

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS  
**GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS**  
Del 30 de enero al 3 de febrero de 1995  
**DIRECTORIO DE PROFESORES**

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ  
CONSULTOR INDEPENDIENTE  
NUBÉ 53  
COL. SAN JERONIMO  
10610 MEXICO, D.F.  
TEL. 595 32 20

ING. MIGUEL ALONSO CASTILLO HOIL  
JUBILADO  
SILVESTRE AGUILAR VARGAS 200  
COL. COLONIAL IXTAPALAPA  
09270 MEXICO, D.F.  
TEL. 691 80 20

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS  
**GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS**

Del 30 de enero al 3 de febrero de 1995.

**DIRECTORIO DE ASISTENTES**

1. Delfino Cabrera Ramírez  
Encargado casa de maquinas  
IMSS  
Hospital General de Zona # 53  
Los Reyes la Paz  
Edo. de México  
Tel. 855 45 69
2. Mauro Mauricio Elizalde Ponce  
Supervisor  
Extractos y maltas, S.A.  
Poniente 146 # 725  
Col. Industrial Vallejo  
México, D.F.  
Tel. 567 90 22
3. Vicente Antonio García Nieto  
Ajustador  
Servicio Profesional de Ajustes, S.A.  
Avenida Los Angeles 4808  
Col. Las Palmas  
022440 Tijuana, Baja California  
Tel. (66) 81 90 92
4. Eliseo Islas Juárez  
Supervisor de Mantenimiento  
Chantilly, S.A. de C.V.  
Chicle 266  
Col. Granjas México  
Del. Iztacalco, México, D.F.  
Tel. 657 09 52
5. Abraham Jiménez Sánchez  
Técnico Polivalente  
IMSS  
Carretera Libre México-Texcoco  
Los Reyes La Paz  
Estado de México  
Tel. 855 44 21
6. Rubén Madero Orozco  
Gerente  
Grupo Harro, S.A.  
Av. Santa Teresas # 13-40 P.B.  
Col. Fuentes del Pedregal  
14140 México, D.F.  
Tel. 652 00 44
7. Francisco Mejía Patiño  
Supervisor  
Chantilly, S.A. de C.V.  
Chicle 255  
Col. Granjas México  
Del. Iztacalco, México, D.F.  
Tel. 657 09 52
8. Moisés Mondrágón Tejocote  
Trabajo Propio  
Av. del parte mz. 20 lt. 22  
Col. Villa del Tesoro  
07900 México, DF.
9. I.Q. Carlos Monroya Merín  
Supervisor de producción  
Extractos y Maltas, S.A.  
Poniente 146 # 725  
Col. Industrial Vallejo  
México, D.F.  
Tel. 567 90 22
10. Alejandro de J. Sánchez Aguirre  
Ingeniero residente  
D.G. A.D. y P., UNAM  
Estadio Olimpico Túnel # 18 C.U.  
Ciudad Universitaria  
04510 México, D.F.  
Tel. 622 04 90
11. Mario Sinuhe Sánchez Domínguez  
Prof. Lab. Termoenergía  
Fac. Ingeniería, UNAM  
Ciudad Universitaria  
04510 México, D.F.  
Tel. 622 08 81
12. José Abraham Sánchez Zúñiga  
Tec. C Fluidos Energéticos  
IMSS  
Carr. México-Puebla Km. 19.5  
Los Reyes la Paz  
Edo. de México  
Tel. 852 10 93
- Javier Torres Guerrero  
Asesor de sistema abierto  
Depto. de Cap. y Servs. Educativos,  
ISSSTE, Priv. Fernández Guerra 16  
Col. Pantitlan  
08100 México, D.F.  
Tel. 558 78 51
14. Ing. Luis Pomposo Vigueras Muñoz  
Académico  
ENEP Aragón  
Av. Rancho Seco s/n  
Col. Impulsora  
Edo. de México  
Tel. 791 15 97

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS  
**GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS**  
Del 30 de enero al 3 de febrero

F E C H A	H O R A R I O	T E M A	P R O F E S O R
Lunes 30	17 a 21 hrs.	Introducción Combustibles Combustión	Ing. Martiniano Aguilar Rodríguez Ing. Miguel A. Castiño Hoil
Martes 31	17 a 21 hrs.	Sistemas de alimentación de combustibles Componentes principales	
Miércoles 1	17 a 21 hrs.	Hogar (hornos) Quemadores Equipos auxiliares y accesorios	
Jueves 2	17 a 21 hrs.	Instrumentación, control o regula rización y protección Tratamiento químico y muestreos	
Viernes 3	17 a 21 hrs.	Operación. Mantenimiento causas de fallas.	

# EVALUACION DEL PERSONAL DOCENTE

CURSO: GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

FECHA: Del 30 de enero al 3 de febrero de 1995.

CONFERENCISTA	DOMINIO DEL TEMA	USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	COMUNICACION CON EL ASISTENTE	PUNTUALIDAD
Ing. Martiniano Aguilar Rdz. (coord.)				
Ing. Miguel A. Castillo Hoil				

## EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL CURSO	
GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL CURSO	
ACTUALIZACION DEL CURSO	
APLICACION PRACTICA DEL CURSO	

## EVALUACION DEL CURSO

CONCEPTO	CALIF.
CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
CONTINUIDAD EN LOS TEMAS	
CALIDAD DEL MATERIAL DIDACTICO UTILIZADO	

ESCALA DE EVALUACION: 1 A 10

1.- ¿LE AGRADO SU ESTANCIA EN LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA?

SI	NO
----	----

SI INDICA QUE "NO" DIGA PORQUE.

2.- MEDIO A TRAVES DEL CUAL SE ENTERO DEL CURSO:

PERIODICO EXCELSIOR		FOLLETO ANUAL		GACETA UNAM		OTRO MEDIO	
PERIODICO EL UNIVERSAL		FOLLETO DEL CURSO		REVISTAS TECNICAS			

3.- ¿QUE CAMBIOS SUGERIRIA AL CURSO PARA MEJORARLO?

---

---

4.- ¿RECOMENDARIA EL CURSO A OTRA(S) PERSONA(S)?

SI		NO	
----	--	----	--

5.- ¿QUE CURSOS LE SERVIRIA QUE PROGRAMARA LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA.

---

---

6.- OTRAS SUGERENCIAS:

---

---



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS.

I.- INTRODUCCION

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

1.7 DEFINICIONES

Generador de vapor o caldera es un dispositivo para - generar vapor o agua caliente que se utiliza en la - alimentación a otros equipos que producen energía, di- rectamente en procesos, o bien, para propósitos de ca- lentamiento.

El diseño de los generadores de vapor o calderas con- sidera la transmisión de calor de una fuente externa de combustión a un fluido (agua) contenido dentro de ella.

Estrictamente el término de caldera se aplica única- mente al recipiente contenedor de agua y a las super- ficies de convección, sin embargo, en este trabajo se utilizarán indistintamente los términos de generador de vapor o caldera.

El generador de vapor está compuesto por las siguien- tes partes principales, algunas de las cuales se mues- tran en la Fig.I-1:

- . ventiladores de aire y gases
- . precalentadores de aire
- . ductos, compuertas
- . chimenea
- . economizador
- . domo
- . evaporadores

- . hogar
- . sopladores de hollín
- . registros de inspección
- . bombas de recirculación
- . inyección de sustancias químicas y nitrógeno
- . muestreos de agua, vapor y gases
- . sobrecalentadores .
- . recalentadores
- . desobrecalentadores
- . quemadores y encendedores
- . accesorios como válvulas de seguridad y de aisla  
miento, conexiones, purgas, venteos, etc.
- . instrumentación
- . sistemas de control y protección
- . estructura soporte
- . filtros de ceniza

Dependiendo del tipo y tamaño, la caldera puede estar constituida por todas las partes anteriores o por sólo una parte de ellas.

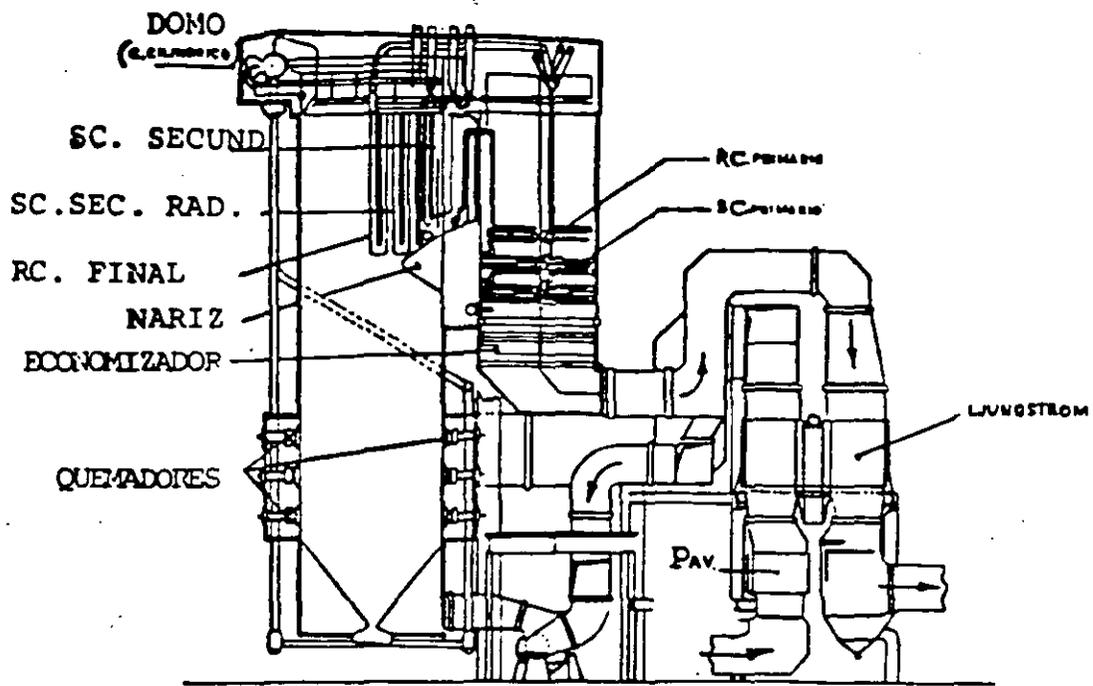


FIG. I-1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GENERADOR DE VAPOR

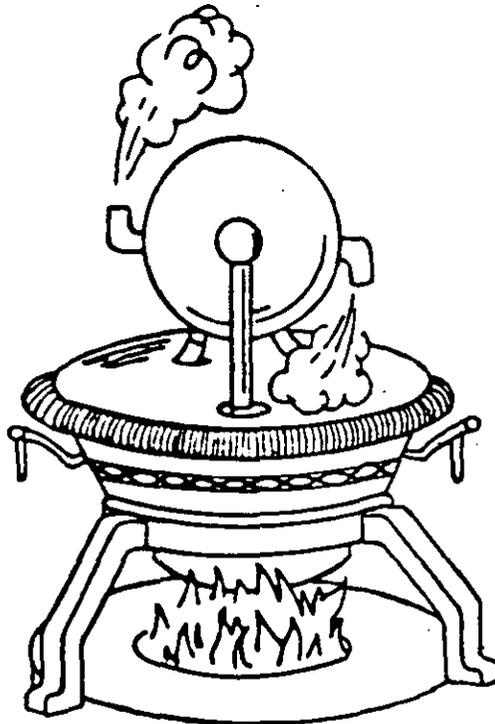


Fig. I-2 - Esquema de la máquina de Hero de Alejandría

## 2.- HISTORIA DEL VAPOR

Desde hace miles de años el hombre ha conocido la energía del vapor, sin embargo la tecnología de su aplicación estuvo influenciada por la estructura socio-económica de la época, en que con mucha facilidad se podían utilizar esclavos para realizar el trabajo; sólo en los últimos 3 siglos, ha hecho verdaderos esfuerzos para utilizarlo en su beneficio.

