiliza por el quemador que es el encargado de llevar a cabo la mezcla de aire-combustible necesaria para dar inicio a la flama que se utilizará en la caldera y de esta forma dar inicio a la generación de calor.

Básicamente la cantidad de calor por unidad de masa que desprende un combustible al quemarse es el poder calorífico del combustible el cual se mide en kJ/kg en el sistema internacional o en Btu/lb en el sistema inglés aun muy utilizado. Los elementos básicos que reaccionan son:

- El oxígeno del aire, que existe en mayor cantidad y se considera comburente (Aprox. 1 m<sup>3</sup> por kWh).

- El carbono y el hidrogeno del combustible.
- Otros elementos (azufre) e inertes (ceniza).

Los combustibles se clasifican en tres estados: 1. Sólido, 2. Líquido y 3. Gaseoso. Según sea el consumo de la caldera. Los combustibles sólidos se dividen en:

- Carbón mineral
    - Antracita
    - Bituminoso
    - Sub-Bituminoso
    - Lignito
- } ↓ Menor calidad
- Carbón vegetal
  - Leña
  - Bagazo de caña de azúcar
  - Coque

Los combustibles líquidos se dividen en:

- Gasolina
- Kerosina
- Diesel
- Bunker
- Otros

Los combustibles gaseosos se dividen en:

- Gas natural
- Propano
- Butano
- Otros

Dependiendo del combustible seleccionado se realizará un pretratamiento del mismo para luego ser enviado al quemador, generalmente los combustibles sólidos como el carbón o coque utilizan un sistema de trituración, pesaje y pulverización para luego ser enviado al quemador. En el caso de los combustibles líquidos como el bunker se utilizan precalentadores para poder manipular de mejor manera el combustible dentro del quemador.

La generación de calor es de gran importancia para tener una mejor eficiencia en la caldera; como se mencionó en la fig. 1 la generación de calor se realiza dentro de la caldera la cual funciona como un horno en donde se concentra la temperatura de flama del quemador, junto a la caldera y al quemador se utilizan diferentes equipos o dispositivos que ayudan a mantener el control de la generación de calor de la caldera.

Otra condición de gran importancia es la transferencia de calor que sufre el fluido, por medio de la generación de calor, es decir, la flama generada por el combustible transfiere calor por conducción o radiación o por ambas a las paredes del fluido para luego transferir calor por convección al mismo y posteriormente lograrse la producción de vapor saturado en caso que el fluido sea agua y aceite caliente en caso que el fluido sea aceite térmico.

Para mejorar la eficiencia del sistema por medio de la transferencia de calor normalmente se utilizan diferentes dispositivos que hacen el proceso de evaporación más simple y ahorativo de tal forma que se reduzca el consumo de combustible. Generalmente se utilizan dispositivos como recalentadores, economizadores, precalentadores de aire y combustible, evaporadores, condensadores, sobrecalentadores, entre otros que hacen el sistema más eficiente debido al ahorro de energía para producir vapor.

Existen otros accesorios auxiliares que contribuyen al buen desempeño de las calderas, entre estos accesorios se pueden mencionar accesorios para la preparación del combustible antes de ser enviado al quemador, dispositivos para eliminación de sedimento, eliminación de la ceniza y otros residuos producidos por la combustión como también instrumentación de la caldera etc.

Básicamente las calderas reciben agua de alimentación la cual es transportada por una bomba de agua; el agua de alimentación que entra a la caldera es agua tratada, es decir, agua libre de minerales. Cuando el agua de alimentación entra a la caldera esta es sometida a la flama del quemador ocasionando que el agua se evapore produciendo vapor saturado.

**1. Tipos de calderas.** Las calderas se clasifican según su diseño y también por la demanda de vapor que se necesite en el proceso, las calderas más comunes se dividen en dos tipos:

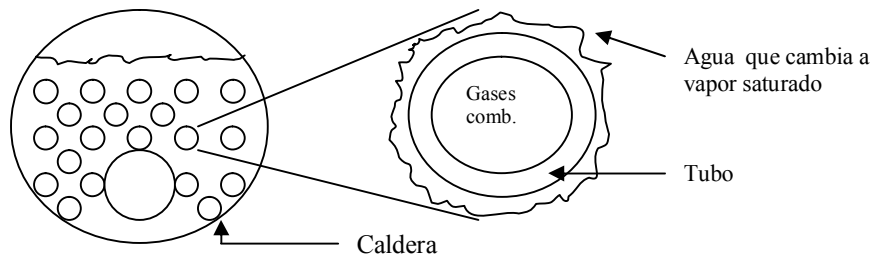
- Calderas pirotubulares
- Calderas acuotubulares

**a. Calderas pirotubulares.** Las calderas más pequeñas son de este tipo de diseño ya que tienen la capacidad de producir valores mínimos de potencia en la caldera, este tipo de potencia se conoce como caballos de caldera o BHp por sus siglas en inglés. En este tipo de caldera los gases de combustión atraviesan el interior de los tubos que están sumergidos en agua, posteriormente el agua es calentada y evaporada. La estructura de estas calderas permite que la combustión que pasa adentro de los tubos esté separado del agua evitando el contacto directo de la combustión y el agua.

Básicamente estas calderas se utilizan generalmente para producir vapor saturado con presiones y potencias máximas de 350 Psig y 1500 bHp respectivamente. Al pasar los gases de combustión dentro de los tubos como se observa en la Fig. 2., estos calientan los mismos y por convección transfieren calor a las

paredes del tubo, luego por conducción en el tubo se transfiere calor al agua que rodea el tubo para luego por convección evaporar el agua y producir vapor saturado.

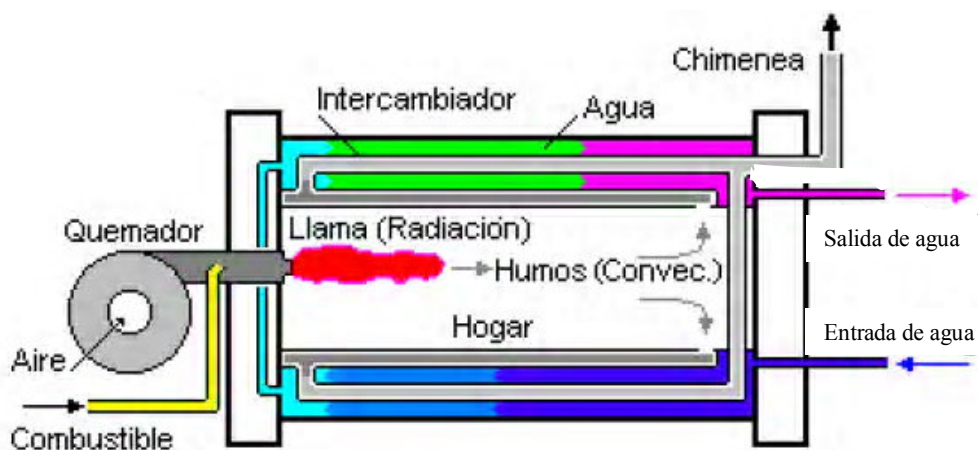
**Fig. 2 Transferencia de calor de una caldera pirotubular**



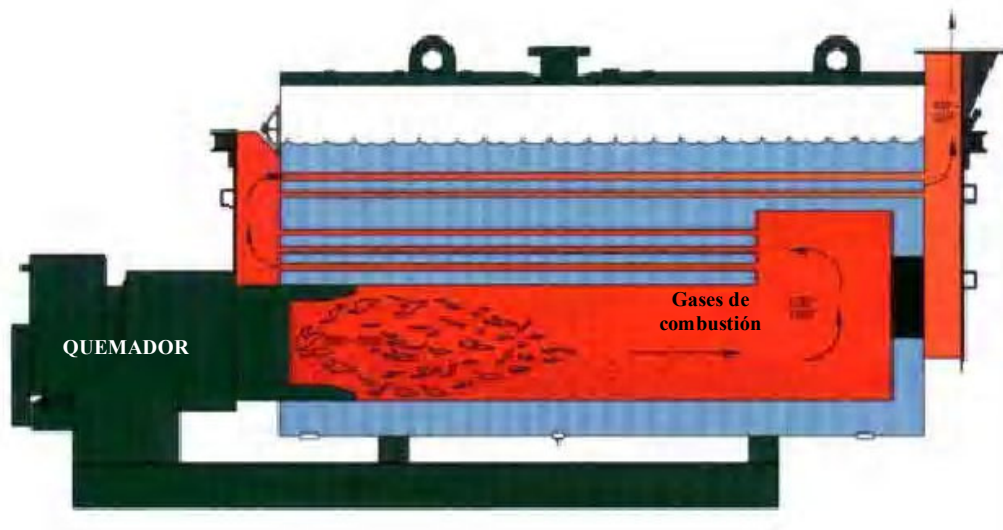
Estas calderas utilizan varios tubos sumergido en agua con el fin de aumentar la transferencia de calor, también poseen varias etapas que permite el paso de los gases de combustión, es decir, que los gases de combustión se hacen pasar de 2 a 4 veces dentro de la caldera, dependiendo su diseño, para poder utilizar la mayor cantidad de la combustión. Las partes principales de una caldera pirotubular son:

- Hogar
- Quemador
- Humos
- Intercambiadores de calor
- Fluido
- Chimenea

**Fig. 3. Representación de una típica caldera pirotubular de agua caliente**



**Fig. 4. Flujo de gases de combustión en una caldera pirotubular de tres etapas de vapor**

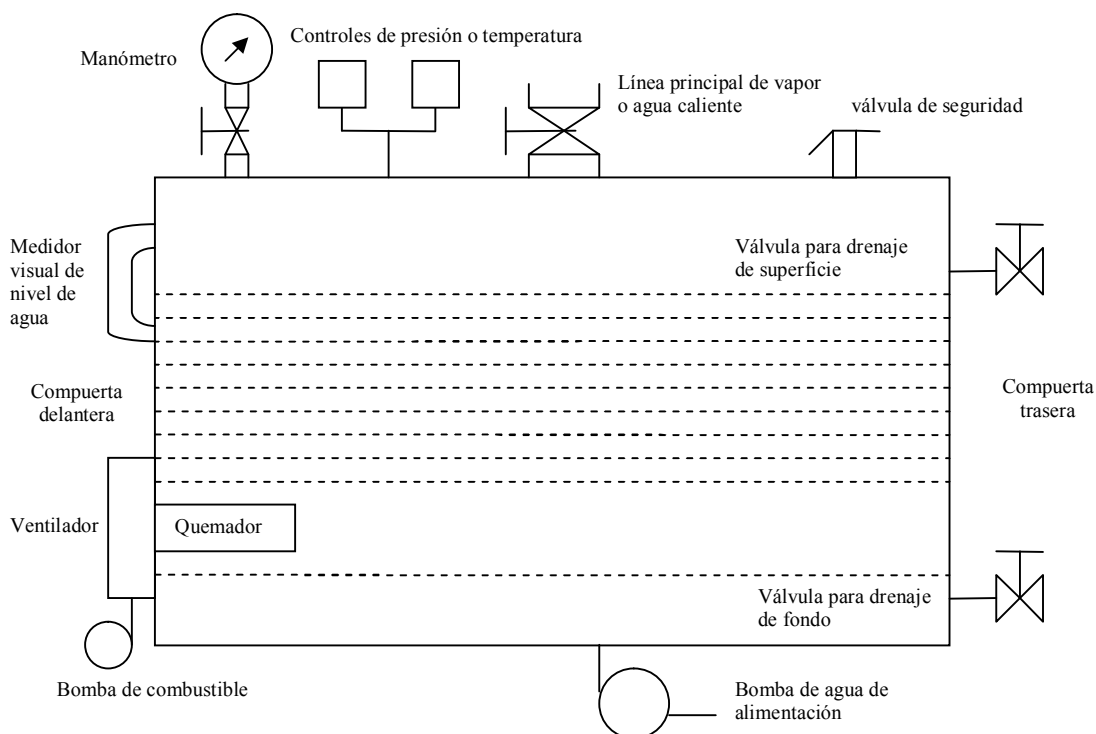


En la figura 3 se describe el funcionamiento una caldera pirotubular, la cual utiliza un quemador que produce una llama que se posiciona en el hogar donde transfiere calor por radiación, posteriormente los humos que son ocasionados por las gases de combustión transfieren calor por convección a los tubos y estos a su vez al fluido, en esta etapa los tubos están sumergidos en el fluido que en la mayoría de los casos es agua, al transferir calor a los tubos que llevan el agua de alimentación estos funcionan como un intercambiador de calor ya que permiten la liberación del calor que se concentra dentro de la caldera, la transferencia de calor puede realizarse de dos a cuatro etapas, dependiendo del diseño de la caldera.

Como lo muestra la figura 4 los gases de combustión que salen del hogar se redirigen con la compuerta trasera a la primera etapa de tubos luego los gases regresan a la compuerta delantera donde ésta vuelve a guiar a los gases hacia otra etapa de tubo hasta llevarlos a la chimenea.

**1) Accesorios exteriores de una caldera pirotubular.** Las calderas pirotubulares utilizan diversos accesorios para mantener un mejor control y desempeño en la producción de vapor saturado, es importante en mencionar que estos accesorios deben revisarse constantemente ya que la caldera depende de ellos para poder funcionar, los accesorios que generalmente utiliza una caldera son los siguientes.

**Fig. 5 Accesorios principales de una caldera pirotubular**

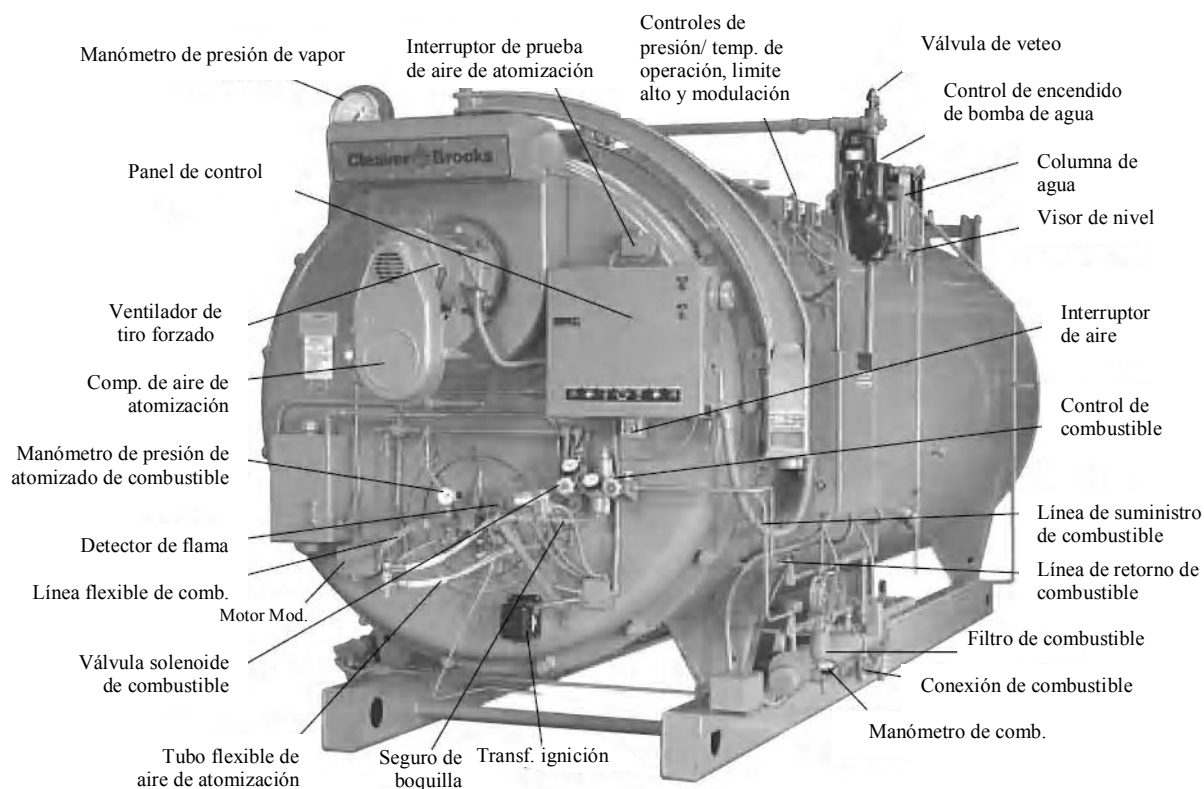


Como se mencionó anteriormente las calderas utilizan diversos accesorios que mejoran el desempeño de la misma, en la Fig. 5 y 5a se observan los accesorios que generalmente utiliza una caldera, tales como:

- *Medidores de nivel de agua*, los cual indican si los tubos están debidamente sumergidos.
- *Manómetros*, existen varios manómetros en la caldera ya que se utilizan para medir la presión del vapor en la línea principal, en el combustible, en el agua de alimentación, entre otras cosas.
- *Válvula de venteo*, Se utiliza para expulsar el aire que está siendo desplazado por el vapor dentro de la caldera.
- *Válvula de seguridad*, esta válvula se utiliza para evitar que la caldera se exceda de la presión a la que fue diseñado y también protege a la caldera.
- *Válvula de drenaje superior y de fondo*, estas válvulas se utilizan al realizar un mantenimiento ya que permiten la extracción de lodos y sólidos que han quedado depositadas en la caldera.
- *Bomba de agua de alimentación*, esta bomba se encarga de suministrar el agua necesaria a la caldera para mantenerla siempre al nivel necesario.
- *Bomba de combustible*, esta bomba se encarga de suministrar el combustible necesario al quemador.
- *Ventilador*, éste es el encargado de dirigir los gases de combustión y de proporcionar el aire necesario a la mezcla de aire-combustible que el quemador demanda.
- *Quemador*, éste se encarga de proporcionar la flama y posteriormente los gases de combustión necesarios para realizar la transferencia de calor.