Hero de Alejandría, en el año 150 de esta era, construyó el aparato que se muestra en la Fig 2 que utilizaba la fuerza del vapor para hacerlo girar pero, a pesar de ser el precursor de la turbina de reacción y de las de chorro (jet), no tuvo un desarrollo y aplicación práctica.

En la edad media, que se inició en el siglo V de esta era, después de la caída del imperio romano no se produjeron investigaciones científicas significativas en 1000 años y solo fue en el siglo XV con el inicio del renacimiento cuando se empezaron a producir muchos experimentos para demostrar principios científicos.

Giovanni Battista de la Porta, en 1606 describió dos experimentos de laboratorio para mostrar la fuerza del vapor en el manejo del agua:

Uno, inyectando vapor en un tanque cerrado de agua, para forzarla con la presión a salir.

Otro, introduciendo un frasco lleno de vapor, de cuello adelgazado dentro de un tanque de agua, que al condensar al vapor, formaba vacío y la presión atmosférica forzaba al agua hacia adentro del frasco.

Galileo, famoso científico por sus experimentos con el telescopio, péndulo y gravedad, en 1614 fue consultado sobre la posibilidad de sacar agua de 15 m de profundidad; empezó a experimentar sobre el caso, comprendiendo que una bomba no podría sacar más de 8.5 m, pero murió al siguiente año.

Evangelista Torricelli, discípulo de Galileo, continuó experimentando, y en 1643 descubrió que la presión de la atmósfera podía soportar una columna de agua de 9.60 m. en un tubo cuyo extremo fuera sellado y le fuera extraído el aire, asimismo, también mostró que la presión atmosférica podía soportar una columna de 760 mm de Mercurio (Hg), demostrando con esto el principio del barómetro.

Otto Von Guericke, en 1650, también experimentó con el vacío y la presión atmosférica: en una esfera de cobre, llena de agua a la que se le sacó ésta, le hizo vacío y se colapsó.- A un cilindro con el émbolo deslizante al que le hizo vacío por un lado y 20 hombres no pudieron detener el deslizamiento producido por la presión atmosférica del otro lado.

Thomas Savery, en 1698 patentó "una máquina para elevar agua por la fuerza impelente del fuego", habiéndose construido dos de estas máquinas, que se

muestran en la Fig.1-3, en el año de 1699 y que consistían en lo siguiente: Un tanque que se conectaba al vapor de la caldera y una vez lleno y cerrada la válvula de admisión de vapor se regaba agua sobre el tanque y al condensarse el vapor y formarse vacío, subía el agua por la tubería de succión llenando el tanque y la válvula de no-retorno impedía que se regresara el agua. Después de lo anterior se abría nuevamente la válvula de vapor y la presión de ésta hacía subir el agua por la tubería de descarga, provista también de válvula de no-retorno, para después repetirse el ciclo.

La máquina de Tomás Savery, que tuvo el mérito de ser la primera que realmente trabajaba, tenía los siguientes problemas:

- . maniobras manuales difíciles con válvulas
- . limitaciones de altura de elevación de agua, por el vacío y la baja presión de vapor.
- . peligrosidad de la caldera, por falta de válvulas de seguridad

Thomas Newcomen, en 1712, construyó con éxito la primera máquina de vapor que se utilizó para sacar agua de las minas de estaño; ésta máquina que se muestra en la Fig.4, consistía de una estructura de 9 m de alto, con una enorme viga de madera oscilatoria de 7.5 m colocada en la parte superior y que servía para transmitir la potencia del cilindro de la máquina a la bomba de agua. En el extremo más pesado de la viga, para la posición de paro, se conectaban varillas que a su vez conectaban a la bomba.

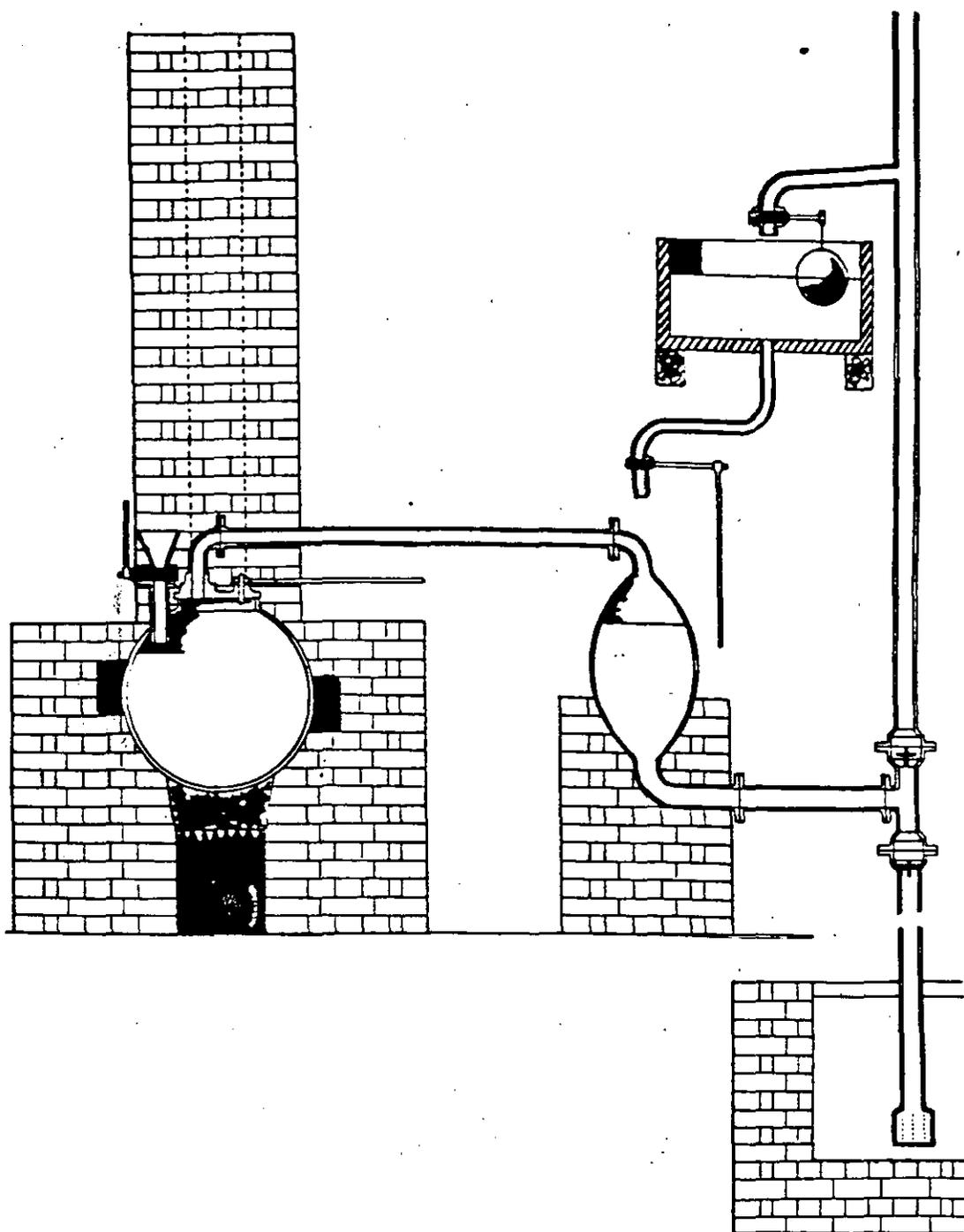


Fig. 3 Máquina de T. Savery para Bombeo de Agua (1699)

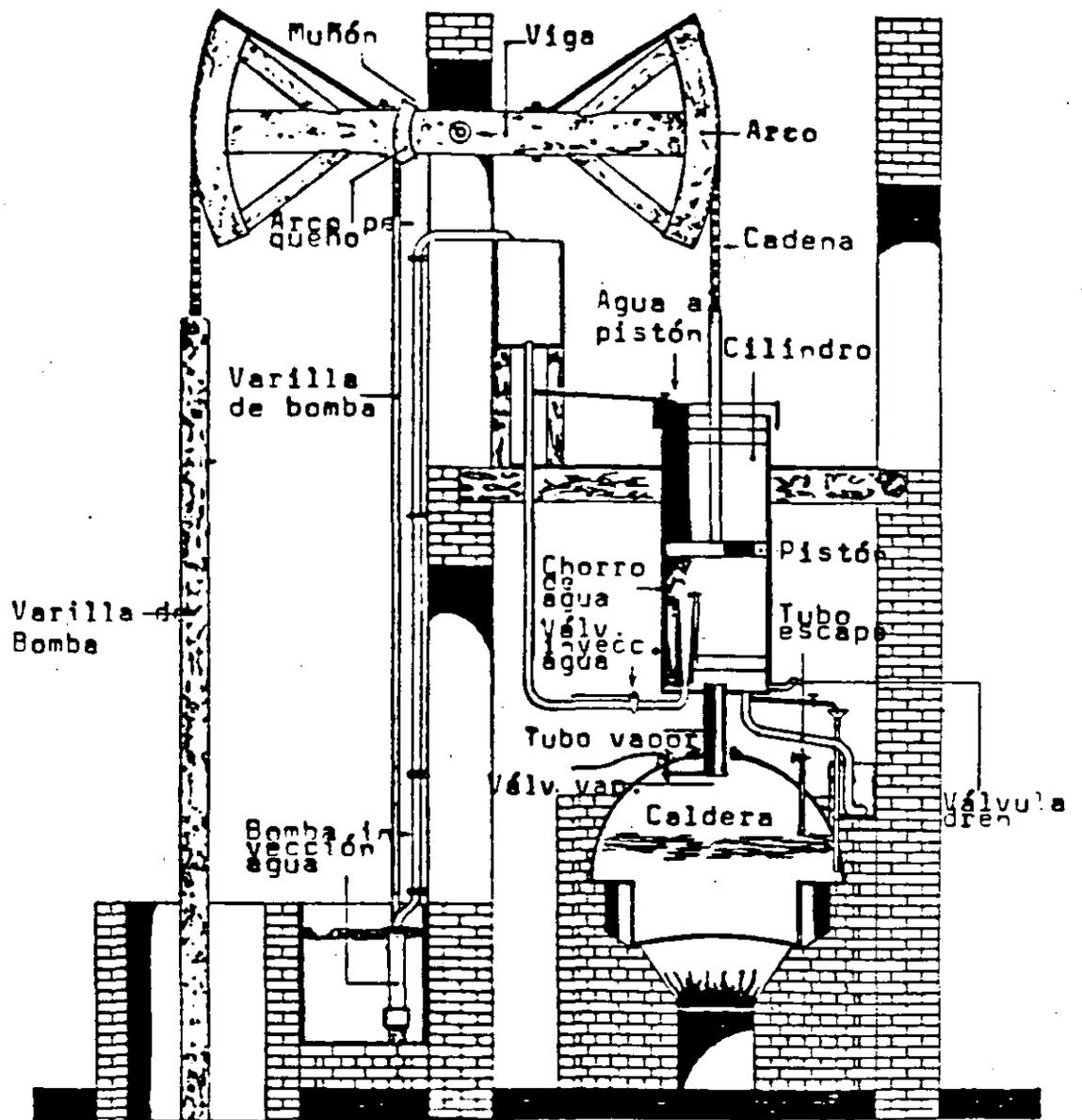


FIG4 Máquina de T. Newcomen para Bombeo de agua (1712)

En la parte de abajo del otro extremo de la viga - estaba un cilindro de Bronce y abajo de éste una caldera; en el interior del cilindro se encontraba un émbolo con movimiento hacia arriba y hacia abajo, movimiento que transmitía, por medio de una cadena, al extremo de la viga. El funcionamiento, -- con el émbolo en la parte superior, era la siguiente:

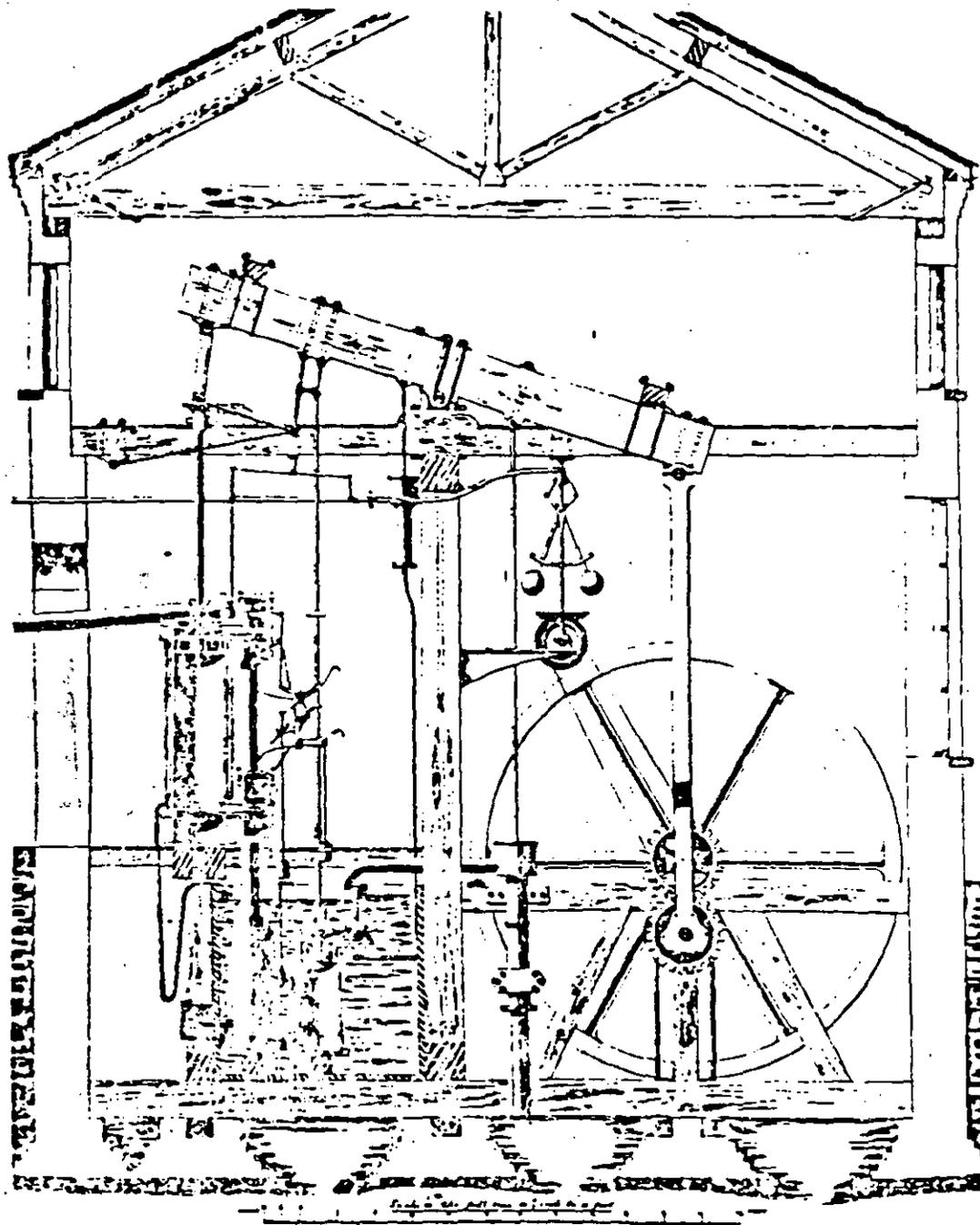
- . Se admitía vapor al cilindro abriendo la válvula de la caldera, que se cerraba una vez -- lleno con vapor el cilindro.
- . Se inyectaba agua al interior del cilindro, -- condensando el vapor y creando un vacío.
- . La presión atmosférica en la parte superior del émbolo, hacía que este descendiera y el movimiento de la viga elevaba la bomba forzando la salida del agua de la bomba.
- . Al llegar el émbolo al fondo del cilindro, el -- extremo más pesado de la viga elevaba el émbolo, dejándolo listo para la siguiente carrera de -- trabajo. Durante la carrera ascendente, se admitía vapor al cilindro para ayudar a sacar el -- agua remanente del vapor condensado.

Esta máquina, que fué el mecanismo básico que empleó la presión directa del vapor o la presión atmosférica, conjuntamente con la condensación del vapor, fue operada inicialmente con válvulas manuales.

El diseño básico de la máquina de Newcomen, permaneció durante un siglo, con algunos mejoramientos hechos por otros ingenieros.

James Watt, en 1764 observó, cuando le llevaron un modelo de la máquina de Newcomen (para reparación), que se gastaba gran cantidad de calor al enfriar el cilindro para crear el vacío, y diseñó una máquina con un dispositivo de condensación separado (un condensador y una bomba de aire), obteniendo, en 1769, una patente por ésta máquina; el éxito de la operación dependía de la bomba de aire para succionar el aire fuera del condensador y crear un vacío parcial para que fluyera el vapor al cilindro. En el año de 1782, al calcular el tamaño de las máquinas, la cantidad de carbón y la sustitución de la potencia o fuerza de los caballos para bombear el agua, observó que un caballo podía elevar 33000 libras, un pie en un minuto; ésta cantidad es la misma que hasta la fecha se utiliza para medir los caballos de potencia (horsepower = HP).

La revolución industrial, iniciada en 1750, con demandas de energía, fue apoyada por el empleo del vapor como fuerza motriz, habiéndose introducido mejoramientos como el empleo de mecanismos y engranes solares-planetarios, como el mostrado en la fig. 1-5 para convertir el movimiento rotativo.



FIGI-5 Máquina de James Watt de Doble Acción, Rotativa(1789)

### 3.- HISTORIA DE LAS CALDERAS

Al principio, en las máquinas de T. Savery y T. -- Newcomen, las presiones que se manejaban eran extremadamente bajas y las calderas que se empleaban estaban fabricadas de cobre o fierro colado remachadas, de forma esférica, colocadas sobre soportes o apoyos de ladrillos y tenían abajo una parrilla para la combustión del carbón, como se muestra en la Fig.1-6.- En ésta época no se comprendía que, mientras más tiempo estuvieran los gases de combustión en contacto con la cubierta de la caldera y mientras mayor fuera el área de la superficie ex-puesta al calor, la caldera sería más económica, produciendo más vapor por menos combustible.

Uno de los primeros mejoramientos, después de que se les dió forma cilíndrica horizontal, en lugar de esférica, fue el desarrollo de parrillas de combustión interiores, con un tubo para la combustión y paso de gases: la "cornish", que consistía de -- una cubierta cilíndrica horizontal, con un tubo de humos plano de lado a lado de un diámetro de la mi-tad del de la cubierta y la "lancashire", Fig17, - de dos tubos de humos planos de un tercio del diámetro de la cubierta, ensanchados en el frente para acomodar la parrilla de combustión y el pozo de cenizas. Estas calderas tenían los extremos de la cubierta cilíndrica planos, que por efecto de la temperatura y presión interna tendían a comb\_arse, siendo necesario emplear refuerzos en los extremos planos para evitarlo.

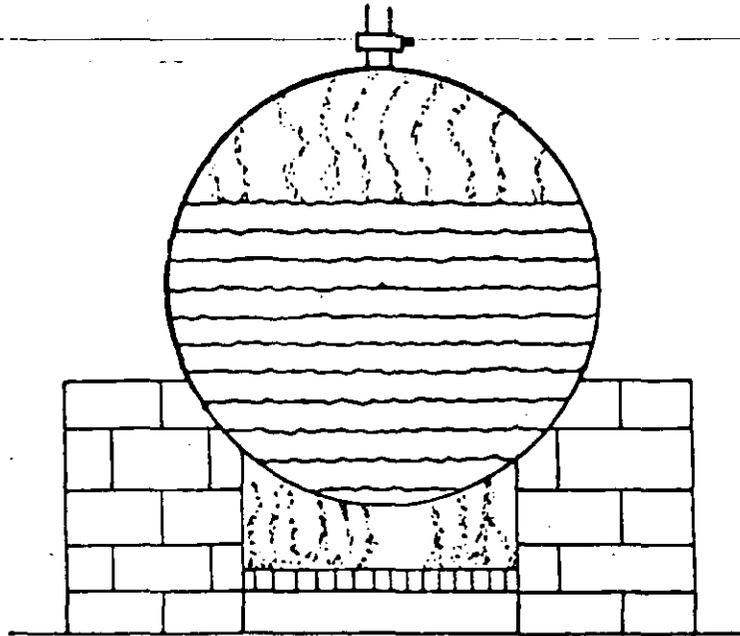


Fig. I-6 PRIMERA CALDERAS (NECOMEN)

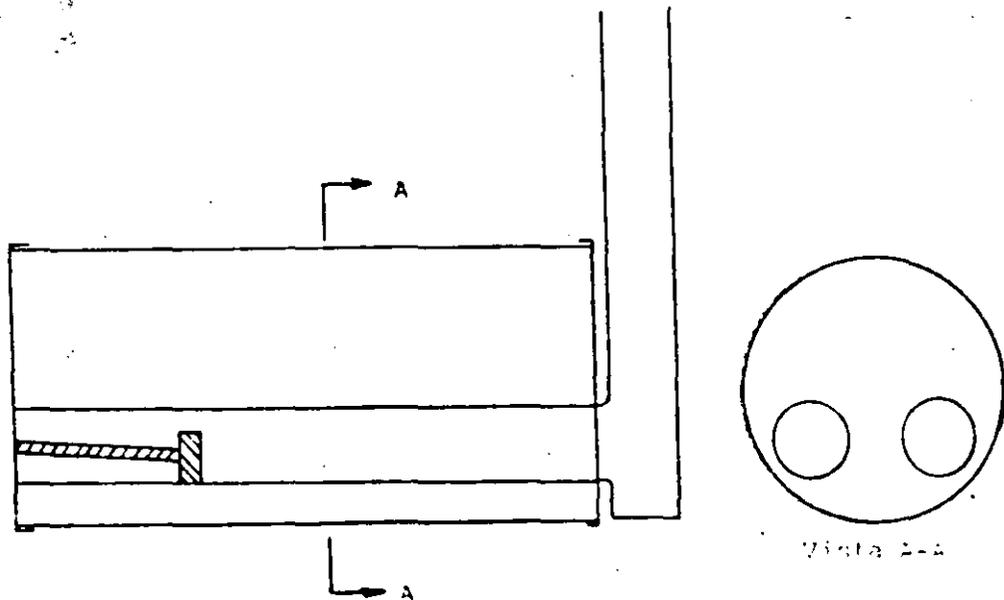


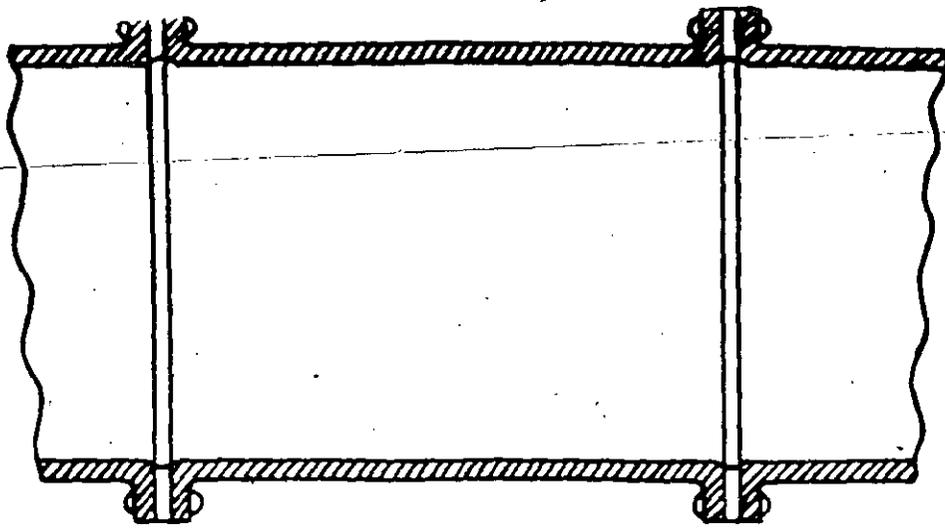
Fig. I-7 CALDERA DE DOBLE HOGAR (CASCAGHID)

El problema de absorber las expansiones y contracciones del tubo plano del hogar, fue resuelto en las tres formas básicas siguientes, Figl-8, que hasta la fecha se utilizan:

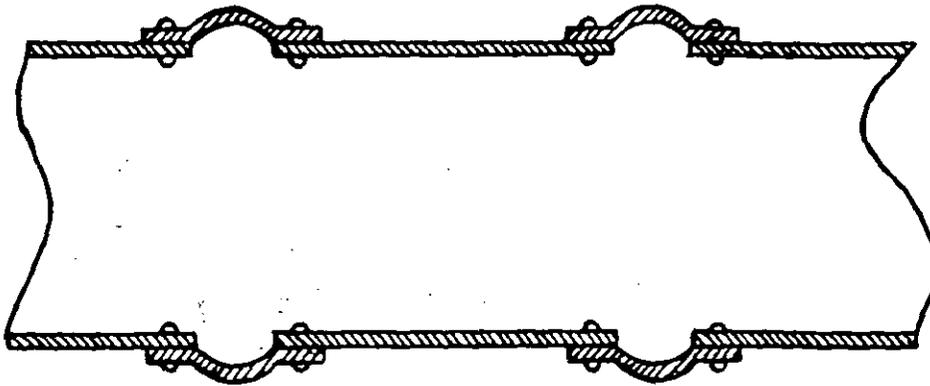
- a.- Dividiendo el hogar plano en secciones con bridas, uniéndolas con remaches y empleando empaques de anillos de hierro suave calafateado
- b.- Empleando también secciones planas, unidas con una sección de convolución de diámetro ligeramente mayor
- c.- Utilización de tubo corrugado para el hogar, que tiene las siguientes ventajas sobre el hogar plano:
  - . mayor resistencia con el mismo diámetro;
  - . mayor tolerancia de expansión por las corrugaciones;
  - . mayor superficie con la misma longitud, con lo cual se logra mayor evaporación

La mayor demanda de vapor que requería calderas mas grandes, se logró con la introducción de las calderas verticales (Figl-9) y la siguiente inovación fue la de inclinar los tubos de humo (Figl-10), para permitir que los productos de combustión estuvieran más tiempo en contacto con las superficies de calentamiento, siendo este el prototipo para desarrollar lo siguiente:

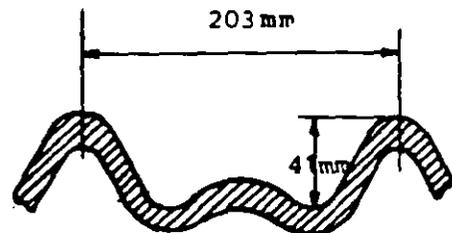
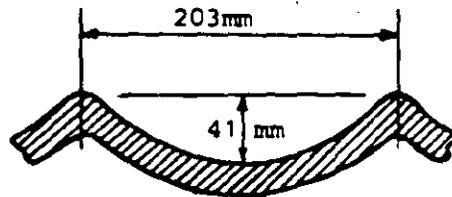
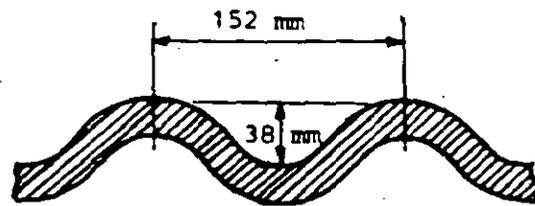
- . Calderas para locomotoras de George Stephenson
- . Calderas de parte posterior seca (dry back), primer ejemplo para el desarrollo del patrón -



a. Adamson

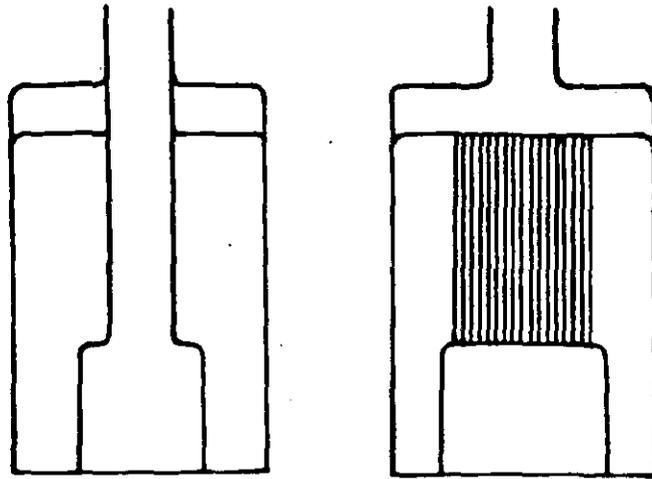


b. Abombado



c. Sección corrugada

FigI-8 FORMAS DE TUBOS DE HOGAR



a. tubo central

b. multitubular

Fig 9 CALDERAS VERTICALES

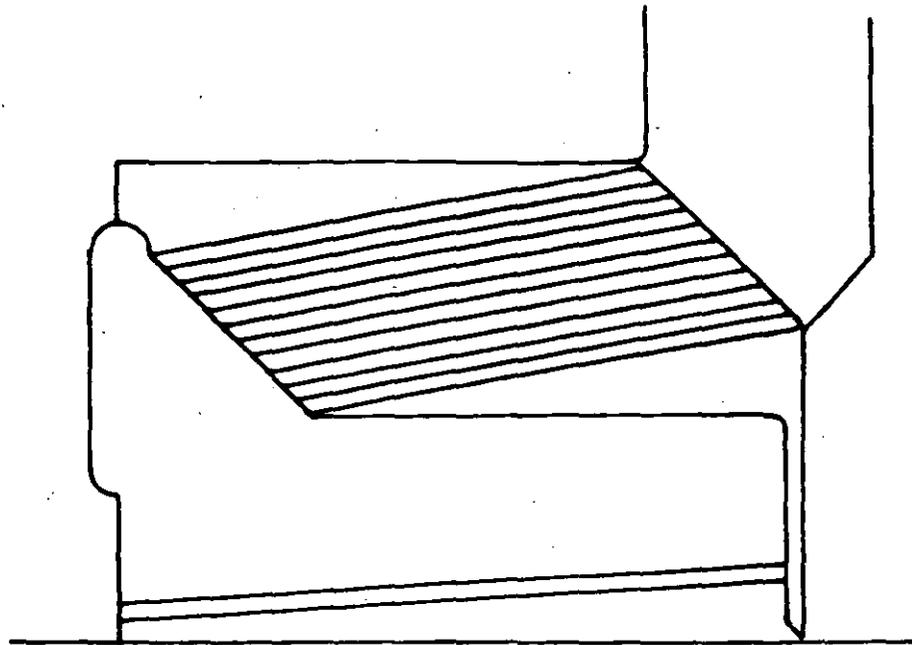


Fig-10 CALDERA VERTICAL CON TUBOS DIAGONALES

para lo que hoy se conoce como calderas de tubos de retorno horizontal (HRT), Fig1-11 y las calderas escocesas (figs1-12 y1-13).

En estas calderas, el tiro del hogar se obtenía por la columna de gases calientes de la chimenea, pero a medida que se agregaron superficies de calentamiento más grandes y se enfriaban más los gases para obtener un mejor rendimiento del combustible, éste se quemó más lentamente, resultando que para aumentar la producción se tenían que aumentar las pérdidas en la chimenea. El aumento de la capacidad se logró en Calderas de locomotoras, en el año de 1813, empleando un chorro de vapor de escape para inducir el tiro, sin embargo, éste mismo principio (con chorros de vapor o de aire) no pudo ser aplicado en Calderas industriales por las siguientes razones:

- . el vapor se condensa en la chimenea y se produce corrosión excesiva
- . con chorro de aire, este se regresa al hogar

Finalmente, la solución fue la de inyectar aire con un ventilador por el pozo de cenizas, con lo cual se aumentó sustancialmente la evaporación.

En el año de 1807 navegó el primer barco impulsado con la energía del vapor; los primeros barcos trabajaban con presiones de vapor de  $1.75 \text{ kg/cm}^2$  (25 psig) suministrado con calderas de fondo seco, pero con el advenimiento de la máquina de vapor compuesta, la presión se elevó a  $4.2 \text{ kg/cm}^2$  (60 psig) y fue enton-

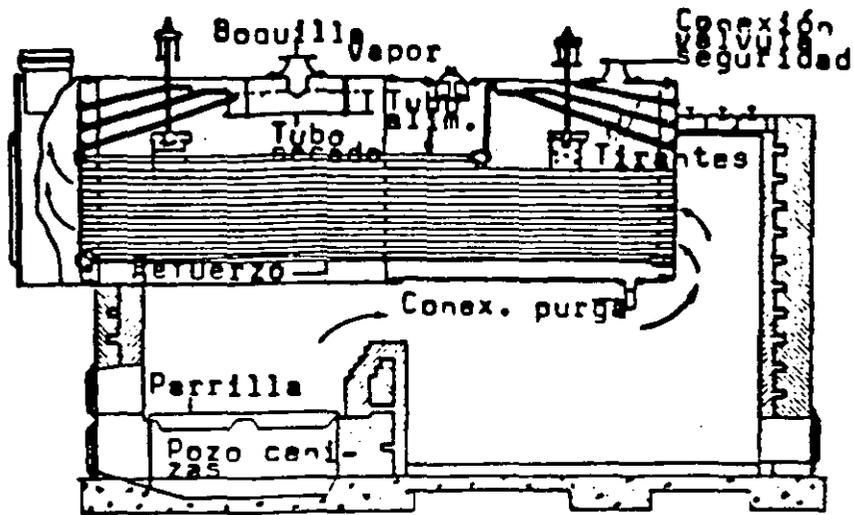


FIG.1-11 Sección de Caldera de Retorno Horizontal Tubular (HRT)

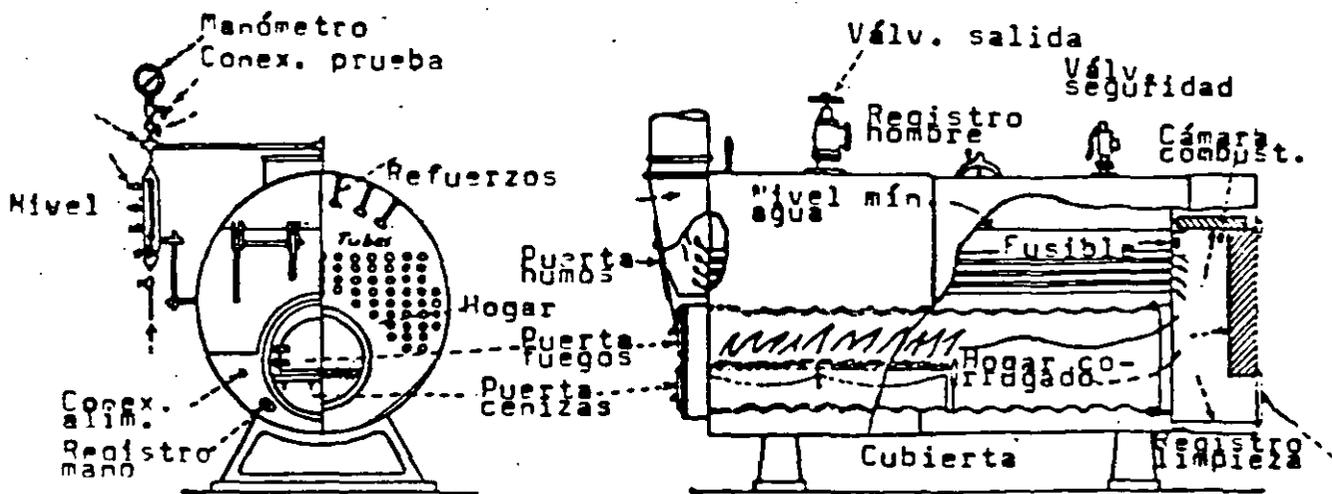


FIG.1-12 Caldera Escocesa Marina, de Fondo Seco, dos pasos de gases y Hogar Corrugado

ces cuando se diseñó la caldera marina escocesa, - Fig.1-13, que hasta la fecha se continua utilizando.