Todos los accesorios anteriores en la mayoría de los casos utilizan diversos sistemas de control los cuales contribuyen a un desempeño de gran precisión.

**Fig. 5a Representación de una caldera piro tubular con sus partes principales**



Es importante mencionar que las calderas piro tubulares más comunes son los diseños verticales y horizontales cilíndricos, los primeros se utilizan para un caballaje de caldera pequeño mientras que las otras se utilizan para un caballaje de caldera de mayor potencia. Para evitar pérdidas de calor en la caldera ésta utiliza fibra de vidrio que produce un aislamiento entre la caldera y la atmósfera, también este tipo de caldera utiliza en el interior de la compuertas material refractario el cual contribuye al aislamiento de la caldera.

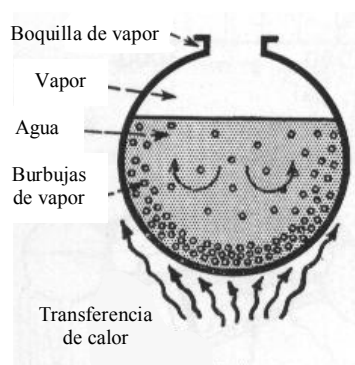
**b. Calderas acuotubulares.** Este tipo de caldera se utiliza generalmente para producir vapor sobrecalentado el cual se utiliza para generar potencia por medio de turbinas de vapor. Las calderas acuotubulares se diferencian de las piro tubulares debido al manejo de altas presiones ya que las acuotubulares funcionan de forma inversa a las piro tubulares.

El agua de alimentación que fluye dentro de los tubos y tambores se le transfiere calor de tres formas, por radiación, convección y conducción. Se diferencia de las piro tubulares porque los gases de combustión producidos por el quemador pasan sobre los tubos y tambores que llevan el agua de alimentación.

La transferencia de calor se inicia en el hogar, en esta parte la transferencia es netamente por radiación, luego la transferencia de calor se da por convección, que es producida por los gases de combustión, esta transferencia de calor tiene lugar en los tubos que están conectados a los tambores superiores e inferiores, posteriormente tanto en la radiación como en la convección se produce la transferencia de calor por conducción a través de los tubos que llevan el agua de alimentación produciendo de esta manera el vapor saturado.

Se lleva el agua de alimentación dentro los tubos debido a que es más fácil controlar la presión del vapor ya que este se expone a menos área de tubo.

**Fig. 6. Transferencia de calor en una caldera acuotubular**



En la Fig. 6 se observa la transferencia de calor hacia el tubo que lleva el agua de alimentación. Estas calderas se diferencian de las piro-tubulares debido a que las acuotubulares están cubiertas en su interior por una gran cantidad de tubos tanto en el hogar como a lo largo de toda la caldera los cuales son portadores de agua de alimentación tal como se observa en la figura anterior.

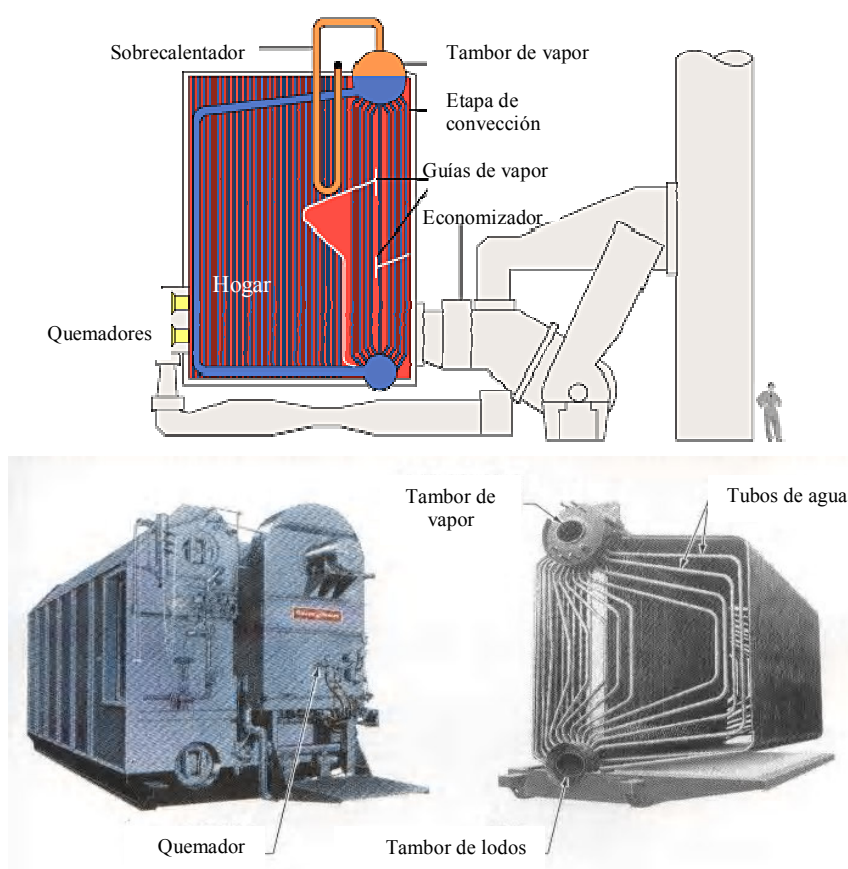
En este tipo de caldera se utilizan varios procesos como sobrecalentadores, calentadores, evaporadores, economizadores, recalentadores de aire y combustible etc., para ser más eficiente el proceso termodinámico, esto se debe a la gran capacidad que posee la caldera de producir una gran cantidad de vapor que puede ser aprovechado para diversos recursos. Las calderas acuotubulares tienen la capacidad de producir vapor sobrecalentado hasta una presión de 2000 psig a 1050 °F.

Las calderas acuotubulares poseen los mismos accesorios que las calderas piro-tubulares sólo que estos accesorios son de gran tamaño y son más resistentes debido a las altas presiones y temperaturas que se manejan en este tipo de caldera. Las partes principales de una caldera acuotubular son:

- El hogar
- Quemadores
- Tambor superior e inferior
- Guías de los gases de combustión
- Tubos interiores de la caldera
- Chimenea

En la figura 7 se presenta una típica caldera acuotubular que presenta las partes mencionadas anteriormente. Básicamente este tipo de caldera utiliza dos o más quemadores, según el diseño de la caldera. Las llamas producidas por los quemadores inician la transferencia de calor en el hogar el cual está recubierto en su interior por varios tubos portadores del agua de alimentación, posteriormente los gases de combustión se redirigen por guías o baffles hacia los tubos de los tambores superiores e inferiores y al final se desecha a la chimenea.

**Fig. 7 Representación de una caldera acuotubular**

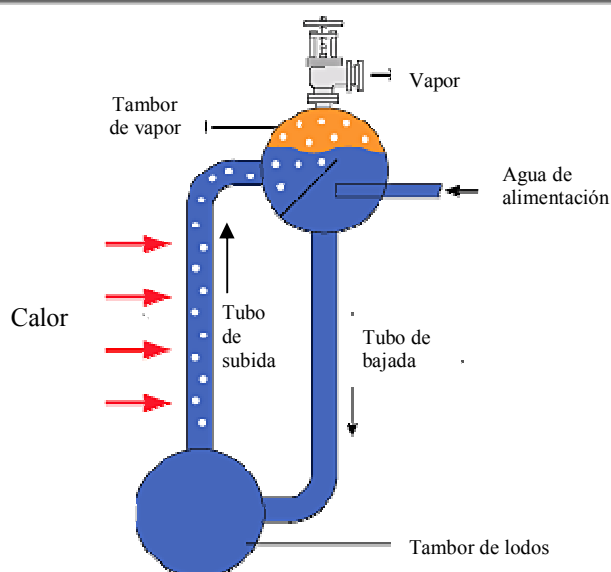


La circulación del agua de alimentación en las calderas Acuotubulares puede ser de dos tipos:

- Circulación natural
- Circulación forzada.

**1) Circulación natural.** Este tipo de circulación se debe a que en una parte de la caldera existe agua que disminuye su densidad con respecto a otra proporción de agua del mismo nivel en la caldera, debido a este efecto el agua de menor densidad circula por los tambores, tubos los cuales dan lugar al circuito.

**Fig. 8 Circulación natural en una caldera acuotubular**

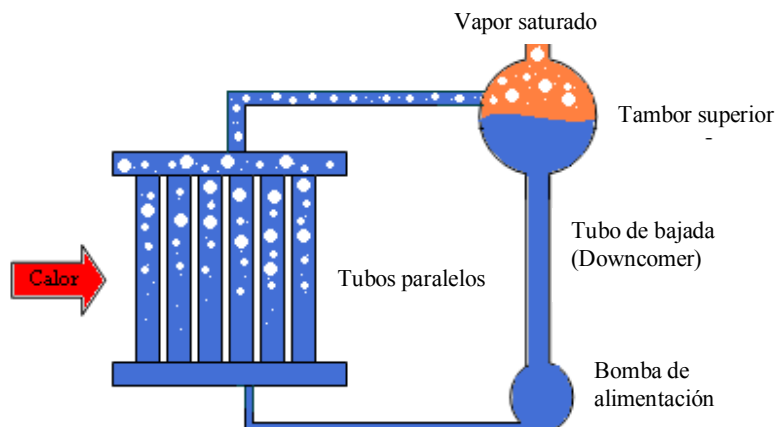


La Fig. 8 muestra con más detalle el proceso de circulación natural, básicamente el tambor superior o de vapor (steam drum) utiliza una bomba que se encarga de suministrarle el agua de alimentación (feedwater), posteriormente esta es llevada al tambor inferior o de lodos (mud drum) a través del tubo de bajada (downcomer), es decir, el agua que viene del tambor superior cae por el efecto de la gravedad al tambor inferior, en este tambor se concentra la mayor cantidad de partículas sólidas ya que el agua se mantiene estancada en este punto y permite que las partículas se depositen en el fondo del tambor, por eso el nombre tambor de lodos.

Posteriormente el agua que se encuentra en el tambor inferior se calienta por los gases de combustión ocasionando la evaporación del agua, en este punto el vapor se considera saturado, debido al cambio de estado del agua, el vapor saturado logra subir del tambor inferior al tambor superior a través del tubo de subida (riser), de esa manera se completa el circuito del agua de alimentación. En el tambor superior se colocan divisores de vapor saturado y agua de alimentación, para evitar que se mezclen, posteriormente en la mayoría de los casos el vapor que sale del tambor superior se vuelve a llevar a la caldera para sobrecalentarlo y producir vapor sobrecalentado tal como se observa en la fig. 7.

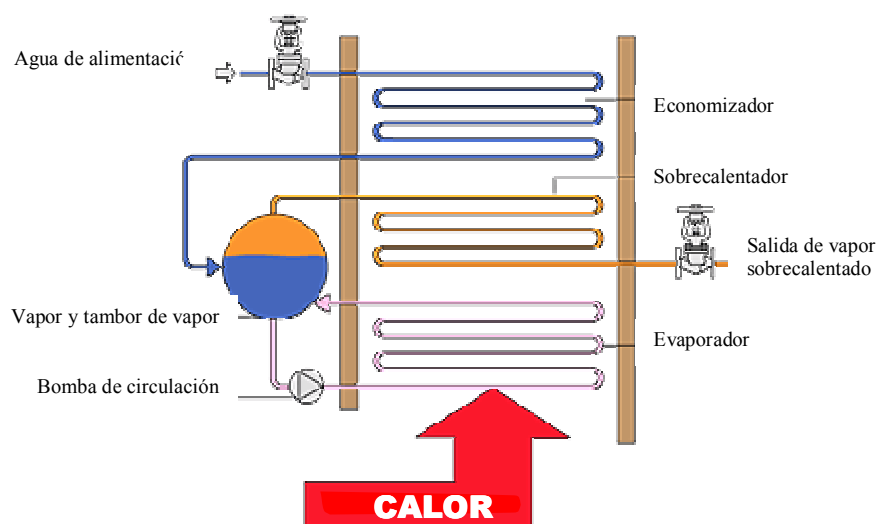
**2) Circulación forzada.** A diferencia de la circulación natural, la circulación forzada no utiliza los cambios de densidad del agua para llevar el vapor al tambor superior, ya que en este tipo de circulación no se utiliza tambor inferior. En la circulación forzada se utilizan bombas que son las encargadas de suministrar el agua que viene de los tambores superiores a varios tubos paralelos que están expuestos a los gases de combustión, tal como se observa en la fig. 9.

**Fig. 9 Circulación forzada en una caldera acuotubular**

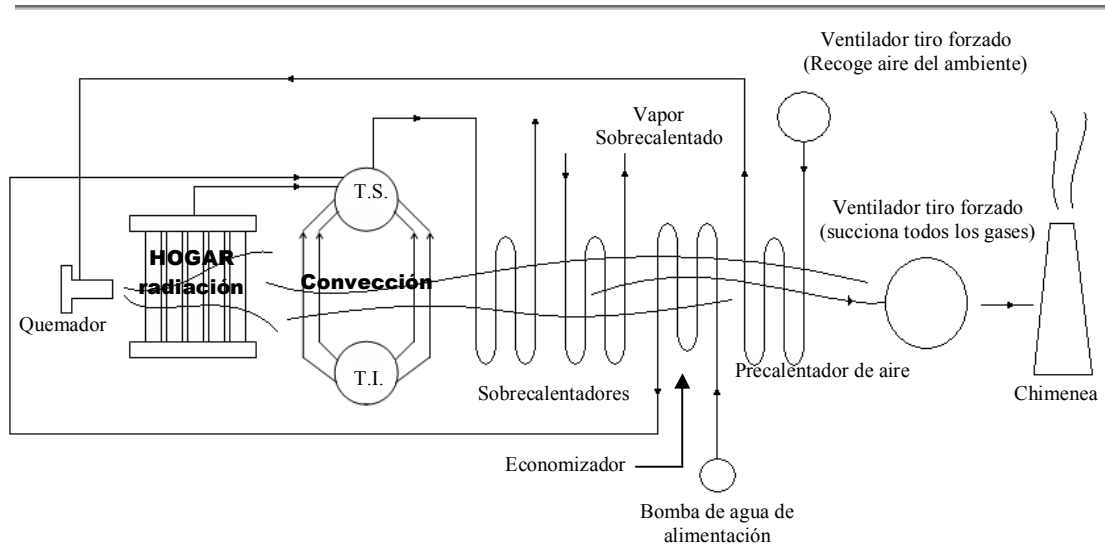


La circulación forzada se utiliza generalmente para presiones por arriba de los 3206.2 psia. En este tipo de circulación los tubos paralelos son de espesores mínimos y diámetros muy pequeños aproximadamente 1 1/4 a 1 5/8 in. La circulación forzada se usa normalmente para calentadores de aire, economizadores, sobrecalentadores y recalentadores. En las calderas acuotubulares se realizan diversos procesos como recalentadores de aire, evaporadores, sobrecalentares etc, para mejorar la eficiencia térmica del sistema, de esta manera se logra reducir algunos costos, en la figura 10 y 11 se presentan diagramas que utiliza estos procesos.

**Fig. 10 Representación de un economizador, evaporador y sobrecalentador utilizando gases extraídos de una turbina.**



**Fig. 11 Representación de sobrecalentadores, precalentadores y economizador utilizando los gases de combustión de una caldera acuotubular**



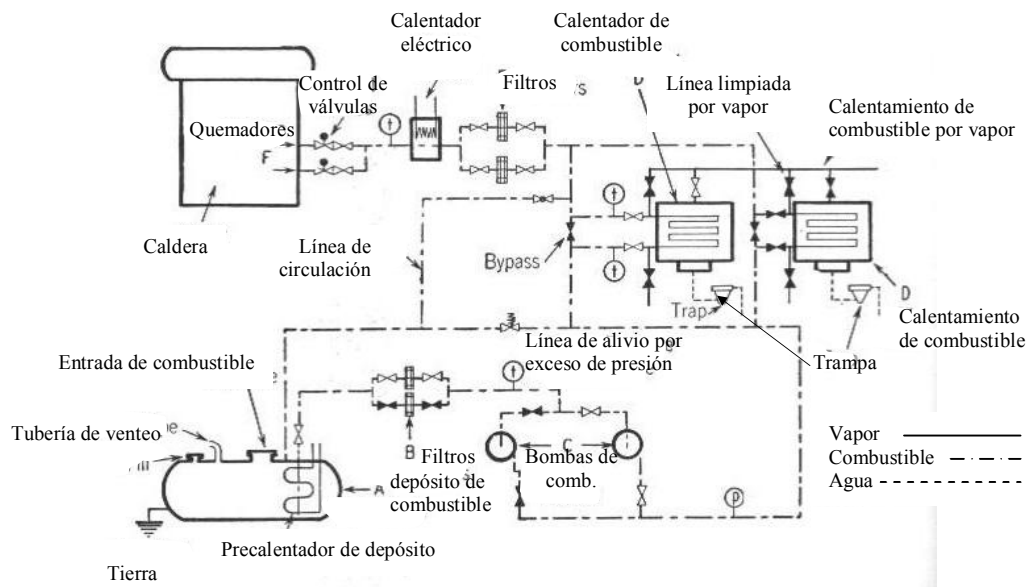
Debido a que las calderas acuotubulares son de gran tamaño esto permite que estas produzcan grandes cantidades de vapor saturado logrando de esta manera la implementación de diversos sistemas termodinámicos que contribuyen a un mejor desempeño del sistema., tal como se muestra en las figuras 10 y 11.

## IV. QUEMADOR

### A. Funcionamiento de quemador

Los quemadores son los dispositivos que mezclan el combustible y el aire del medio ambiente en cantidades y condiciones adecuadas. Generalmente en nuestro medio los quemadores utilizan como combustible bunker-C (Bunker-C Oil) al cual se le han removido ligeros residuos en el proceso de refinamiento. En la fig. 12 se observa el típico sistema de suministro de combustible antes de ser enviado al quemador.

**Fig. 12 Distribución del combustible antes de ser enviado a los quemadores.**



Como se observa en la fig. 12 el combustible fluye del tanque de almacenamiento A (donde se precalienta para modificar su densidad y poder manipularlo) hacia los filtros en B y posteriormente a las bombas de combustible en C, las cuales se encargan de suministrar el combustible a los calentadores en D, posteriormente se vuelve a pasar el combustible calentado por otros filtros en E para luego enviar el combustible a los quemadores en F. Duplicando este equipo se permiten mantenimientos más frecuentes sin tener que apagar la caldera.

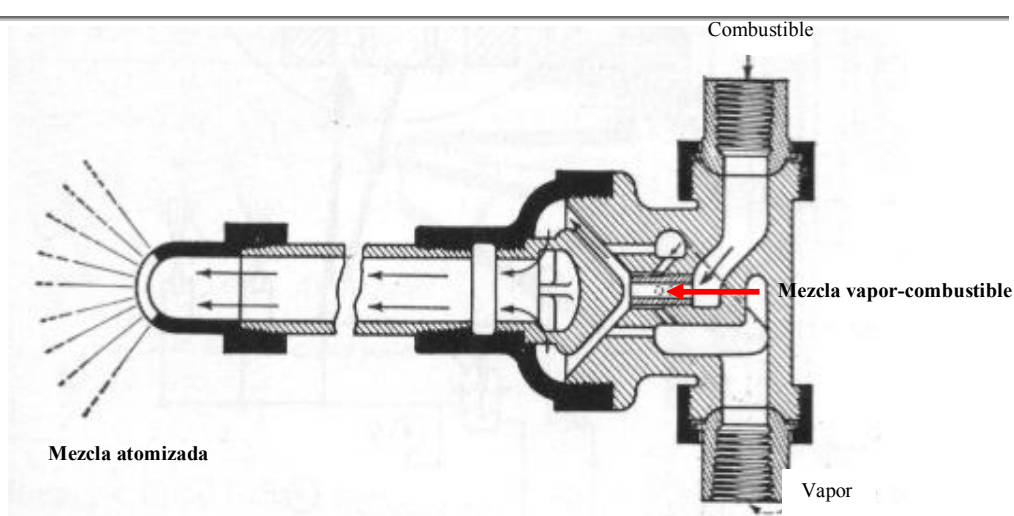
La mayoría de los quemadores atomizan el combustible antes de ser inyectado dentro del horno, este efecto se puede lograr por dos métodos; 1) Por calor de vaporización y 2) Rociador (spray) mecánico. Debido a la gran cantidad del calor necesitado para la vaporización del combustible el primer método es usado muy poco en estaciones centrales. Por lo tanto el segundo método es el más utilizado, ya que al atomizar el combustible este debe de exponer la máxima superficie posible para la reacción de la combustión. El rociador mecánico puede realizarse de diferentes formas:

- Usando un presurizado de aire o vapor para modificar las propiedades del combustible.
- Aplicándole una fuerza al combustible para pasarlo a través de orificios de diámetros muy pequeños.
- Deposición de una capa muy pequeña de combustible por medio de una fuerza centrífuga.

## 1. Tipos de quemadores

a. **Quemador de de aire o vapor presurizado e implementación de orificios.** Los quemadores que atomizan aire y vapor son simples y relativamente baratos, son fáciles de manejar y son capaces de manejar casi cualquier tipo de combustible a cualquier temperatura y viscosidad. El aire comprimido no es muy utilizado en los quemadores debido a su costo.

**Fig. 13 Quemador de mezclado interno**



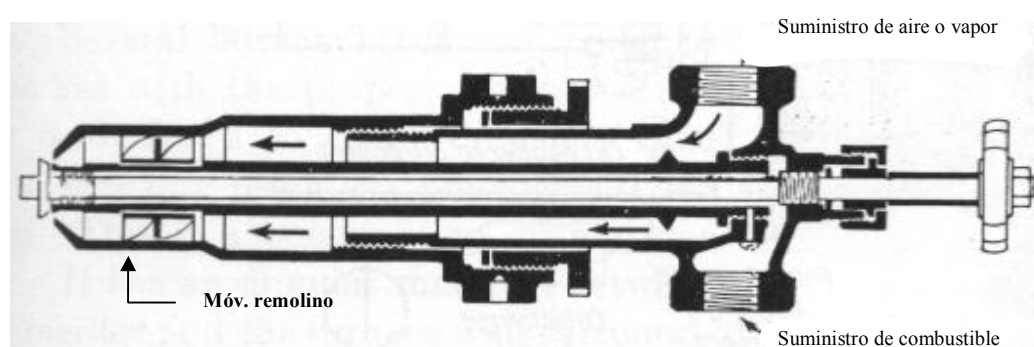
En la Fig.13 se muestra un quemador de mezclado interno que puede utilizar aire o vapor, en este caso se utiliza vapor el cual se mezcla con el combustible antes de ser rociado al horno de la caldera, básicamente la mezcla de vapor-combustible se hace pasar a través de los conductos del quemador como se mira en la figura, sin embargo siempre se envía un poco de vapor a la boquilla para que esta se mezcle con el aire y combustible que se mezcló anteriormente, para luego realizar el rociado al horno de la caldera. Se llama mezcla interna debido a que la mezcla de vapor-combustible se mezcla en la parte interna central del quemador y luego por la misma presión del aire o el vapor este se logra transportar a lo largo de la boquilla del quemador para luego realizar la inyección o el atomizado correspondiente.

**Fig.14 Prueba de llama de un quemador**

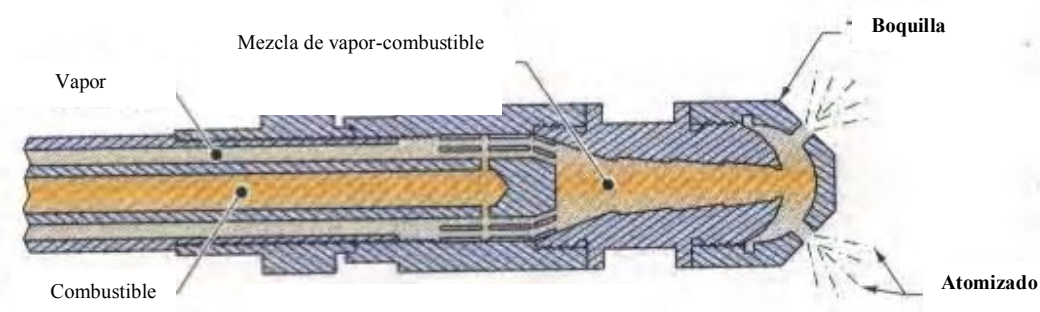


Existe otro tipo de quemador llamado quemador de mezclado externo, el cual se presenta en la figuras 15 y 15a; este tipo de quemador puede utilizar aire o vapor para mezclarse con el combustible. En el quemador de mezclado externo el combustible fluye a través de las extremidades del quemador sin mezclarse con el aire o vapor y utiliza un tornillo que regula el caudal del combustible. Al fluir el combustible hasta la punta del mismo en donde este posee varias guías, que redirigen por medio de un movimiento de remolino o rotatorio el cual contribuye a mezclar el flujo combustible con el flujo de aire o vapor que viene de la otra extremidad del quemador que esta por entrar al horno de la caldera.

**Fig. 15 Quemador de mezcla externa**



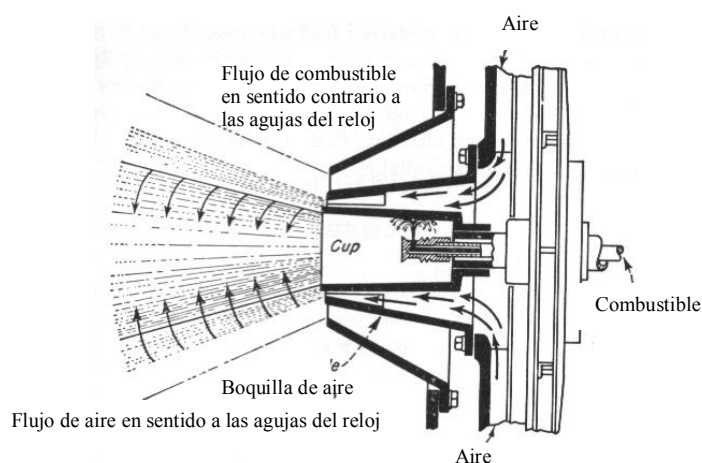
**Fig. 15a Otro tipo quemador de mezclado externo**



El vapor que se utiliza para la atomización debe estar a una presión de 1 a 5 % del vapor generado, generalmente se utiliza por arriba del 2 %. La presión del vapor en el quemador debe estar entre 75 a 150 psig, mientras que el combustible debe estar a una presión entre 10 a 15 psig. Al utilizar presiones entre 75 a 200 psig en el combustible para atravesar orificio de diámetros pequeños se obtiene una mejor atomización. También se utilizan discos que están cerca de la boquilla del quemador para darle al combustible un movimiento rotatorio antes de que atravesase los orificios, esto ayuda a disminuir las pérdidas en el fluido.

**b. Quemador de copa rotatoria.** En la Fig.16 se observa un quemador de combustible de copa rotatoria (rotary-cup) en donde ésta gira a 3500 rpm. En este tipo de quemador el combustible es bombeado hacia el interior de una copa en donde se salpica su superficie interior, creando una capa pequeña sobre la superficie interna de la copa. La fuerza centrífuga mueve la capa de combustible hacia el borde la copa, donde esta se mezcla con la corriente de aire que es descargada por un soplador. Para lograr la mezcla de aire-combustible el flujo de aire crea un remolino a favor de las agujas del reloj mientras que el combustible gira en sentido contrario a las agujas del reloj, este efecto ocasiona que la capa limite en el borde de la copa se rompa y de este modo se realice la mezcla, es importante mencionar que se debe evitar las altas temperaturas en el combustible ya que puede ocasionar su vaporización.

**Fig. 16 Quemador de copa rotatoria**



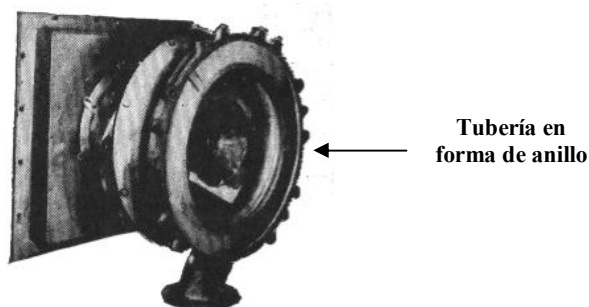
**c. Quemador para combustibles gaseosos o combinados.** Los quemadores de gases naturales a diferencia de los combustibles son más fáciles de manejar; este tipo de combustible puede ser transportado en grandes extensiones de tuberías para posteriormente consumirlo. Para líneas de tuberías de más de 2000 millas el gas es comprimido por arriba de los 1000 psig mientras que para distancias cortas o locales la presión se regula a 200 psig o menos.

En las plantas de potencia el gas se coloca en cámaras de presurizado en donde luego se transporta a tuberías principales. Generalmente se utilizan dos líneas paralelas, en donde cada una regula el flujo gas y luego se vuelven a unir en una sola tubería que es guiada al cuarto de calderas. En el cuarto de calderas se dividen la línea principal y junto a éstas se colocan orificios y las válvulas reguladoras de presión que luego dirigen el gas a los quemadores individuales de cada caldera. En algunos casos se utilizan muchos quemadores a una sola caldera ya que esto mezcla de mejor manera la combinación de de aire y gas.

En la Fig.17 se utiliza un diseño de tubería en forma de anillo de difusión central para el suministra el gas en forma rotatoria el cual utiliza presiones de 2 a 25 psig, este tipo de diseño se utiliza para mezclar el

gas con otro combustible, en donde se utiliza un manifold entre el aire entrante y la pared del horno el cual rodea la apertura del quemador. Gracias al diseño de la tubería los orificios que están posicionados a lo largo del anillo permiten rociar el gas angularmente al aire entrante. La mezcla de aire-gas posteriormente entra al horno para ser calentada para la ignición y luego para realizar el quemado.

**Fig. 17 Quemador para combustibles gaseoso**



**2. Componentes de un quemador y accesorios.** Al obtener la mezcla de aire-combustible requerida, los quemadores utilizan una chispa de ignición la cual proporciona la flama requerida para dar inicio a la combustión; la chispa de ignición puede ser determinada por una gas piloto o por electrodo de ignición en donde estos interrumpen su ignición al establecerse la flama principal en el horno de la caldera.