En el año de 1867 se inventó la caldera de tubos de agua (Babcock), Fig.1-14, que fué la culminación de - la concepción original de exponer los productos de - combustión a grandes superficies de calentamiento; - con el paso de la máquina de vapor de doble a triple expansión y a la turbina de vapor, se requirió vapor de  $21 \text{ kg/cm}^2$  (300 psig) obtenido de calderas de tubos de agua, porque su obtención en calderas de tubos de humo es muy difícil de obtener.

En el año de 1885, Allen Stirling diseñó una caldera de tubos de agua, de tres domos de agua y dos de lodos, Fig.1-15, que hasta la fecha se emplea.

Al principio de este siglo, las presiones de las calderas de potencia que eran de 14 a  $21 \text{ kg/cm}^2$  se elevaron a  $46 \text{ kg/cm}^2$  (650 psig) y después a 70 y  $85 \text{ kg/cm}^2$  (1000 y 1200 psi), lo que requirió modificaciones en - los métodos de fabricación, en la siguiente forma:

- . de  $46 \text{ kg/cm}^2$  para abajo se fabricaban remachadas y de presiones mayores se fabricaban en domos forjados sin costura.
- . en el año de 1925 se introdujeron por primera vez los domos soldados con arco eléctrico
- . en el año de 1931 la ASME incluyó en su código -- de calderas y recipientes a presión, estándares - de juntas soldadas.

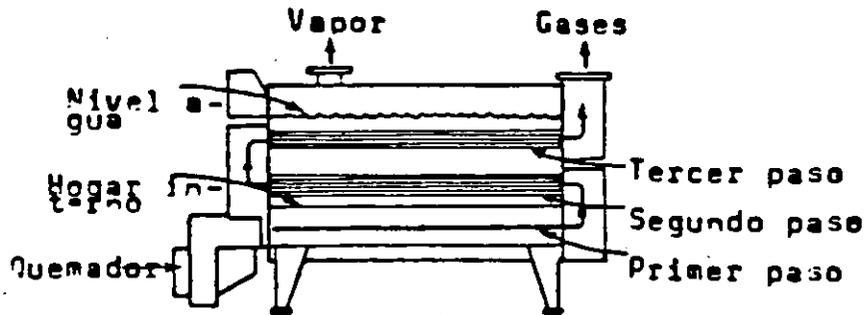
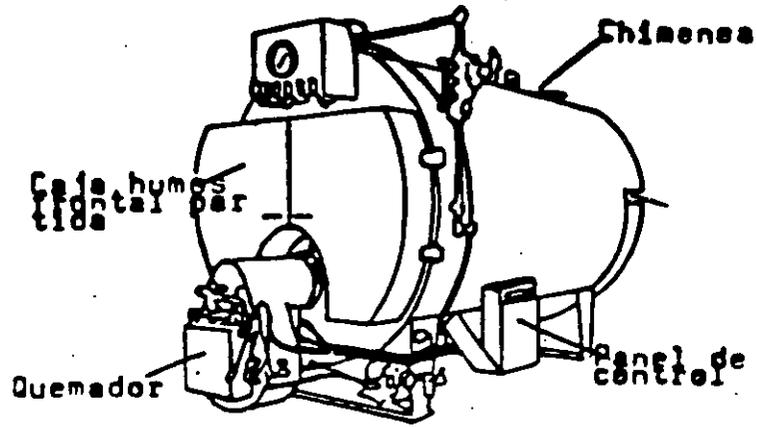


FIG-13 Caldera Escocesa Marina Moderna de Fondo Seco y tres pasos de gases

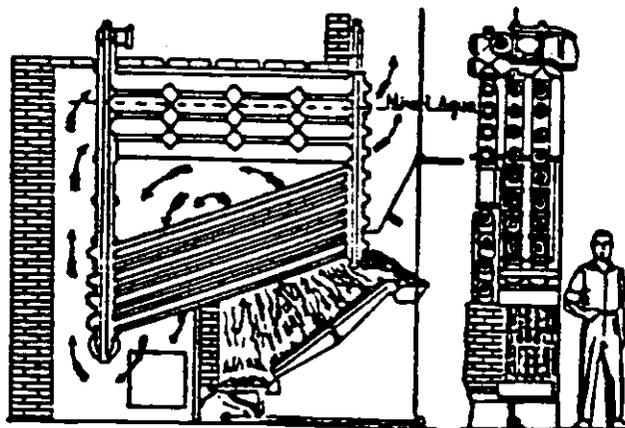
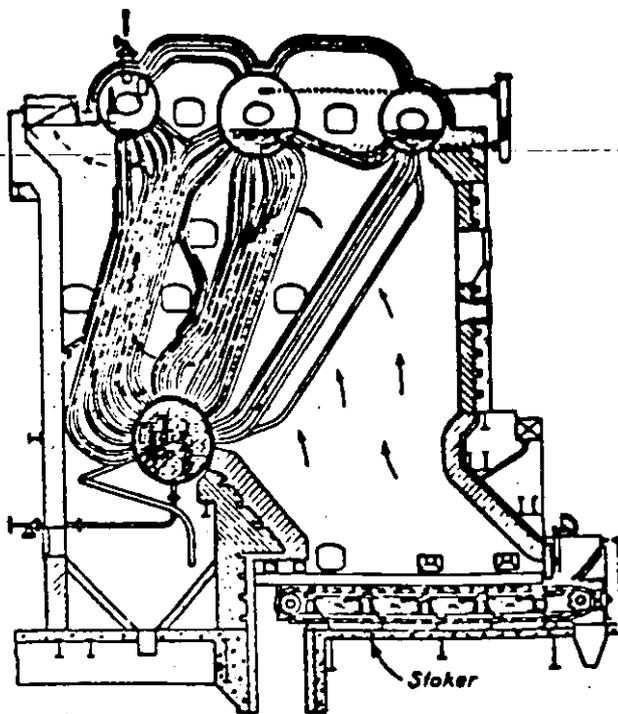
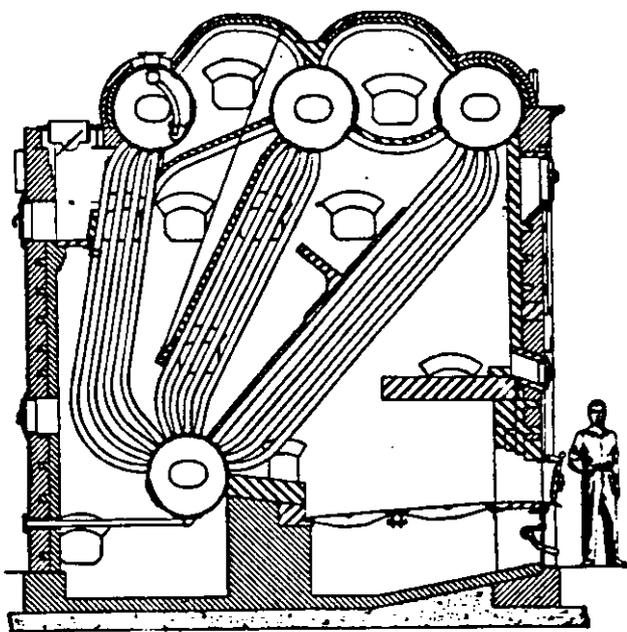


Fig-14 Caldera de tubos de agua Babcock y Wilcox, Patentada en 1867



a . Alimentación automática (de carbón)



b.- Alimentación manual (de carbón)

FIG-15 Caldera de Tubos de Agua Stirling



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

II.- COMBUSTIBLES

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

## II. - COMBUSTIBLES

Combustible es una sustancia que por medio de un proceso químico desarrolla calor y puede usarse como una fuente económica de energía; algunos combustibles se utilizan en estado natural (carbón y gas natural) y otro después de procesos como el combustóleo (bunker C) que es el residuo pesado producido por la destilación del petróleo.

Los combustibles están constituidos por materiales combustibles como el carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S) y materiales no combustibles como el nitrógeno (N), oxígeno (O), ceniza y agua; en realidad; el azufre puede ser considerado como una impureza por los problemas que ocasiona.

El término de ceniza, comprende todos los materiales minerales sólidos que se hallan en estado de combustibilidad a la temperatura de cerca de  $1100^{\circ}\text{K}$ ; el nitrógeno no interviene en la combustión manteniéndose en estado gaseoso hasta en los gases de combustión y el oxígeno del combustible participa en la combustión como sustancia comburente, contribuyendo con el oxígeno del aire para la combustión.

En términos generales los combustibles pueden dividirse en:

- gaseosos
- líquidos
- sólidos

Combustibles Gaseosos. - El principal combustible gaseoso es el gas natural que es un gas sin color y sin olor y que está compuesto, principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) y que usualmente contiene algo de etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) y un poco de nitrógeno; este gas en estado natural o gas "agrio" tiene ácido sulfhídrico y vapores orgánicos de azufre, para su utilización en la combustión de calderas se "endulza", operación que consiste en la eliminación de estos gases. El poder calorífico de este gas en México es de alrededor de 9 400 kcal/kg y puede estar asociado o no a yacimientos petrolíferos. /

Los gases manufacturados normalmente no se transmiten y sólo se usan en calderas en el punto de su fabricación; los principales gases manufacturados son el gas de alto horno obtenido de tratamiento metalúrgico, el gas de refinería, gas de tratamiento de aguas negras, gas de horno de coque producido en la fabricación de coque metalúrgico que cuando se le quitan sus impurezas contiene, aproximadamente, la mitad de hidrógeno, una tercera parte de metano, más monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno; el gas de alumbrado que se obtiene como un subproducto en la fabricación de coque y el gas de gasógeno que se obtiene por la gasificación de combustibles sólidos. Un caso especial es el de los gases de petróleo licuados (GPL), que por su baja tensión de vapor a la temperatura ambiente, operando a presiones reducidas, pueden ser almacenados y transportados en estado líquido y utilizarse luego como combustibles gaseosos, distribuyéndose como propano o butano puros o bien, como mezclas.

Los componentes promedio de algunos gases combustibles son los siguientes:

a.- Gas de gasógeno

de lignito:	H <sub>2</sub>	-	10 a 15%
	CH <sub>4</sub>	-	2 a 2.5%
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	0.5%
	CO	-	22 a 30%
	N <sub>2</sub>	-	47 a 57%
	CO <sub>2</sub>	-	3 a 8.3%
	O <sub>2</sub>	-	0.2%
	PCI	-	1150 a 1600 kcal/m <sup>3</sup>

de hulla:	H <sub>2</sub>	-	8 a 12%
	CH <sub>4</sub>	-	1.5 a 2%
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	0.2%
	CO	-	24 a 28%
	N <sub>2</sub>	-	53 a 59%
	CO <sub>2</sub>	-	4 a 7.1%
	O <sub>2</sub>	-	0.2%
	PCI	-	1090 a 1360 kcal/m <sup>3</sup>

b.- Gas de Alto Horno

H <sub>2</sub>	-	3%
CO	-	27.5%
H <sub>2</sub> O	-	5%
N <sub>2</sub>	-	54.5%
CO <sub>2</sub>	-	10%
PCI	-	850 a 1150 kcal/m <sup>3</sup>

c.- Gas de Horno de Coke

H <sub>2</sub>	-	55%
CH <sub>4</sub>	-	32%
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	2.3%
CO	-	7%
H <sub>2</sub> O	-	1%
N <sub>2</sub>	-	1.5%
CO <sub>2</sub>	-	1.2%
PCI	-	3500 a 4500 kcal/m <sup>3</sup>

d.- Gas Natural

Compuesto principalmente por CH<sub>4</sub> (metano) 90% aproximadamente y con un PCI de 9400 kcal/m<sup>3</sup>.