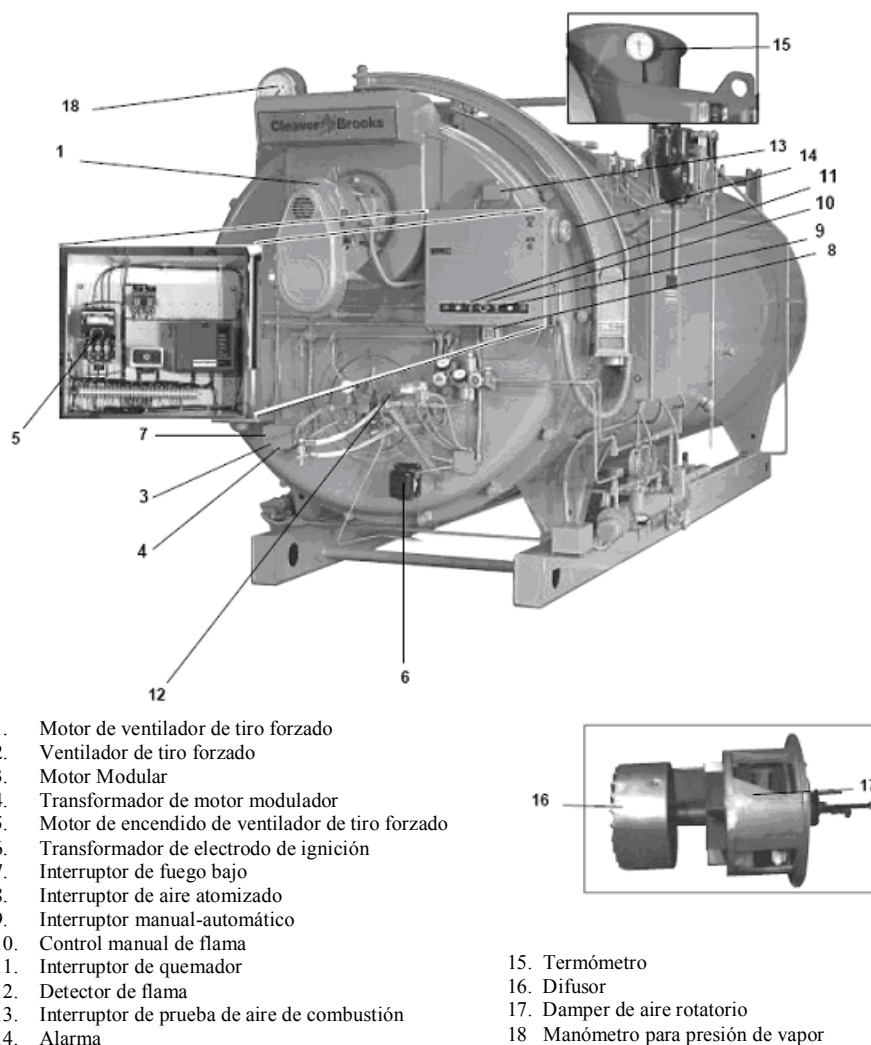
Los quemadores están equipados para quemar combustibles líquidos, gases o la combinación de ambos. Desde que los quemadores comenzaron a utilizar un sólo combustible en sus proceso de combustión los quemadores en la actualidad poseen un switch selector de gas-combustible.

Sin importar el combustible que se este usando el quemador operará a modulación alta (dentro del rango de operación establecido) y luego retorna a la posición mínima de encendido para la ignición. Para calderas de alta presión por arriba del 15 psi se puede adaptar para que trabaje en ambas presiones ya sea en alta o baja modulación, la cual permite que la caldera pueda operar a presiones bajas durante horas de baja carga, sin embargo esto puede ocasionar reducciones en el vapor de salida el cual depende de la baja presión del vapor y del tamaño de la boquilla.

La flama está protegida ya que utiliza un programa que detecta si la flama del combustible y la del gas están funcionando adecuadamente, en caso de pérdida de la flama el quemador se apaga por completo. Este programa proporciona el control necesario para realizar un periodo de prepurgado el cual comprueba el piloto, la flama principal y el periodo de soplado continuo operado por una postpurga de la caldera. Otro control de seguridad es el apagado de la caldera cuando esta trabaja a condiciones de bajo contenido de agua, exceso en la presión de vapor y temperatura. En la figura 18 se representa una caldera de vapor que

utiliza el control común de encendido de gas o combustible, en donde se logra apreciar el típico quemador de brazos mecánicos.

**Fig. 18. Controles comunes para las calderas**

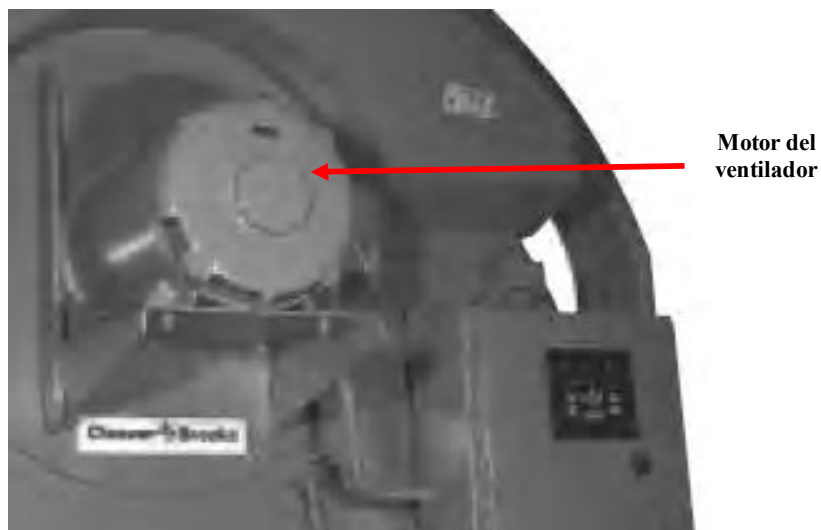


En la figura anterior se observa el sistema común que la mayoría de las calderas utilizan, básicamente este sistema consta de varios componentes que contribuyen a suministro del combustible o gas al quemador. El sistema se divide en varios componentes los cuales son:

**a. Motor del ventilador de tiro forzada (Forced draft fan motor).** Éste proporciona la fuerza necesaria al ventilador, para que pueda producir la corriente aire requerida que posteriormente será enviada a la combustión de la mezcla de aire-combustible, a este motor también se le conoce como motor del soplador, básicamente el motor acciona el ventilador de tipo forzado para proveer al quemador aire de baja presión para la combustión.

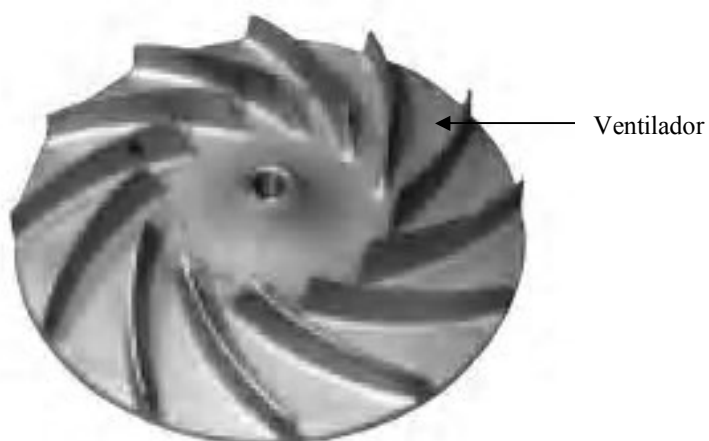
**Fig. 19 Motor del ventilador del quemador**

---



**Fig. 20 Ventilador de corriente forzada**

---



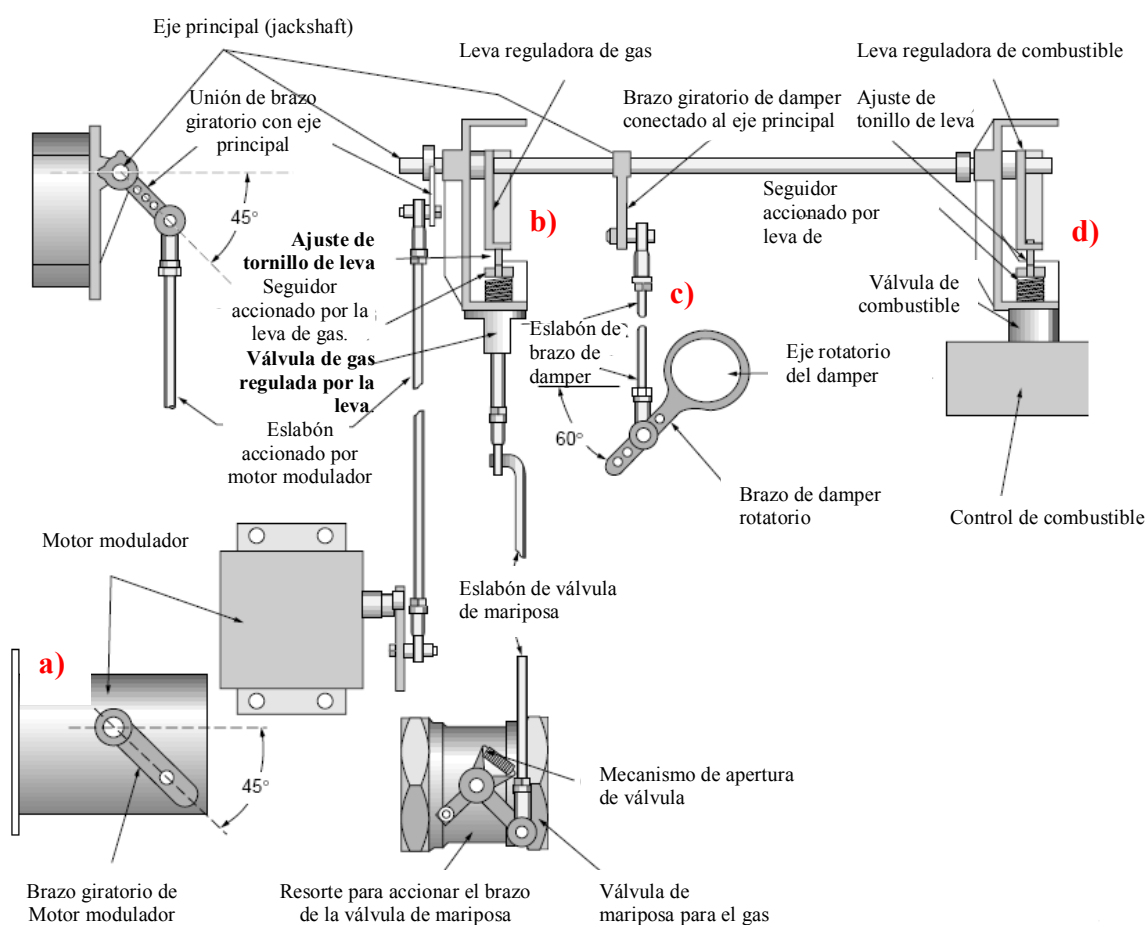
**b. Motor modulador (Modulating motor).** El motor modulador controla la rotación del damper el cual proporciona el control del flujo de aire al quemador, y también controla las válvula del combustible a través de una leva reguladora de flujo, básicamente el motor controla todo lo mencionado por medio de un sistema de eslabonamiento o brazos mecánicos que están conectados por juntas mecánicas, este sistema proporciona la relación de aire-combustible a cualquier condición de carga en la caldera.

Fig. 21 Motor modulador



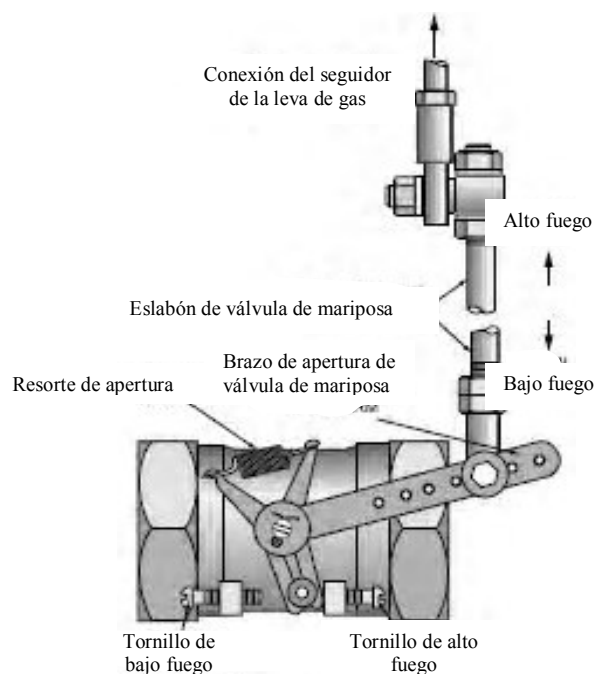
Como se mencionó anteriormente el motor modulador acciona un sistema articulado de eslabones o brazos mecánicos los cuales regulan la entrada de aire y combustible de la caldera. Básicamente este eslabonamiento consiste en juntas rotatorias y juntas de bola la cuales transmiten el movimiento del motor modulador hacia las levas reguladoras de flujo, es decir, las levas que regulan el aire por medio de una damper rotatorio y el combustible. En la figura 22 se muestra un esquema del sistema, sin embargo, éste es para combustible combinado.

Fig. 22 Sistema articulado para un combustible combinado



Básicamente en la figura 22, se observa un sistema de eslabonamientos para combustibles combinados (gas y combustible), el funcionamiento se da en tres etapas: a) Con el motor modulador se proporciona la rotación necesaria por medio de una señal electrónica que es proporcionada por un control modulador, en la figura anterior se observa el brazo del motor que posee el movimiento de rotación, donde se une con un eslabón que transforma el movimiento rotacional a movimiento lineal, el extremo de este eslabón se conecta con un brazo giratorio que se conecta a un eje principal (jackshaft) que conecta a la leva reguladora de gas, aire y combustible; en b) el eje principal acciona la leva moduladora de gas que a su vez acciona al seguidor de la leva en donde éste acciona la válvula de mariposa del gas que controla el flujo de gas. En la figura 23 se observa la conexión de la leva de moduladora de gas.

**Fig. 23 Válvula reguladora de gas con sus respectivos eslabones o brazos.**

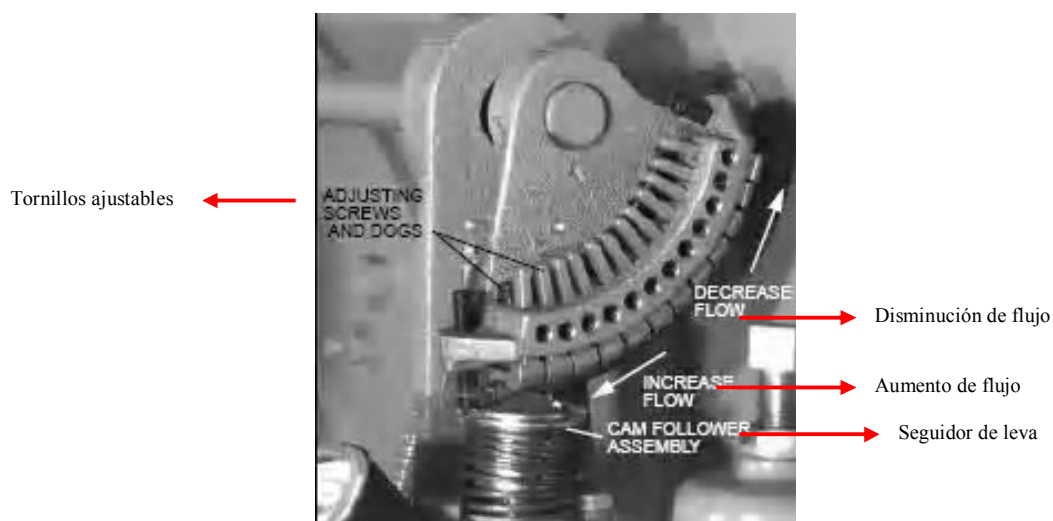


En la figura anterior se observa el eslabón que acciona la válvula de mariposa, en donde se puede trabajar a baja o alta flama. En c) siempre por el moviendo del eje principal, se acciona otro eslabón que su vez acciona un brazo rotatorio que se conecta al damper de aire para regular la relación de aire con respecto a los dos combustible. En d) se regula el flujo combustible por medio de una leva reguladora que se conecta a seguidor que regula la apertura de la válvula que suministra el combustible.

**1) Leva reguladora de combustible.** La leva se utiliza para modificar el flujo de combustible, básicamente este dispositivo funciona con una seguidor que acciona la válvula reguladora de combustible. La regulación de combustible es accionada por varios tornillos (screws) ajustables o “dientes” que son los encargados de accionar el seguidor, básicamente el incremento se da por medio del ajuste de los tornillos,

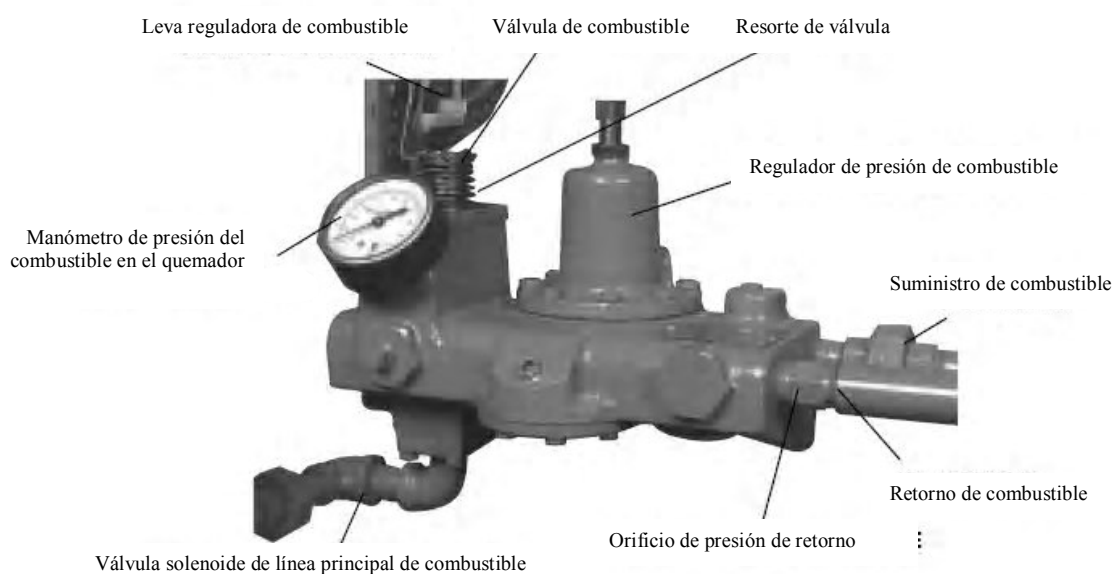
cuando se desea incrementar flujo de combustible los tornillo se gradúan atornillado en sentido contrario a las agujas del reloj y cuando se desea disminuir el flujo se atornilla en sentido a las agujas del reloj. Básicamente la razón de flujo más grande se da cuando el seguidor de la leva se encuentra lo más cerca posible al eje principal (jackshaft). En la figura 24 se demuestra le leva reguladora de combustible.

**Fig. 24 Leva reguladora de combustible**



Se utiliza un controlador de combustible que esta conformado por in dispositivo que en conjunto posee manómetros para medir la presión del combustible, reguladores, y válvulas que son requeridas para regular el flujo de combustible. En la figura 24a se observa el controlador de combustible.

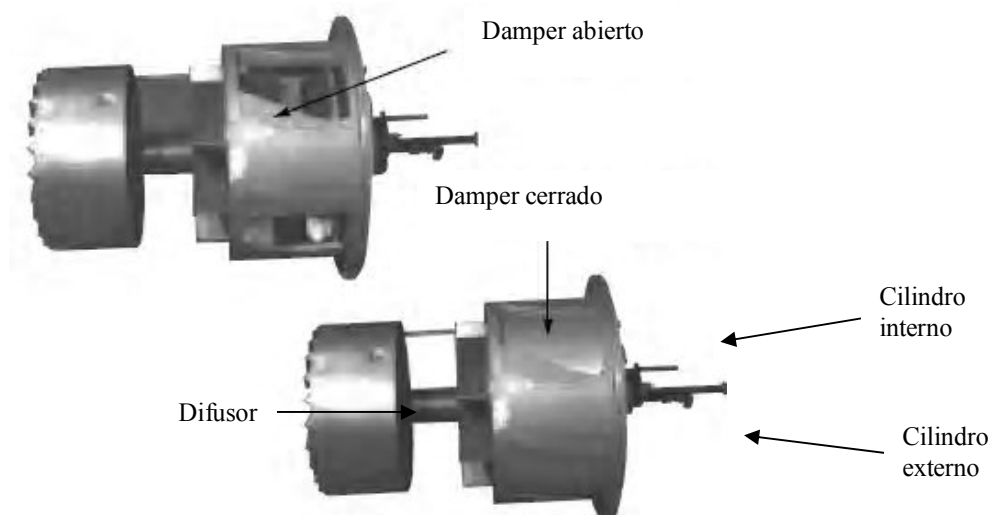
**Fig. 24a Controlador de combustible ligero**



En la figura 24 se observa el típico controlador de combustible el cual funciona por una manómetro de combustible el cual determina la presión del mismo, una válvula solenoide para controlar el flujo principal de combustible, dos orificios para el retorno y suministro de combustible, un válvula reguladora de presión la cual está fijada a una presión de operación y una válvula reguladora de presión.

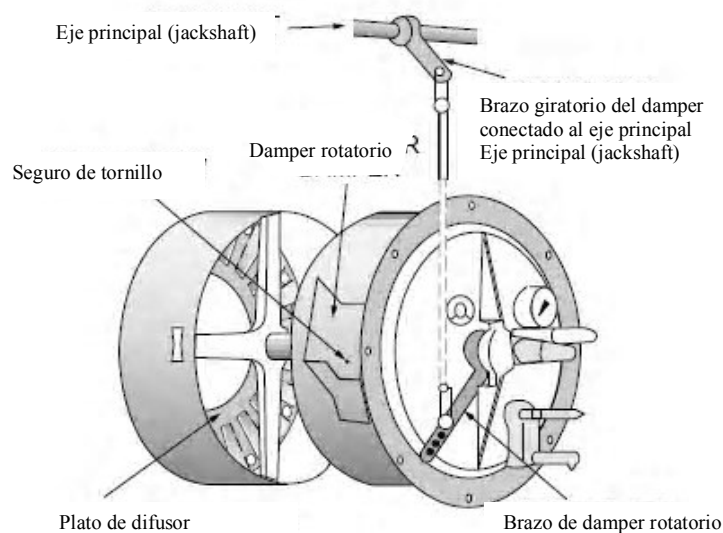
**c. Difusor y damper rotatorio de aire.** El difusor es un plato circular que se coloca en el hogar y esta al final del quemador, básicamente el difusor realiza el movimiento de torbellino al aire de combustión antes de que este entre en contacto con la flama, esto hace que la mezcla de aire-combustible sea lo más homogénea posible y la más eficiente. El damper del aire provee el flujo de aire que viene del ambiente, este dispositivo provee el control exacto de aire en proporción al combustible para diferentes demandas de carga de vapor. El damper consiste en dos cilindros concéntricos con aperturas; el cilindro externo se mantiene fijo, mientras que el cilindro interior rota bajo el control del motor modulador para variar el tamaño de las aperturas por medio del traslape de los cilindros. En la figura 25 se observa en detalle.

**Fig. 25 Damper y difusor**



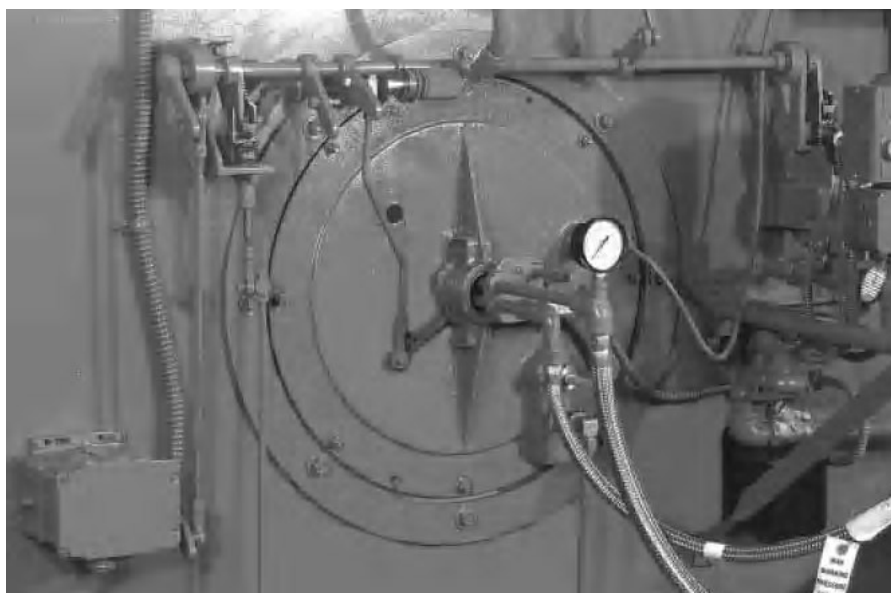
En la figura 26 se observa el funcionamiento del damper, el cual es accionado por el eje principal (jackshaft) que a su vez mueve el brazo rotacional proporciona el movimiento lineal al cilindro interno del damper en donde se regula el tamaño del traslape de los cilindros.

**Fig. 26 Damper rotatorio de aire**



Es importante mencionar que el damper funciona como la base del quemador, es decir, que el damper se utiliza para sostener el quemador ya que este se inserta en la parte de en medio del damper.

**Fig. 27 Eslabonamiento y quemador instalado en una caldera.**



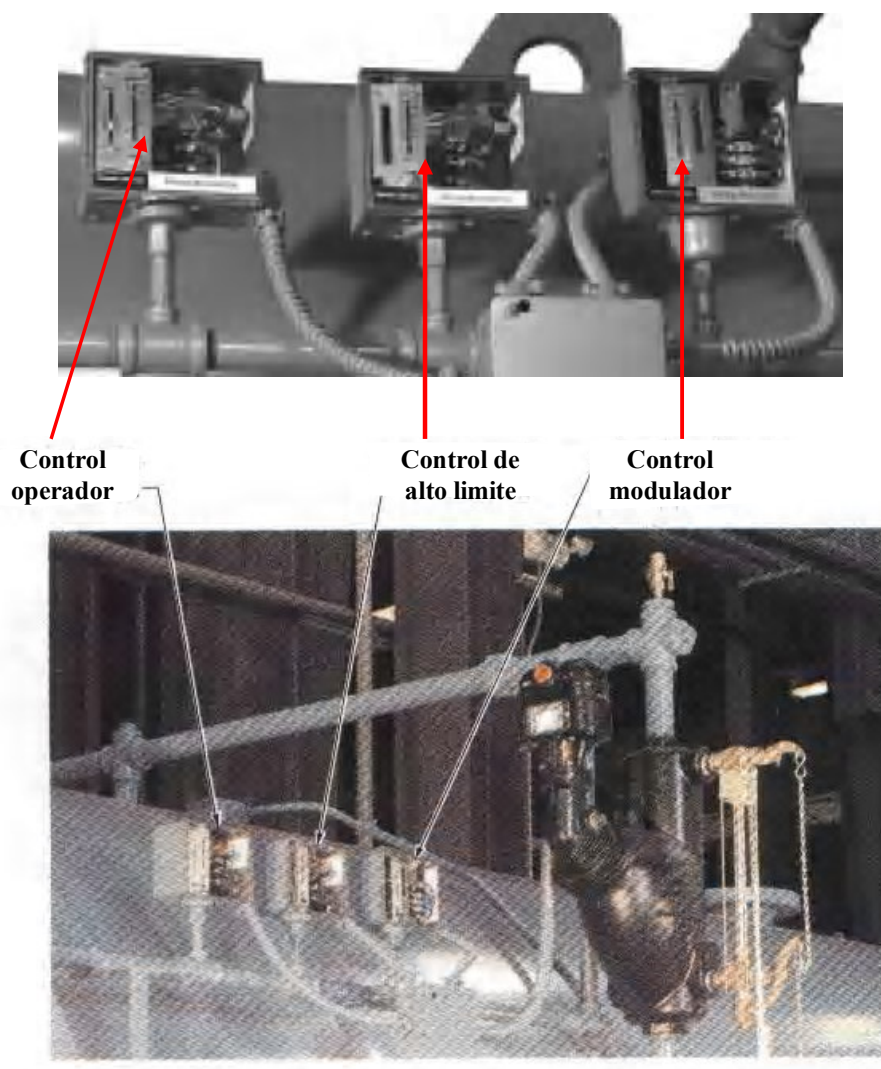
**d. Controles operadores del quemador.** Los controles operadores del quemador de una caldera consisten en tres controles separados los cuales son:

**1) Control de límite operador (Operating limit control).** Un control operador es un controlador de presión que fija y acciona el quemador para iniciar la secuencia de encendido cuando es necesario vapor a presión y para apagar la secuencia de encendido cuando la presión del vapor buscada ha sido alcanzada. Con este control se ajusta el rango de presión o temperatura donde se quiere trabajar la caldera, es decir, presión/temperatura de arranque y presión/temperatura de desconexión.

**2) Control de límite alto (High limit control).** Este controlador fija el vapor a presión en donde el quemador se apaga automáticamente si el controlador operador falla. El controlador de alto límite debe estar fijado por arriba de la presión o temperatura de operación para evitar apagados innecesarios de la caldera. Este control se monta en la misma línea de vapor o agua caliente en la que están el controlador de límite y el control modulador.

**3) Control modulador.** Es un controlador de presión o temperatura que trabaja con el control operador para controlar la razón de flama en el quemador. La razón de flama en el quemador es modulada de fuego bajo a fuego alto para cumplir con la demanda de vapor. Fuego alto en cuando la razón de combustión, utiliza la mayor cantidad de combustible en el hogar. El control operador puede apagar o encender el quemador según la demanda de vapor, ya que puede regular la razón de flujo de la mezcla de aire-combustible en el quemador, por medio de un motor modulador que esta conectado al sistema de eslabonamiento del quemador. En las figura 28 se observa los tres controles instalados en una caldera.

**Fig.28 Controles operadores de vapor**



## V. SISTEMA POSICIONADOR PARALELO

### A. Sistemas posicionador paralelo

Un sistema posicionador paralelo contribuye a un mejor desempeño de las calderas ya que se posee un control más detallado del consumo de combustible; con un control de posicionamiento se logra mejor la relación de aire-combustible, y por ende se logra reducir el consumo de los combustibles derivados del petróleo ya que en la actualidad tiene un costo elevado. Básicamente la relación de aire-combustible es controlada por el sistema utilizando las señales de entrada del controlador de razón de encendido (firing rate control), del sensor de temperatura del agua, y del controlador de manejo del quemador para controlar la relación entre el combustible, el flujo de aire, y el gas de recirculación (si es usado) por medio de modulación en el quemador.