La mejor forma de calcular el poder calorífico de un gas es utilizando los porcentajes de los constituyentes y multiplicándolos por los valores caloríficos de cada constituyente, - algunos de los cuales se dan a continuación:

<u>GAS</u>	<u>m<sup>3</sup> / kg</u>	<u>Kcal/m<sup>3</sup></u>	<u>m<sup>3</sup> aire/m<sup>3</sup> gas</u>
Hidrógeno (H)	11.11	3106	2.41
Monóxido de carbono (CO)	0.80	3088	2.39
Metano (CH <sub>4</sub> )	1.40	9370	9.57
Etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	0.80	14906	14.33

Etano ( $C_2 H_6$ )	0.75	16570	16.74
Propano ( $C_3 H_8$ )	0.52	22900	15.70
Butano ( $C_4 H_{10}$ )	0.39	30185	15.49
Acetileno ( $C_2 H_2$ )	0.86	13847	11.93

En la parte de cálculos se da más información sobre el poder calorífico de los combustibles.

Las principales ventajas que se tienen de utilizar combustibles gaseosos en hogares de calderas, son las siguientes:

- No contienen cenizas ni residuos
- Se mezclan fácilmente con el oxígeno y por lo tanto se requiere poco exceso de aire.
- Se facilita el control automático, respondiendo rápidamente a las variaciones de carga.

Combustibles Líquidos.- Los principales combustibles líquidos son los aceites combustibles del petróleo, obtenidos sea por destilación, por residuos o por mezclas, alcoholes alquitrán de hulla o brea y licor negro de las fábricas de de papel.

El petróleo crudo es un combustible cuyo origen es la descomposición de materia vegetal atrapada entre capas de tierra, por la acción del tiempo, temperatura, agua y presión; se clasifican en paraffnicos, asfalténicos e intermedios y normalmente no se utiliza como combustible en estado natural.

De los combustibles líquidos los que más se emplean son los combustibles del petróleo que se clasifican en 5 tipos y que se designan por número; los números 1, 2 y 4 se utilizan sin precalentamiento y los números 5 y 6 requieren precalentamiento antes de quemarse, empleándose principalmente en instalaciones industriales. Las principales características de estos aceites combustibles son los que se dan en la tabla siguiente:

CARACTERISTICAS	No. 1	No. 2	No. 4	No. 5	No. 6
Obtención	destilado	destilado	residual muy ligero	residual ligero	residual
Color	claro	ambar	negro	negro	negro
Gravedad específica 15.6/15.6 °C	0.8250	0.8654	0.9279	0.9529	0.9861
Gravedad API, 15.6 °C	40	32	21	17	12
Viscosidad, en Centistokes, 37.8°C	1.6	2.68	15.0	50.0	360.0
Viscosidad, SSU a 37.8°C	31	35	77	232	-
Viscosidad, SSF a 50°C	-	-	-	-	170
Temp. de fluencia, °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	bajo cero	18
Temp. mín. de bombeo °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	2	38
Temp. mín. de atomiz. en °C	bajo cero	bajo cero	bajo cero	54	94
Residuo de carbón, en %	trazas	trazas	2.5	5.0	12.0
Agua y sedimentos, en % (max)	trazas	trazas	0.5	1.0	2.0
Ceniza, en %	trazas	trazas	bajo	0.05	0.08
Kcal/l	9140	9400	9740	9870	10 000

El aceite combustibles designado con el No. 1 es el keroseno que se emplea en las turbinas de gas; el No. 2 es el aceite diesel y el No. 6 el combustóleo.

La industria del aceite utiliza las densidades medidas en grados API (American Petroleum Institute). La gravedad específica y la gravedad API se relacionan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{141.5}{131.5 + \text{gravedad API}}$$

El poder calorífico superior (PCS) de los aceites combustibles puede calcularse por medio de algunas de las siguientes ecuaciones:

$$\text{PCS} = 7500 \text{ C} + 33830 \text{ H} + 2000 \text{ S}, \text{ en kcal/kg}$$

$$\text{PCS} = 9878 + 30 \times \text{gravedad API}, \text{ en kcal/kg}$$

$$\text{PCS} = 10140 + 22 (\text{grados Bé} - 10), \text{ en kcal/kg}$$

En donde

$$\begin{aligned} \text{Grados Bé} &= \text{grados Baumé} \\ &= \frac{140}{\text{gravedad específica } 15.6/15.6^{\circ}\text{C}} - 130 \end{aligned}$$

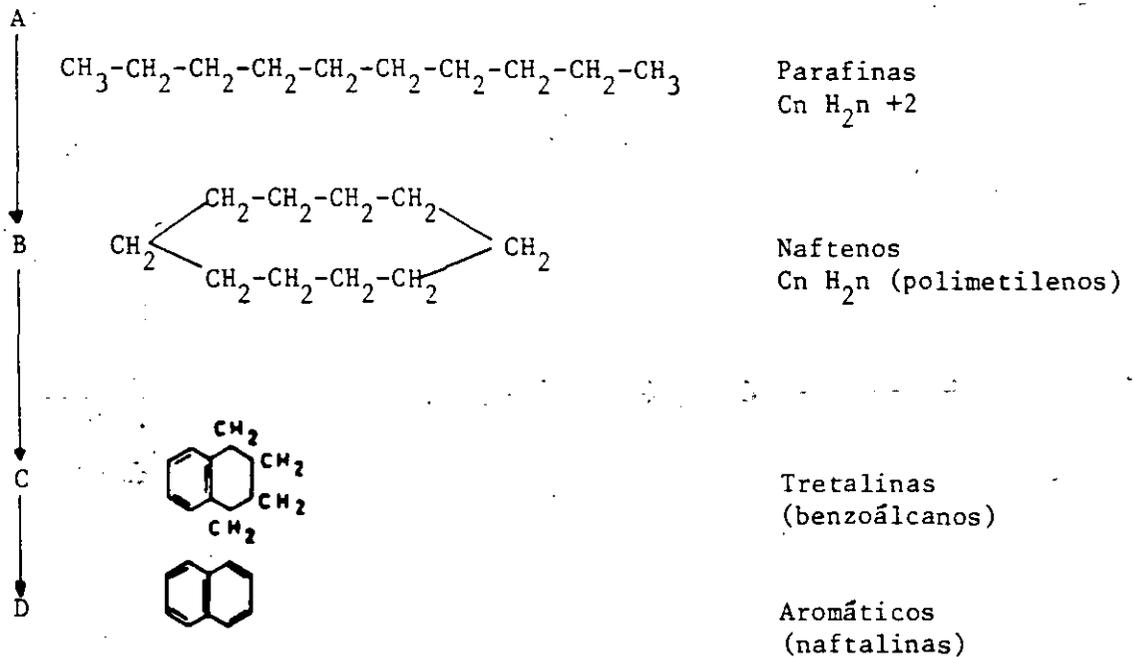
Normalmente en México el contenido de C del combustóleo varía de 82 a 84% y el H<sub>2</sub> del 13 al 15%; el S puede llegar al 4%. En algunos países que carecen de petróleo y que disponen de abundantes plantas y materias vegetales se utilizan al alcohol como combustible. Los principales alcoholes utilizados son: el alcohol etílico (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O), obtenido de granos; el alcohol metílico (CH<sub>4</sub>O), obtenido de madera; el alcohol butílico (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O) y el alcohol propílico (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O).

El alquitrán de hulla o brea y el licor negro normalmente se utilizan como combustible en las fábricas en donde se producen.

En términos generales, los petróleos se han ubicado geográficamente en la siguiente forma:

- . Petróleos parafénicos en America
- . Petróleos nafténicos en Rusia
- . Petróleos mixtos en medio Oriente
- . Petróleos asfálticos y aromáticos en Oriente

Parece que químicamente la línea de transformación de los petróleos es la siguiente:



El petróleo crudo es una mezcla de hidrocarburos que contiene impurezas Azufre (de 1% a 5% según la fuente) y un número de compuestos metálicos inorgánicos (Vanadio, Níquel, Sodio).

En una refinería, el petróleo crudo se expone a una serie de procesos físicos y químicos (destilación, craring térmico o catalítico, reformación) para obtener diferentes productos combustibles y materia prima para la indus-

tria petroquímica; con el tratamiento en las refinерías se logran diversos productos cada vez menos volátiles como:

- . Gas condensable (propano-butano)
- . Líquidos volátiles (gasolinas)
- . Líquidos poco volátiles (queroseno, gasoil)
- . Aceites de lubricación
- . Residuo pastoso o viscoso a temperatura ordinaria (combustóleo, asfalto).

La mayor parte del azufre del petróleo crudo permanece en las fracciones más pesadas.

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de una refinерía en donde se observan los productos típicos.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestran las características de algunos combustibles de acuerdo con diferentes normas; algunas de éstas características se incluyen a continuación.

Temperatura de Inflamación.- La temperatura de inflamación es un valor importante para la seguridad durante el transporte y almacenamiento del combustible; a esta temperatura no se produce necesariamente una flama autosensible, pero indica la formación de mezclas inflamables.

6

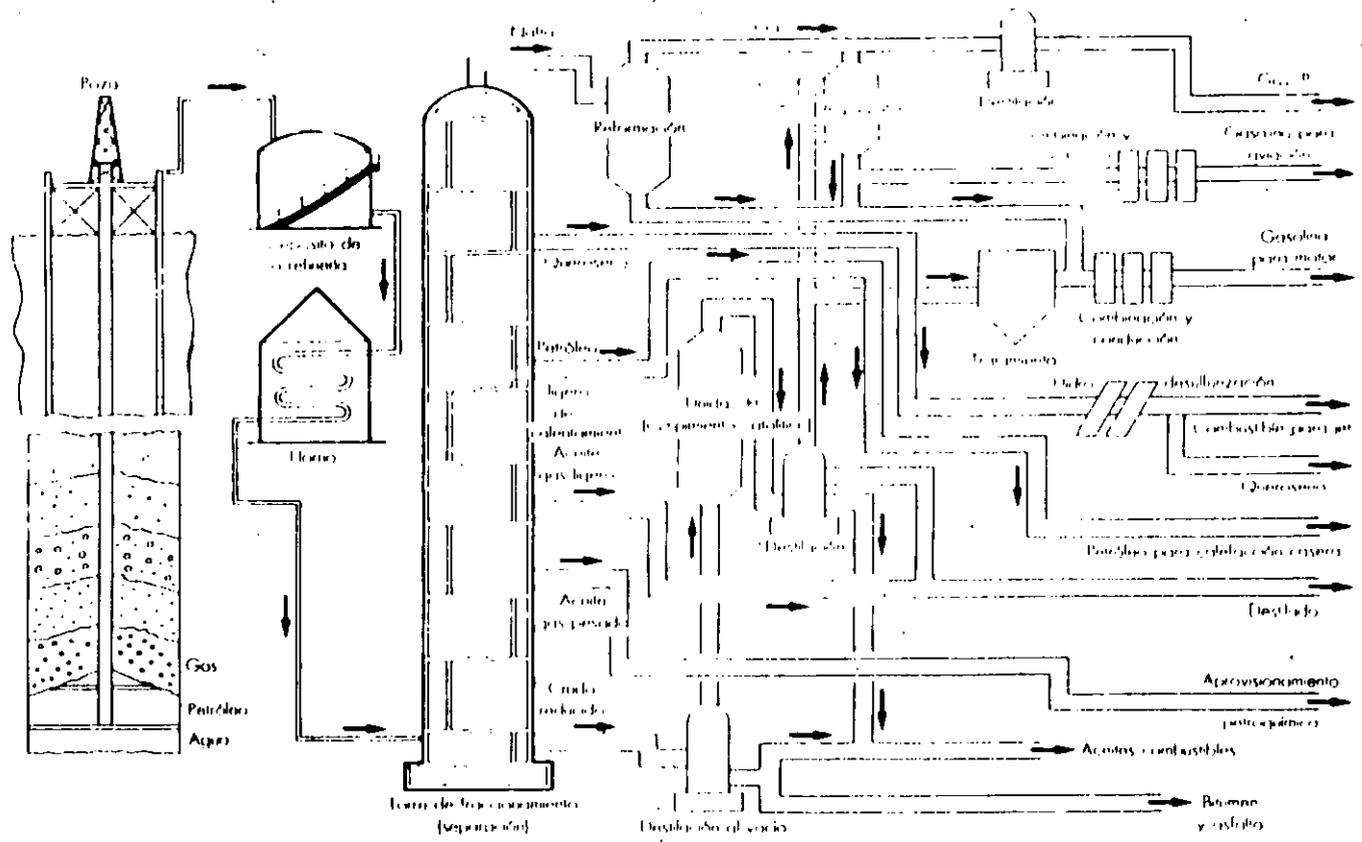


Figura . Diagrama de una refinería donde se muestran productos típicos.