**1. Componentes de un sistema posicionador y su funcionamiento.** Normalmente el sistema posicionador consta dos a cuatro actuadores de control de posicionamiento independiente los cuales son comandados por un control general. Estos actuadores sustituyen a los dispositivos mecánicos que se utilizan en los quemadores de calderas. Los componentes de un sistema posicionador son los siguientes:

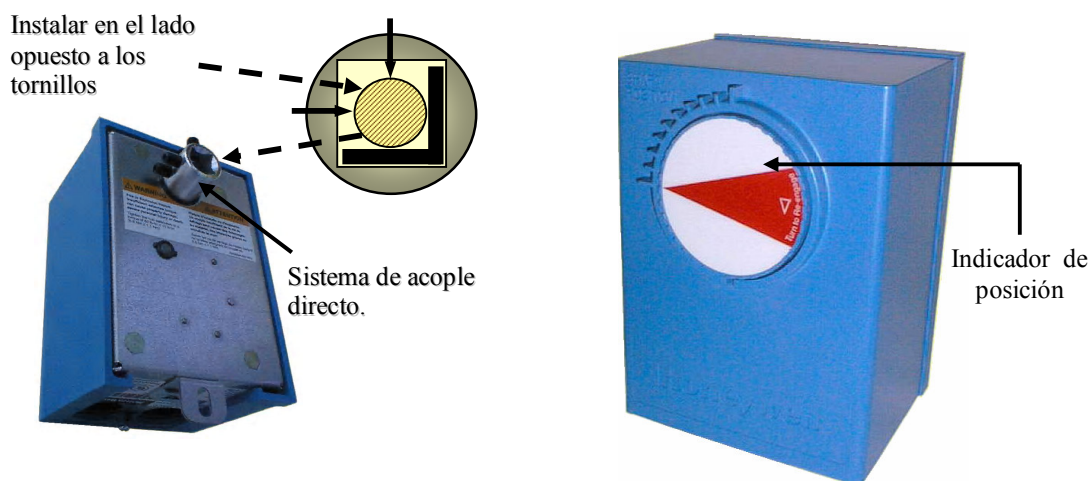
**a. Actuadores.** Los actuadores son los encargados de realizar las acciones mecánicas como regular el flujo de aire, combustible, gas o ambos en el quemador. Básicamente los actuadores sustituyen a todos los dispositivos mecánicos como el eslabonamiento o brazos mecánicos, las levas reguladoras de combustibles, y al motor modulador. En este caso el motor modulador se sustituye por un controlador de la relación de aire-combustible el cual se explicará más adelante. Básicamente establecen la proporción apropiada de aire-combustible para las diferentes demandas de carga de vapor.

Normalmente estos actuadores poseen una torque de 100 lb-in para controlar el aire de combustión, las válvulas de combustible y la recirculación de gas combustible (FGR) si lo tienen. Básicamente se utiliza un actuador por cada dispositivo mecánico, por ejemplo se utiliza un actuador para el control de aire de combustión por lo tanto se coloca uno en el damper, para controlar el combustible se coloca un actuador en el sistema controlador de combustible el cual se sustituye por la leva reguladora de combustible, y si se tiene el ingreso de otro combustible como gas se coloca otro actuador a la válvula reguladora del gas el cual sustituye a la leva reguladora de gas.

Al utilizar estos actuadores se elimina por completo el sistema de eslabonamiento (jackshaft) mostrado en la figura 22, el único eslabón que se mantiene es el del damper. Los actuadores tienen un buen desempeño ya que poseen potenciómetros de precisión que retroalimenta al controlador de aire-combustible, ya que se modifica constantemente la relación aire combustible del quemador.

En la figura 29 se observa el típico actuador que se utiliza en sustitución de los elementos mecánicos, básicamente los actuadores son sistemas de automatización ya que es controlado por un sistema principal de modulación.

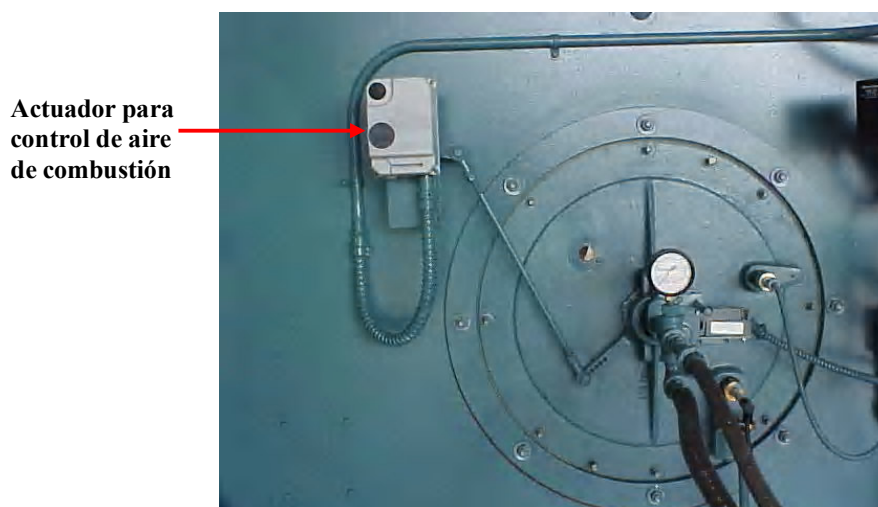
**Fig. 29 Representación de actuador en vista frontal y trasera.**



La precisión de estos actuadores es normalmente de  $0.1^\circ$  grados, en la figura de arriba se observa el eje de salida del actuador el cual tienen una salida de montaje de  $5/16''$  a  $3/4''$  de pulgada, generalmente estos actuadores poseen una reacción bastante rápida, aproximadamente giros a  $95^\circ$  en 30 segundos. Estos actuadores son compactos y poseen en su exterior la indicación de la posición del actuador. El movimiento giratorio de los actuadores es proporcionado por señales electrónicas proporcionadas por un control general.

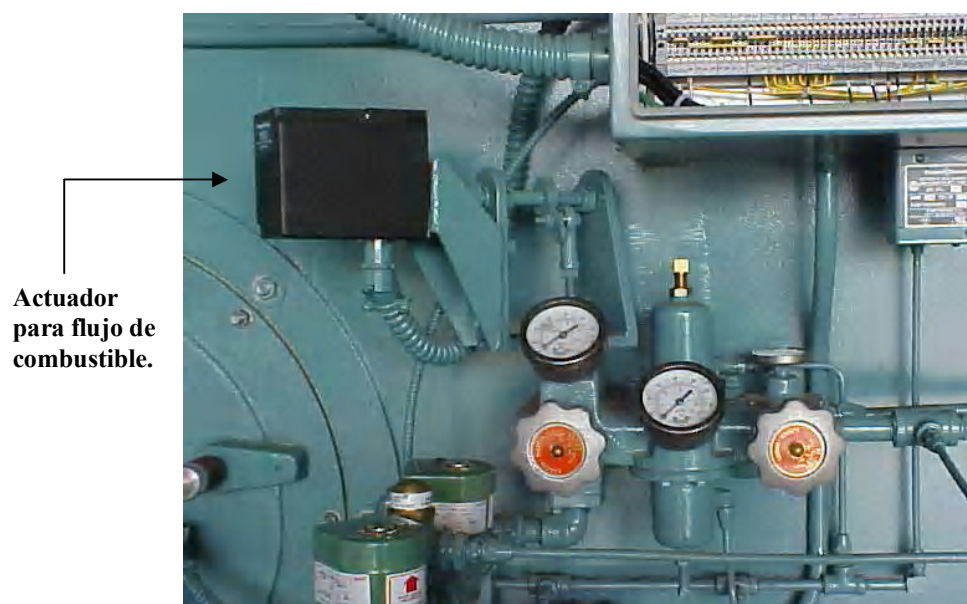
1) **Funcionamiento e instalación de actuadores.** La instalación de los actuadores es bastante sencilla ya que no se necesitan calibración de ningún tipo, pero es importante proteger los actuadores de excesivas temperaturas, como también de vibraciones utilizando un acople de vibración.

**Fig. 30 Actuador para aire de combustión.**



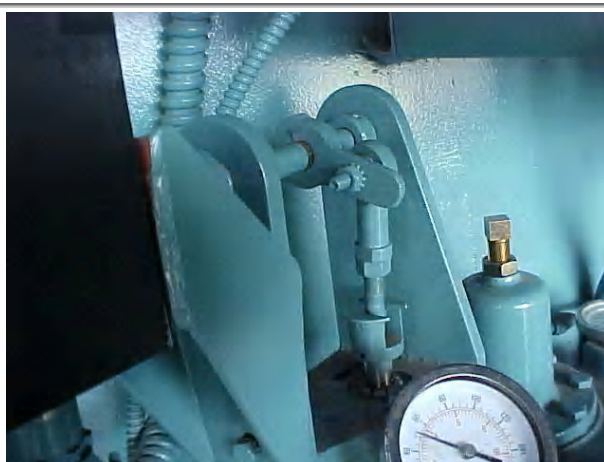
Como se observa en la figura 30, se utilizó un actuador para la regulación de aire del damper, básicamente este actuador acciona el brazo rotatorio del damper proporcionando la apertura necesaria para el ingreso de aire al quemador. El actuador se adapta fácilmente a la varilla del damper, en caso de no adaptarse, se debe colocar el acople adecuado. Al utilizar este actuador se evita usar el sistema de eslabonamiento y, por lo tanto, se tiene una excelente precisión en el flujo de aire.

**Fig. 31 Actuador para flujo de combustible pesado.**



En la figura 31 se utiliza un actuador o servomotor para regular el flujo de combustible pesado, en donde se sustituye por la leva reguladora de flujo; como se observa en la figura de arriba el actuador está conectado a la válvula reguladora de flujo por medio de un brazo giratorio que proporciona la rotación adecuada para el incremento o decremento del flujo de combustible. En la figura 32 se observa con mayor detalle la válvula reguladora de combustible la cual sustituye a la leva reguladora de combustible.

**Fig. 32 Válvula reguladora de combustible.**



En caso que el quemador utilice combustible combinado, el sistema posicionador puede utilizar otro actuador como el que se utiliza para el combustible. La instalación del actuador de combustible es igual de sencillo como el actuador de aire de combustión ya que lo único que se necesita es que el eje del actuador se adapte al brazo rotacional donde va conectado a la varilla de la válvula reguladora de combustible en caso de no adaptarse se debe de seleccionar el acople adecuado.

**b. Controlador de actuadores y su funcionamiento.** Éste es un microprocesador que se basa en el control directo y simultáneo de Actuadores Universales de Posicionamiento Paralelo UPPAs por sus siglas en inglés, que se basan en la entrada del control de razón de encendido (firing rate control), los controles de operación y sus límites, en el control de seguridad de la flama primaria y/o en un sistema desplegado en un pantalla. Básicamente el controlador puede manejar dos perfiles de combustibles y mantener la relación de aire-combustible en optimo estado para el quemador y de esta manera maximizar la eficiencia del quemador y minimizar el uso de combustible y emisiones.

Es importante en mencionar que el controlador también posee el historial de operación y puede demostrar el estado de la potencia generada, al no funcionar un actuador el controlador lo detecta y lo despliega como un mensaje de error o como un anuncio, por medio de led's.

El controlador de actuadores puede trabaja a distintos voltajes ya sea 120V o 240V +10 % -15 % 50/60Hz., la temperatura de operación puede ir de 40 °F (4°C) a 140°F (60°C), también puede trabajar a vibraciones de 0 a 0.5 g continuo y como se mencionó anteriormente puede trabajar hasta cuatro canales distintos los cuales son:

- ❖ De uno a dos combustibles
- ❖ Aire combustión
- ❖ Una canal de uso flexible (FGR, aire secundario, válvula de combustible modulante secundaria)

Gracias al controlador se puede manejar dos curvas independientes de combustible las cual se utilizan para establecer el consumo de los mismos, la curvas pueden tener 3 a 24 puntos por curva lo cual hace un análisis más preciso en el consumo del flujo de combustible y del flujo de aire. Con el controlador se logra establecer posiciones programables como; arranque, mínima y máxima modulación, modulación automática o manual, selección de combustible, purga y espera.

**Fig. 33 Controlador de actuadores por sistema de led's**



Como se observa en la figura anterior el controlador utiliza led's para establecer el funcionamiento de los actuadores, el led de Alimentación de color verde establece el estado de operación y anuncia el código de falla, el led de Alarma de color rojo anuncia condición de alarma, y los led's anaranjados indican el estado de los motores de los actuadores.

**c. Control de seguridad de flama primaria y su funcionamiento.** El control de seguridad de flama primaria consiste en establecer los parámetros adecuados para el funcionamiento correcto del quemador a determinada demanda de vapor; para iniciarse este procedimientos se debe establecer la secuencia de arranque, esto se realiza modulando la relación de aire combustible antes de encender el quemador, durante este etapa se regula el alto fuego y el bajo fuego, es decir, regular la cantidad de flujo de aire en la mezcla de aire-combustible, después de obtener la mezcla adecuada se pasa a la etapa de encendido del quemador, posteriormente se verifica la flama adquirida en el hogar por medio de un sensor

que luego devuelve la señal al control de seguridad de flama y éste establece que los parámetros de flama se cumplan, sino éste envía un señal para aumentar la flama hasta obtener parámetro adecuada de flama. El proceso anterior se modula continuamente debido a la demanda de vapor que se establecerá en la caldera.

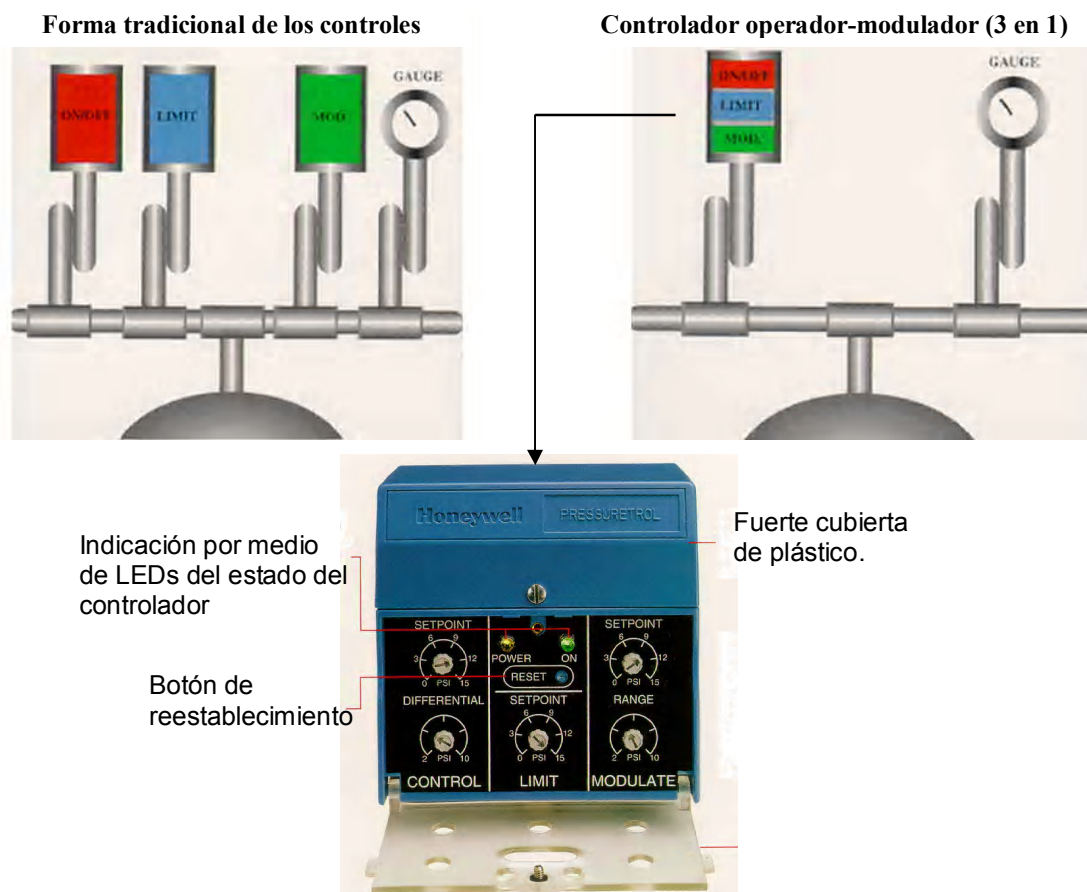
**Fig. 34 Control de seguridad de flama**

---



**d. Control de operación-modulación.** Básicamente este controlador combina el control de razón de encendido (control de operación), los límites de operación, el apagado y el encendido del control, y el control modulador. Este controlador sustituye por completo a los tres controladores que normalmente utilizan las calderas, en la figura 35 se observa la diferencia del controlador.

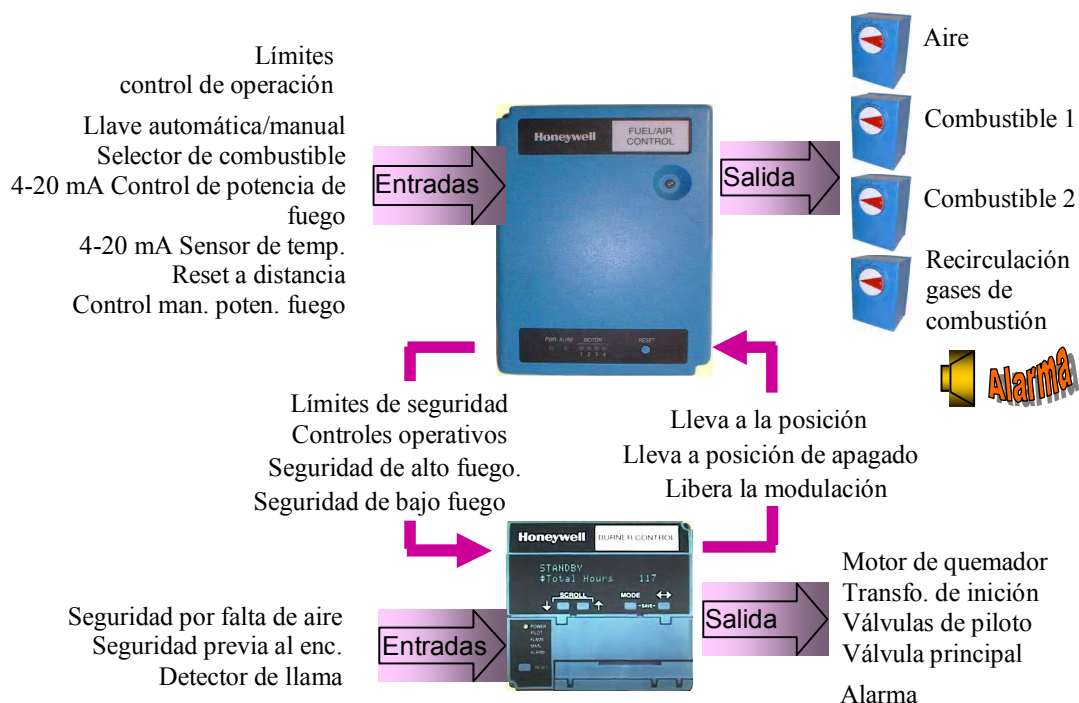
**Fig. 35 Control de operación y modulación (3 en 1)**



Como se observa en la en la figura anterior el controlador de operación-modulación es un dispositivo que estará sustituyendo en el futuro a todos los controles operadores y moduladores de las calderas ya que este sistema es más práctico y más sencillo. Lo rangos de presión pueden ser de 15, 30 y 300 psi. Este dispositivo ha sido aprobado por ASME CSD-1 entre otras.

Las terminales de este dispositivo son de fácil acceso y están claramente indicadas, se puede observar el múltiple de vapor que alimenta que alimenta el control y el límite alto de presión, este control es necesario para la operación en aplicaciones de caldera con el sistema de de relación aire combustible.

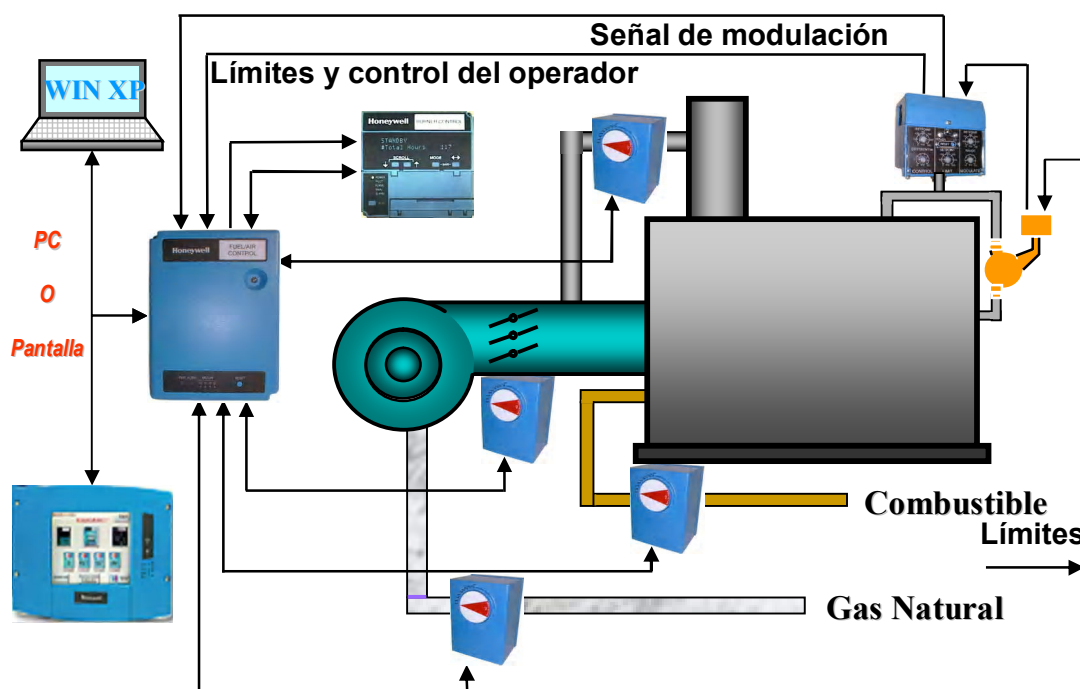
**Fig. 36 Relación entre el controlador de actuadores y control de seguridad de flama**



Como se observa en la figura 36 tanto el controlador de seguridad de flama como el controlador de los actuadores son básicos para el funcionamiento del quemador ya que por medio de ellos se logra establecer la relación de aire-combustible necesaria para la demanda de vapor.

En las figura 37 se observa de forma general la utilización del sistema posicionador, básicamente todo inicia en los límites de los combustibles, es decir, la cantidad de combustible con la que se cuenta a partir de este dato se lleva la señal a un sensor que está situado en el medidor del nivel de agua para verificar que el nivel de agua sea el óptimo para iniciar el encendido del quemador, posteriormente la señal es enviada al control operador-modulador el cual envía los parámetros necesarios para hacer funcionar los actuadores por medio del controlador de actuadores, el controlador de los actuadores recibe la señal del control operador-modulador, es decir, la señales de modulación, los límites, y del control operador, posteriormente el control de actuadores envía una señal a el control de razón de encendido (firing rate control) donde éste compara los parámetros, para luego reenviar la señal al controlador de los actuadores y posteriormente que este le envíe la señal a los actuadores para que estos accionen las válvulas necesarias. El control de actuadores puede ser conectado a una pantalla o una PC para tener el control del sistema desplegado en pantalla.

Fig. 37 Esquema de sistema posicionador paralelo



Para tener un mejor control de la relación de aire-combustible en algunos casos se coloca un sensor en la salida de los gases de escape y un sensor en la entrada del aire de admisión, el sistema posicionador hace una ecuación en la que utiliza las variables anteriores y determina la relación exacta de aire y combustible, la cual se utiliza en el controlador de actuadores, esto análisis hace que la caldera utilice la cantidad exacta de combustible y de esta manera se da el ahorro del mismo. Otro factor que influye en el ahorro de combustible es en la demanda de carga de vapor, porque cuando se tiene una baja demanda los controladores detectan este parámetro por lo tanto el quemador trabaja a carga de fuego bajo, si la demanda crece el quemador trabaja a fuego alto. Esto no lo hace una caldera que posee el sistema controlador paralelo por lo contrario gasta el combustible innecesario.

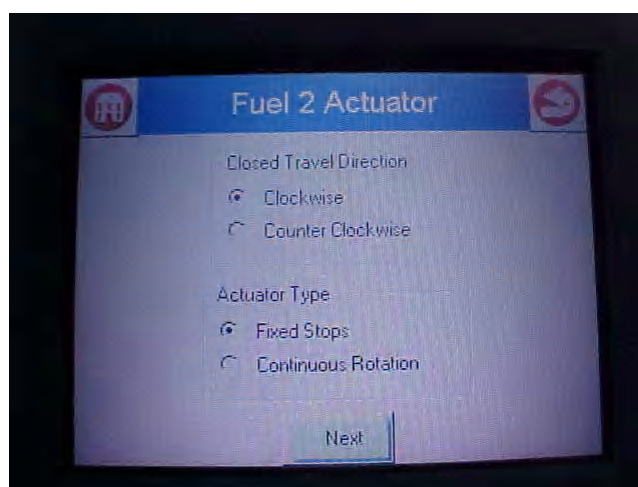
**e. Pantalla de despliegue.** Como se mencionó anteriormente el control del sistema se puede desplegar en una pantalla tipo “touch screen” o en una PC, en la que se demuestra el funcionamiento del sistema posicionador. En la figura 38 se presenta la etapa de selección de combustibles, es decir, si la caldera trabajará con uno o dos combustibles, posteriormente en la figura 39 se presenta la configuración de rotación y el tipo de actuador, es decir, si la rotación del eje del actuador es en sentido o en contra a las agujas del reloj y si es de movimiento continuo o de espera, después se presenta la configuración de apertura de las válvulas en la figura 40 se muestra la apertura máxima y la mínima de los actuadores,

también se observa la variación de la apertura, es decir, la variación por grados que es fijada por el operador, al igual que en las aperturas

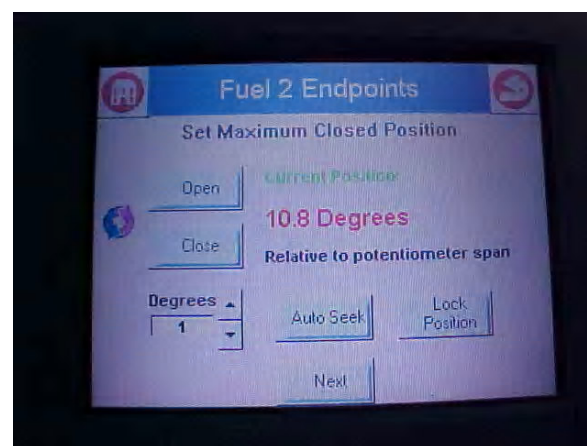
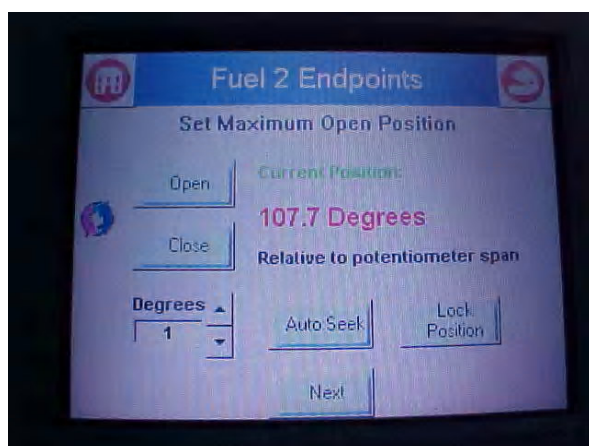
**Fig. 38** Despliegando de selección de combustible y configuración



**Fig. 39** Configuración de actuador

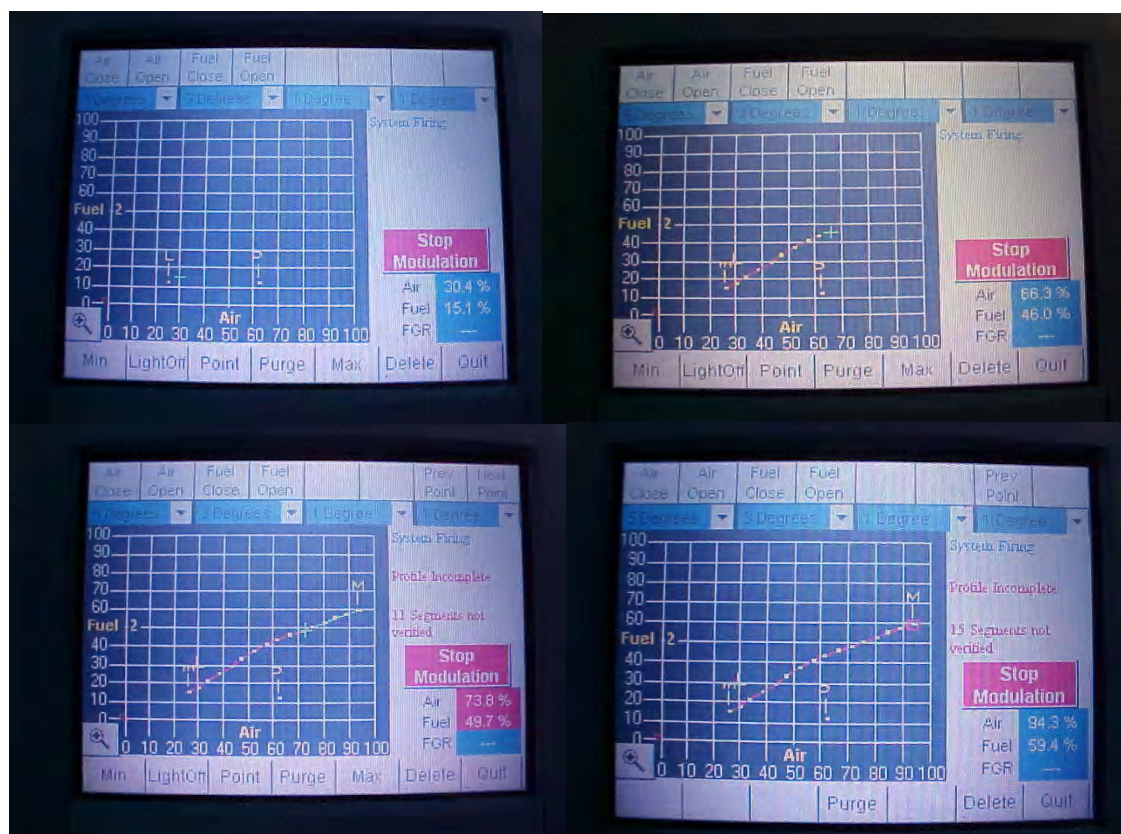


**Fig. 40** Ajuste de apertura de los actuadores.



Después de establecer la posición de los actuadores es necesario establecer la curva de aire-combustible que se establece por el sistema controlador paralelo, en la figura 41 se observa la elaboración de la gráfica en la pantalla del controlador, generalmente esta gráfica se modifica de tal forma que sistema la hace proporcional al consumo del aire con respecto a combustible con esto se logra una mezcla precisa.