10  
 TABLA Algunos tipos de combustibles líquidos y sus propiedades

	Gasolina de coche	Keroseno	Gas-oil	Aceite combustible, muy fluido	Aceite combustible, denso	Aceite de alquitrán	Carbón bituminoso (como comparación)
Carbono, % en peso . . . . .	85.5	86.3	86.3	86.2	86.2	90.0	80.0
Hidrógeno, % en peso . . . . .	14.4	13.6	12.7	12.3	11.8	6.0	5.5
Azufre, % en peso . . . . .	0.1	0.1	1.0	1.5	2.0	0.4	1
Nitrógeno, % en peso . . . . .	—	—	—	—	—	1.2	1.5
Oxígeno, % en peso . . . . .	—	—	—	—	—	2.4	7
Peso específico, 15/15 °C . . . . .	0.73	0.79	0.87	0.89	0.95	1.1	5 (cenizas) 1.25
Viscosidad cinemática:							
a 20 °C, cSt . . . . .	0.75	1.6	5.0	50	1200	1500	—
a 20 °C, °Engler . . . . .	—	—	—	6.6	150	200	—
a 100 °C, cSt . . . . .	—	0.6	1.2	3.5	20	18	—
a 100 °C, °Engler . . . . .	—	—	—	1.26	2.88	2.64	—
Intervalo de destilación, °C . . . . .	40/185	140/280	180—	200—	250—	200—	—
Residuo a 350 °C, % . . . . .	—	—	15	50	60	60	—
Punto de inflamabilidad, °C . . . . .	40	39	75	80	110	65	—
Poder calorífico inf., kcal/kg . . . . .	10.450	10.400	10.300	10.000	9700	9000	7750

TABLA Especificaciones técnico-comerciales de los combustibles líquidos para usos técnicos industriales y no industriales (USA)

Calidad del aceite	Punto de inflamabilidad °C	Punto de deslizamiento °C	Agua y sedimentos % en volumen	Residuo carbónico en el 10% del residuo %	Cenizas % en peso	Destilación			Viscosidad Saybolt segundos				Viscosidad cinemática centistokes				Viscosidad Ingler a 38 °C		Densidad grados API	Peso específico 15 °C / 15 °C	Prueba de corrosión sobre cobre	Azufre máx % a)		
						10 % °C	90 % °C		Universal a 38 °C		Furnal a 50 °C		a 38 °C		a 50 °C		mín	máx					—	—
							máx	mín	máx	mín	mín	máx	mín	máx	mín	máx								
n. 1 Aceite destilado para quemadores con atomizadores o cualquier dispositivo que requiera esta calidad de aceite	38	0	indicios	0,15	—	215	—	288	—	—	—	—	—	1,4	2,2	—	—	—	1,16	35	0,850	n. 3	0,5	
n. 2 Aceite destilado que se usa generalmente para calefacción doméstica con quemadores que no precisan el aceite n. 1	38	-7 b)	0,10	0,35	—	c)	282 d)	300	(32,6)	(32,9)	—	—	2,0 d)	3,6	—	—	—	1,14	1,28	30	0,876	—	1,0	
n. 4 Aceite que normalmente no necesita precalentamiento para las manipulaciones y el uso	44	-1	0,50	—	0,10	—	—	—	45	125	—	—	(5,8)	(26,4)	—	—	—	(1,47)	(3,64)	—	—	—	—	sin límite
n. 4 (ligero) Puede necesitar calentamiento independientemente del clima y de los dispositivos	55	—	1,00	—	0,10	—	—	—	150	300	—	—	(32)	(65)	—	—	—	(4,33)	(8,61)	—	—	—	—	sin límite
n. 5 (pesado). Puede necesitarse un precalentamiento antes del uso, y en las regiones frías para las manipulaciones.	55	—	1,00	—	0,10	—	—	—	350	750	(21)	(40)	(75)	(162)	(42)	(81)	—	(9,92)	(21,38)	—	—	—	—	sin límite
n. 6 El precalentamiento es necesario para la utilización y para la manipulación	65	—	2,00 f)	—	—	—	—	—	(900)	(9000)	45	300	—	—	(92)	(638)	—	—	—	—	—	—	—	sin límite

a) El contenido de azufre en los combustibles usados para tratamientos térmicos, metales no ferrosos, vidrio, hornos para cerámica y otros fines particulares debe estar de acuerdo con los valores que aparecen en la última columna. Otros límites del azufre sólo se pueden especificar con un acuerdo recíproco entre comprador y vendedor.

b) Se pueden especificar puntos más altos o más bajos, si así lo requieren las condiciones de almacenamiento o empleo.

c) El punto de destilación del 10 % se puede especificar a 226 °C máx. para otros fines que no sean la combustión en quemadores con atomizador.

d) Cuando el punto de deslizamiento es menor de -18 °C la viscosidad mínima será 1 R centistokes y no se reflejará el punto mínimo del 90 % de destilado.

e) Los valores de la viscosidad sólo tienen carácter informativo.

f) La cantidad de agua de destilación más los sedimentos no debe superar el 2 %. La cantidad de sedimentos por extracción no debe superar el 0,5 %.

**TABLA** Especificaciones técnico-comerciales de los combustibles líquidos para usos térmicos industriales y no industriales (Francia)

Características	Gas-oil	Aceite combustible			
		Doméstico	Ligero	Pesado n. 1	Pesado n. 2
Color	máx 5 (Union)	rojo	negro	—	—
Viscosidad máxima en grados Engler:					
a 20 °C	1.74	1.8	40	—	—
a 50 °C	—	—	—	< 14	< 40
Sedimentos, máx. %	0	0.10	0.15	0.25	0.25
Agua, máx. %	indicios	0.10	< 0.50	< 0.75	< 1.50
Agua + sedimentos, máx. %	—	0.10	—	—	—
Cenizas, %	indicios	indicios	0.10	—	—
Cok (Conradson), %	—	0.35	—	—	—
Asfaltenos, %	—	—	0.90	1	1
Azufre, %	1	1.6	< 2.7	< 3.5	< 4
Acidez mineral	0	—	—	—	—
Punto de inflamabilidad °C:					
mín.	60	60	70	70	70
máx.	—	140	140	140	190
Punto de deslizamiento °C:					
del 1.4 al 30.9 mín	-7	—	0	0	0
del 3.10 al 31.3 mín	-10	—	0	0	0
del 15.10 al 14.4 mín	—	-6	0	0	0
del 15.4 al 14.10 mín	—	-3	0	0	0
Destilación:					
250 °C máx.	65 %	< 65 %	—	—	—
270 °C máx.	—	—	50 %	50 %	50 %
300 °C máx.	90 %	—	—	—	—
Índice de cetano	50	40	—	—	—
Poder calorífico superior:					
mín. kcal/kg	10750	10650	10500	10300	10200
máx. kcal/kg	10800	10700	10600	10400	10300
Calor específico a 50 °C					
kcal/kg	0.45	0.44	0.41	0.39	0.38
Densidad a 15 °C:					
mín. kg/dm <sup>3</sup>	0.82	0.83	0.90	0.94	0.95
máx. kg/dm <sup>3</sup>	0.89	0.90	0.94	0.98	0.99

Viscosidad.- La viscosidad de un líquido puede definirse por la resistencia que oponen sus moléculas a la fuerza que tiende a desplazarlas. Mide el frotamiento interno, decrece con la temperatura y aumenta con la presión.

La unidad práctica de viscosidad absoluta es el POISE que es el coeficiente de viscosidad absoluta medida en C.G.S.

La unidad práctica de viscosidad cinemática es el STROKE, que es el cociente del coeficiente de viscosidad absoluta por la densidad del líquido a la temperatura de ensayo.

Unidad de Viscosidad

<u>FRANCIA</u>	<u>U.S.A.</u>	<u>INGLATERRA</u>
Centistoke	°Saybolt universal	°Redwood No. 1
°Engler	°Saybolt Furol (*)	°Redwood Almirante (*)

El °Engler se define como la relación entre los tiempos necesarios para el paso de  $200 \text{ cm}^3$  de aceite por el orificio calibrado del viscosímetro y una cantidad igual de agua a la misma temperatura.

Aprovechando las propiedades de los aceites, cuya viscosidad - - - - - descende por calentamiento, se recurre a éste para lograr valores adecuados de aquella para el bombeo o la pulverización.

Influencia del Agua.- Disminuye el poder calorífico del combustible y la temperatura en el hogar favorece el punto de rocío ácido y facilita la corrosión.

(\*) 1/10 del precedente.

Influencia del Azufre.- Los vapores sulfurosos desprendidos en la combustión tienen efectos nocivos en las partes metálicas de chimeneas y ductos. Dada la temperatura del hogar y los humos, es tos vapores pueden dañar la caldera.

El "punto de rocío" ácido es la temperatura a la cual se puede - condensar  $SO_4H_2$ .

Con un fuel-oil pesado, con el 4% de azufre, el punto de rocío - ácido varía entre 120-160°C.

Índice Conradson.- Es el residuo difícilmente combustible que por su naturaleza se emparenta con el carbón.

Tensión Superficial.- Esta propiedad, se relaciona con el trabajo que debe efectuarse para incrementar el área específica del aceite durante la atomización.

Poder Calorífico.- Es la cantidad de calor en kcal desprendido por la combustión de 1 kg de aceite.

Se distinguen:

- a) "Poder calorífico superior", en el que el vapor de agua producido por la combustión se considera condensado. Es el que se - obtiene directamente con la bomba calorimétrica o bien calcularlo de sus componentes.
- b) "Poder calorífico inferior", en el que el vapor de agua de la combustión forma parte de los humos y las calorías de condensación se estiman pérdidas.

La diferencia entre los dos p.c. es del orden de 600 kcal.

Calor Específico.- De interés para elegir los recalentadores - eléctricos. Prácticamente se adopta la cifra: 0.5 kcal/kg/°C, aunque este coeficiente depende de la densidad y de la temperatura.

Densidad del CombustibleCalor específico según la Temp.

0,950	a 0°C	a 50°C	a 100°C
0,900	0,375	0,403	0,438
0,850	0,423	0,452	0,488

Densidad.- Es un verdadero índice de calidad en los combustibles cuanto más denso más residual.

Administrativamente, tiene importancia porque el combustible se vende por peso.

## Coeficiente de Dilatación Cúbica

<u>Temperatura</u>	<u>Densidad</u>	<u>Coeficiente de Dilatación Cúbica</u>
0 a 100°C	0,825-0,875	0,0010-0,0008
	0,925-0,975	0,0007-0,0006

Sección de Tuberías.- Tanto para las bombas de trasiego como las de aspiración y retorno del quemador, conviene dar una sección que permita velocidades del aceite inferiores a 0,6 m/s.

En la gráfica de la Fig. 2 se muestran las curvas de viscosidades contra temperatura de varios combustibles, incluyendo los puntos de viscosidad a 40°C de los Gasoleos Industrial de PEMEX F1 y F4.

Combustibles Sólidos.- Los principales combustibles sólidos que se utilizan en la combustión de las calderas son el carbón, bagazo de caña, madera, basura urbana y polvo de coque; de éstos el más importante es el carbón, que es una mezcla de carbono, hidrógeno oxígeno, nitrógeno, azufre, agua y cenizas, de origen vegetal que quedaron enterradas hace millones de años y mediante la acción combinada del tiempo, presión y temperatura se transformaron en carbón.