**Fig. 41 Elaboración de gráfica aire-combustible**

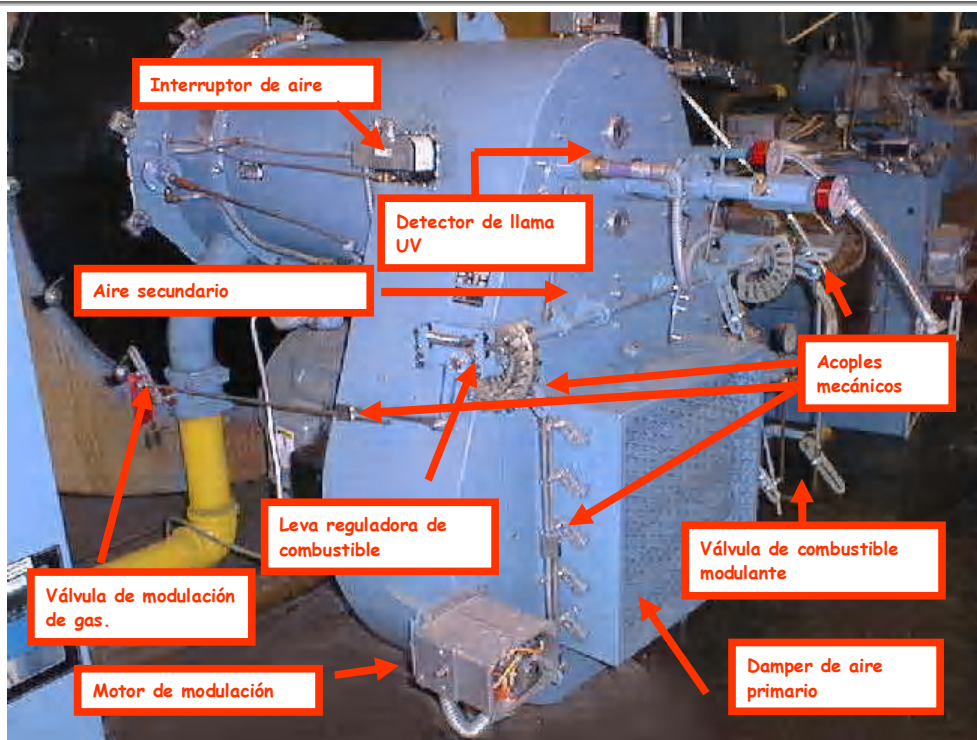


Tal como se observa en la figura 41 la elaboración de la curva de aire-combustible es de gran ayuda para ver el consumo de aire con respecto al combustible, es importante mencionar que esta gráfica generalmente se hace antes de correrla en la caldera; al finalizar esta gráfica se puede modificar su curvas haciendo que el combustible se pegue los más posible a las curvas de aire con los parámetros del operador (persona), mientras se hace el ajuste se logra observar en la esquina inferior derecha de cada pantalla el porcentaje de aire y combustible utilizado. Al obtener la gráfica ideal se puede grabar en el sistema para luego hacerla funcionar o se puede correr si se desea.

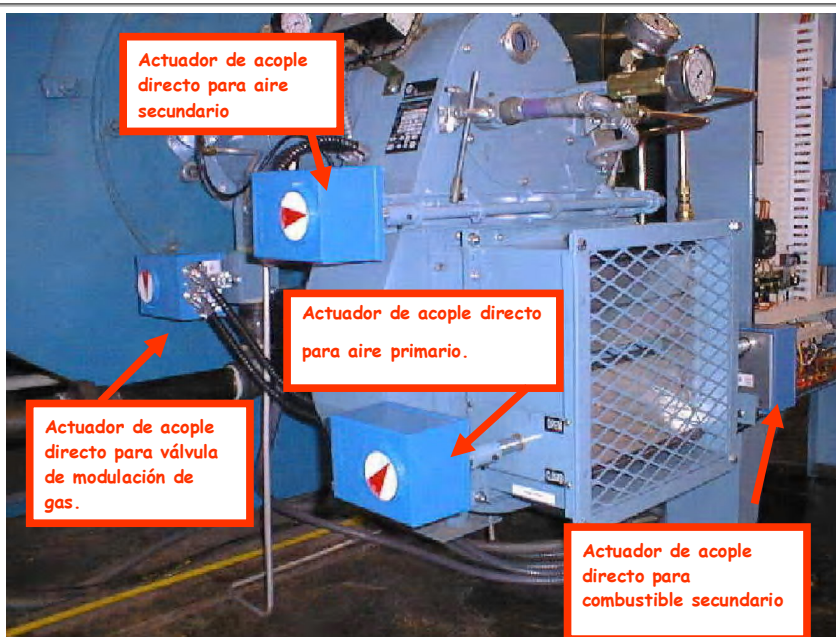
**2. Instalación de sistema posicionador.** En la figura 42 y 43 se compara una caldera con el eslabonamiento típico y con el sistema de control paralelo para el control de la mezcla de aire-combustible, es importante mencionar que la instalación de este sistema posicionador se adapta a cualquier diseño de

caldera. Al utilizar un sistema de posicionador paralelo se logra minimizar espacios y el mantenimiento de los accesorios se reduce, en caso, que un actuador no se logre adaptar al sistema de la caldera, se debe de unir por medio de acoples especiales, como se mencionó anteriormente.

**Fig. 42 Quemador con típico eslabonamiento para la mezcla de aire-combustible**

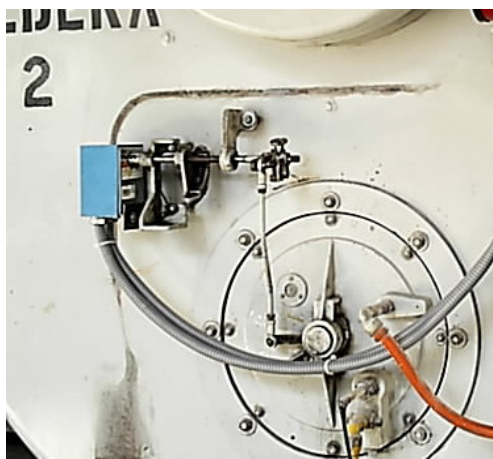


**Fig. 43 Quemador con sistema controlador paralelo**



En la figura 43 se observa la instalación del sistema posicionador paralelo en un caldera pirotubular de combustible combinado, es importante ver cómo se reduce la utilización de los eslabones, acoples y dispositivos mecánicos como las levas reguladoras. Básicamente se sustituyeron todos los elementos mecánicos para automatizar por completo el sistema. En la figura 44 se observa otra caldera con el sistema posicionador paralelo instalado.

**Fig. 44 Sistema posicionador paralelo**



### **3. Ventajas y desventajas de un sistema posicionador**

#### **a. Ventajas**

- Maximiza la eficiencia del quemador.
- Sistemas de acoples mecánicos logran la máximo eficiencia en uno o dos puntos de la curva, con un sistema posicionador se logra configurar hasta 24 puntos sobre la curva aire-combustible.
- La eficiencia de combustión es maximizada a lo largo de toda la curva.
- Mejora las emisiones de los quemadores.
- Sistemas con acople mecánicos se desajustan con el tiempo, lo cual no permite mantener un control de las emisiones.
- Un control más exacto de la relación aire/combustible permite mantener un mejor control sobre las emisiones del quemador.
- Ayuda a mejora la transferencia de energía en las calderas.
- Mejorar la combustión, disminuye producción de hollín lo cual beneficia la transferencia de energía en la caldera.
- Aumenta el “turndown” del quemador.
- En los sistemas mecánicos el punto de mínima modulación y el punto de arranque es el mismo.
- Muchos quemadores son capaces de operar a menores cargas que la del punto de arranque.
- Incrementar el “turndown” previene ciclos cortos del quemador y reduce consumo de combustible.
- Se reduce el mantenimiento de los acoples mecánicos. .

- El sistema posicionador se puede adaptara cualquier diseño de quemador.

#### b. Desventajas

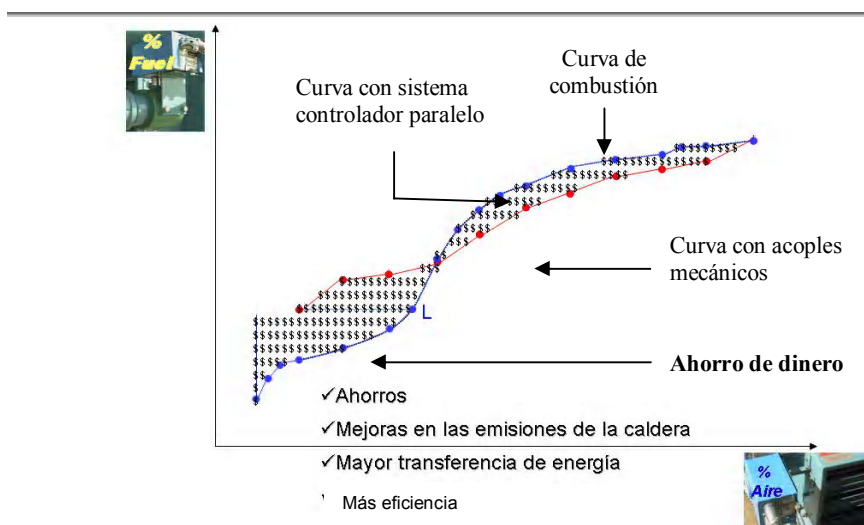
- Adquirir el sistema posicionador es de gran costo pero si se tiene una caldera que opere altas horas de operación el costo se devuelve rápidamente a corto plazo de lo contrario el costo se devuelve a largo plazo.

**4. Mantenimiento de un sistema posicionamiento.** El mantenimiento de un sistema controlador es bastante sencillo en comparación al de eslabonamiento ya que el mismo sistema no lo requiere, es decir, un actuador no necesita ser lubricado un determinado número de veces ni calibrado, en un actuador lo único que se debe verificar es que el acople esté bien conectado con las válvulas reguladoras de flujo. Básicamente el único mantenimiento que se le debe hacer es la verificación de los led's de cada actuador y de cada controlador para que funcionen correctamente, sin embargo, el sistema posicionador despliega un mensaje de alerta en caso que no funcione algún dispositivo.

#### 5. Costo y justificación del sistema posicionador paralelo

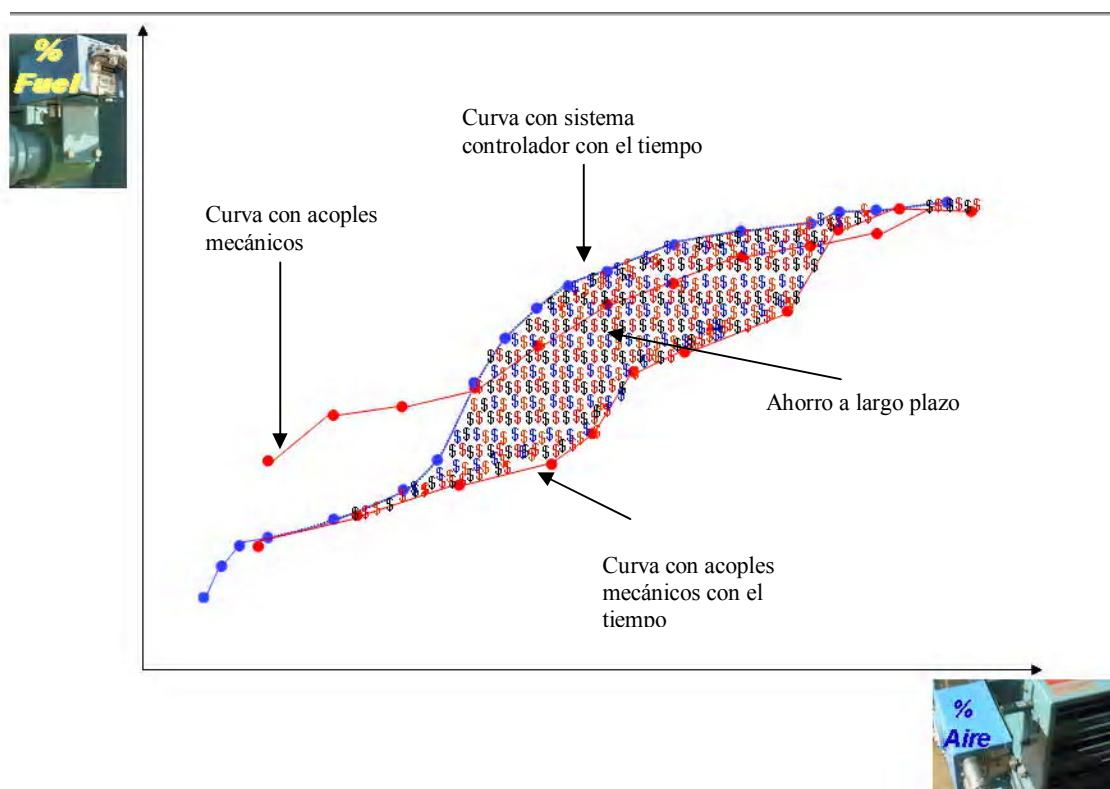
El costo del sistema posicionador puede ser un gran inconveniente para su adquisición ya que el costo es bastante alto el cual puede llegar a ser de \$10000.00 (Q77000.00). Como se ve el sistema controlador paralelo tiene un gran costo debido a su tecnología y a la ingeniería a la cual fue diseñado, sin embargo es significativa su adquisición debido a que con el paso del tiempo los acoples mecánicos pierden sus calibraciones y tienden a gastar el combustible debido a la baja precisión. Como se mencionó anteriormente el hollín de las caldera se disminuye lo cual contribuyen a una mejor transferencia de calor por ende se disminuye la limpieza de los tubos pirotubulares. Con un sistema posicionador se logra que los quemadores se apaguen lo menos posible ocasionando un menor consumo de combustible ya que algunas calderas cuando trabajan a cargas muy bajas la caldera no tiene la capacidad de trabajar a estas debido a que la carga es igual al ranque.

**Fig. 45 Gráfica de ahorro de combustible**



Como se observa en la figura 45 se tiene una curva de combustión que es difícil reproducirla en la vida real sin embargo con un sistema posicionador paralelo esto se reduce tal como se representa en la figura y se logra reproducir esta curva, por otro lado si se utilizan acoples mecánicos reproducir esta curva se hace imposible por lo tanto el gasto de combustible aumenta debido al precio del mismo en la actualidad. Sin embargo al utilizar el sistema controlador se logra ahorrar hasta el 5.5% en el consumo de combustible, es importante mencionar que con el paso del tiempo la curva de dinero puede crecer así como el costo del combustible. En la figura 46 se presenta la misma gráfica anterior sólo que en ésta se ve afectada por el tiempo.

**Fig. 46 Gráfica de ahorro de combustible con el tiempo**



## **VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **A. Conclusiones**

- Con un sistema de posicionamiento paralelo se maximiza la eficiencia del quemador, debido a que se logra configurar hasta 24 puntos sobre la curva aire-combustible, por lo que la eficiencia de combustión es maximizada a lo largo de toda la curva.
- Al mejorar el consumo de combustible se mejoran las emisiones de los quemadores.
- Con un sistema posicionador los acoples nunca se aflojas ni se descalibran como en los acoples mecánicos.
- Un control más exacto de la relación aire/combustible permite mantener un mejor control sobre las emisiones del quemador.
- Al mejorar la combustión se reduce el hollín por lo tanto se mejora la transferencia de energía en las calderas.
- Con un sistema de posicionamiento se logra reducir el consumo de combustible hasta en un 5.5%, ya que se logra reducir el apagado del quemador reduciendo ciclos cortos del mismo.
- El sistema posicionador se puede adaptara cualquier diseño de quemador sin importar sus acoples mecánicos.
- Un sistema de control paralelo es fácil de instalar y se reduce el mantenimiento de acoples mecánicos.

### **B. Recomendaciones**

- Para seleccionar un sistema controlador paralelo es necesario saber si la caldera trabaja una cantidad alta de horas de operación para que el ahorro que se obtenga con la instalación del sistema posicionador sea significativa.
- Se debe de contar con un personal debidamente entrenado y capacitado para poder manejar el sistema controlador paralelo tanto como para darle su mínimo mantenimiento.
- Hacer el estudio de retorno de inversión del sistema de acuerdo a las horas de operación al año del equipo para determinar si es razonable la inversión.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- *Controlinks control system*. Copyright © 2000 Honeywell. All Rights Reserved.
- *Control pressuretrol P7810C,D*. Copyright © 2000 Honeywell. All Rights Reserved.
- *Controlinks ZM7999 software configuration tool*. Copyright © 2001 Honeywell. All Rights Reserved.
- *Manual de caldera 750-91 Model CB Boilers 250-350BHP*, Cleaver Brooks
- M.E.,B.S.E.E. Skrotzki, Bernhardt G.A. 1960. *Power Station Engineering and Economy*. Editorial McGraw-Hill. Segunda Edición, USA, págs. 16, 17, 140-149, 151-167
- *ML7999B Universal direct coupled actuator*. Copyright © 2000 Honeywell. All Rights Reserved.
- Sistema de posicionador paralelo, Información proporcionada por la empresa Servicios Industriales y Agrícolas S.A. (SIDASA). Guatemala 2007
- *S7999B system display*. Copyright © 2000 Honeywell. All Rights Reserved.
- Steingress, Frederick M. 2001. *Low Pressure Boilers*. Editorial ATP.USA, págs. 55-59, 93-115

## VIII. ANEXOS