Los carbones se clasifican de acuerdo con el orden de la edad geológica, en la siguiente forma:

- . lignito
- . Subbituminoso
- . bituminoso
- . antracita

Existen también otras clasificaciones como bituminoso de bajo, medio y alto volátil, semibituminosos y semiantracita, pero los más importantes desde el punto de vista energético, son los mencionados anteriormente.

El lignito es realmente un estado de transición entre la turba y el carbón subbituminoso, con aspecto de madera o arcilla, poder calorífico bajo y altos contenidos de humedad y cenizas; - contiene alrededor de un 50% de materia volátil y la humedad es del 30 al 45%, debido al alto % de humedad arden difícil e incompletamente.

El carbón subbituminoso es de aspecto negro que ha perdido el aspecto leñoso de los lignitos; el contenido de materia volátil varía de 35 a 45% y la humedad del 17 al 20%.

Los carbones bituminosos son de mejor calidad, arden con llamas largas, amarillas y humeantes. El contenido de materia volátil es del 15 al 35% y la humedad varía del 2 al 17%. Estos son los carbones que se utilizan para la producción de coque.

La antracita es un carbón muy duro de color negro lustroso y brillante, no coquizable y arde con llamas muy cortas y azules; el contenido de materia volátil es de menos de 8%. La humedad de impregnación es la humedad de la superficie o que se le incorpora mecánicamente; la humedad higroscópica es la humedad original que depende de su naturaleza. Debido a que el carbón en estado natural no tiene una composición uniforme, es necesario efectuar análisis específicos para determinar sus características y el efecto que tendrán sobre la combustión y las calderas.

Los dos análisis que se efectúan en los carbones son: el análisis químico elemental o análisis último y el análisis próximo.

Mediante el análisis químico se determina el contenido de carbono total, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y humedad.

El análisis próximo de un carbón proporciona los componentes físicos, y puede efectuarse sin análisis químico, mediante una balanza de laboratorio y un horno con regulación de temperatura. El análisis próximo proporciona los contenidos en porcentaje de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo; éste último se determina por balance a 100% con los otros tres componentes.

La materia volátil que se encuentra en los carbones es metano y otros hidrocarburos, hidrógeno y monóxido de carbono como material combustible, además de gases incombustibles como el bióxido de carbono y nitrógeno.

El poder calorífico superior (PCS) de un carbón, conociendo el contenido de sus componentes puede obtenerse mediante la fórmula siguiente de Dulong.

$$\text{PCS} = 8111 \text{ C} + 34444 \left( \text{H} - \frac{\text{O}}{8} \right) + 22505, \text{ kcal/kg}$$

Para determinar el poder calorífico de un carbón, conociendo el análisis próximo no existen métodos satisfactorios analíticos, debiendo ser medido en un calorímetro, sin embargo, las siguientes ecuaciones dan valores aproximados de poder calorífico de acuerdo con el contenido de materia volátil (MW).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

III.- COMBUSTION

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

### III.- COMBUSTION

#### 1.- GENERAL

El proceso de combustión es un fenómeno físico y químico en donde una sustancia llamada combustible se combina con el oxígeno (contenido en el aire), resultando gases de combustión y una cantidad de calor por el efecto térmico de la reacción. El aspecto físico de la combustión considera los factores aerodinámicos que determinan una cierta velocidad de desarrollo de la reacción y factores térmicos que determinan ciertos flujos de calor en ciertas etapas de la combustión. Prácticamente los dos aspectos, químico y físico no pueden separarse y se influyen recíprocamente.

El fenómeno de combustión es el aspecto primario en el diseño de calderas y afecta en una u otra forma a los demás procesos que tienen lugar, como por ejemplo, la transferencia de calor, resistencia estructural, contaminación, materiales, etc. Su influencia no sólo comprende la parte de Diseño, sino también la operación y mantenimiento.

Como la combustión está condicionada a factores aerodinámicos y térmicos, el significado del proceso de combustión no puede ser estudiado independientemente del quemador y el hogar o parrillas en donde tiene lugar el proceso de combustión; en este sentido la combustión debe correlacionarse con los capítulos de quemadores y hogar para poder comprender el conjunto del fenómeno que se desarrolla dentro de la instalación.

En la combustión completa, los elementos combustibles C, H y S se transforman por oxidación en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ ; además de los productos de oxidación, se obtienen en los gases de combustión  $\text{N}_2$ , proveniente del aire para la combustión y agua en la forma de vapor, contenida en el combustible y en la humedad del aire.

El proceso real de combustión no puede ser descrito con las reacciones químicas de oxidación, ya que éstas sólo marcan el estado inicial y final en el sistema; en realidad un número grande de reacciones intermedias en que aparecen transformaciones con velocidades grandes que producen inestabilidades intermedias (con radicales libres) caracterizan el proceso de combustión desde el punto de vista de desarrollo como velocidad, aportación de calor, elementos que frenan la reacción, etc. Un proceso de este tipo puede llamarse de reacción en cadena. El proceso de combustión se inicia por el calentamiento local de un cierto volúmen de la mezcla combustible hasta la temperatura de reacción, y el desprendimiento de calor de la reacción local hace que continúe la reacción en el volúmen circundante; el aumento de la cantidad de calor desprendida durante el tiempo del proceso hace que se eleve la temperatura que acelera la reacción de combustión de acuerdo con una ley exponencial. A esta fase del proceso se le denomina encendido.

A continuación el proceso se desarrolla con velocidad constante denominada velocidad de combustión y durante esta etapa existen por una parte factores que tienden a aumentar la velocidad de reacción ramificando las cadenas de reacción, y por otra parte, factores que disminuyen la velocidad de la reacción como la interrupción de la reacción en cadena al incidir las llamas en paredes frías o el encuentro con moléculas inertes.

En la descripción anterior del fenómeno de combustión, se considera que se tiene una mezcla homogénea de combustible y aire para la combustión con lo que se tiene una combustión cinética, sin embargo existen algunas situaciones en que el aire no está mezclado con el combustible y entonces tiene lugar un proceso de difusión en el cual la combustión se denomina difusiva y el proceso se desarrolla en dos etapas, siendo la primera la penetración del combustible y el aire por difusión y la segunda, la combustión del combustible. Debido a que el proceso de difusión es mucho más lento

que el proceso de combustión, las velocidades de reacción de las flamas difusivas se determinan por la velocidad de difusión.

FLAMAS.- El fuego y las llamas o flamas son las manifestaciones visibles del proceso físico-químico de la combustión.

Existen varios límites para que se produzca la flama, - - siendo estos los siguientes:

- límite de inflamabilidad, que se refiere a las relaciones combustible-comburente mínimas y máximas.
- límites de temperatura a las cuales debe estar el combustible.
- límites de presión (el inferior está abajo de  $10^{-3}$  atmósferas y en el superior se ha llegado hasta 100 atmósferas).
- el efecto pared, que se refiere a la limitación que tienen las paredes sobre la flama.

La temperatura teórica de la flama puede calcularse mediante la siguiente ecuación.

$$T = \frac{H}{\Sigma(n C_p)}$$

En donde

H = calor de combustión de 1 kg de combustible

$\Sigma(nC_p)$  = volúmen de los gases de combustión ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ) multiplicados por sus respectivos calores específicos.

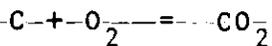
En la realidad no se alcanza la temperatura anterior, debido a las siguientes causas:

- Exceso de aire
- Calor sensible del aire
- Cantidad y calor de combustión de los productos de la reacción.
- Radiación de la llama de las paredes del hogar y caldera disociación.

Reacciones Químicas.- Las reacciones de combustible-comburente son la base del proceso de combustión que involucra fenómenos muy complejos por que las reacciones son con fluidos en movimiento y con fuertes variaciones de temperatura.

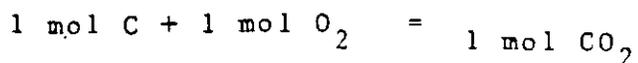
Las leyes que gobiernan la transmisión de calor y el transporte de masa controlan en muchos casos el proceso, ya que las reacciones químicas son generalmente mucho más rápida la mezcla del combustible con oxígeno determina la velocidad total del conjunto en algunos casos.

En las ecuaciones siguientes se indican las reacciones químicas de los materiales combustibles más importantes al mezclarse con el oxígeno, que en la mayoría de los procesos industriales provienen del aire atmosférico; se incluyen también los pesos, moles y volúmenes de los materiales que intervienen en la reacción. Desde el punto de vista de la mayoría de los procesos de ingeniería al aire atmosférico es una mezcla que tiene 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno en volumen, y 23.15 de oxígeno y 76.85% de nitrógeno en peso; el peso molecular de aire es de 28.15 en las condiciones estándar.

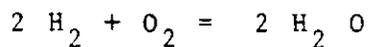


$$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 44 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} + 2.67 \text{ kg} = 3.67 \text{ kg}$$

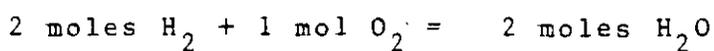


$$1 \text{ vol.} + 1 \text{ vol.} = 1 \text{ vol.}$$

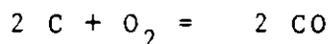


$$4 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 36 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} + 8 \text{ kg} = 9 \text{ kg}$$

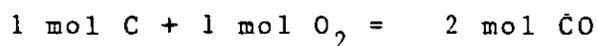


$$2 \text{ vol.} + 1 \text{ vol.} = 2 \text{ vol.}$$

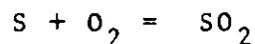


$$24 \text{ kg.} + 32 \text{ kg} = 56 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} + 1.33 \text{ kg} = 2 \text{ kg}$$

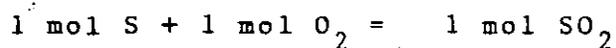


$$2 \text{ vol} + 1 \text{ vol.} = 2 \text{ vol.}$$

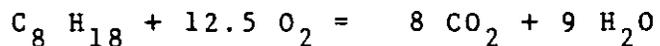


$$32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 64 \text{ kg}$$

$$32 \text{ kg} + 1 \text{ kg} = 2 \text{ kg}$$

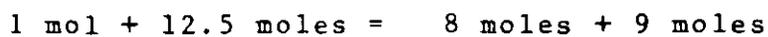


$$1 \text{ vol} + 1 \text{ vol} = 1 \text{ vol}$$



$$114 \text{ kg} + 400 \text{ kg} = 352 \text{ kg} + 162 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} + 3.51 \text{ kg} = 3.09 \text{ kg} + 1.42 \text{ kg}$$



$$1 \text{ vol} + 12.5 \text{ vol} = 8 \text{ vol} + 9 \text{ vol.}$$

Las reacciones anteriores pueden efectuarse bajo tres regímenes:

- Oxidación lenta a temperatura limitada y en ocasiones sin flama.
- Mezcla de combustible-comburente obligado a reaccionar por una fuente de calor externa, obteniéndose una onda de deflagración o frente de llama.
- Ondas de detonación directamente o por transición de una onda precedente de deflagración.

Factores Físicos de la Combustión.- En condiciones de llama estable a altas temperaturas y presiones arriba de la atmosférica, los aspectos físicos son los que adquieren más importancia en el proceso de combustión.

En el caso de los combustibles líquidos, los aerosoles de pequeñas gotas con dimensiones inferiores a 10 micras se comportan como mezclas normales de gas-aire y en las que tienen dimensiones superiores a 10 micras se obtiene una combustión separada de las gotas sueltas en el aire que las rodea, con ignición en cadena; la presencia de gotas de estas dimensiones reduce el límite inferior de inflamabilidad.

Los combustibles, gasoleos y diesel tienen temperaturas medias de ebullición elevadas y estabilidades térmicas reducidas, por lo que para quemarlos no se puede proceder mediante evaporación, requiriéndose para una buena combustión, realizar una subdivisión forzada de líquido para producir pequeñísimas gotas infinitesimales dispersas en el aire para formar una niebla muy uniforme (pseudo mezcla gaseosa), dentro de la cual puede provocarse la llama.

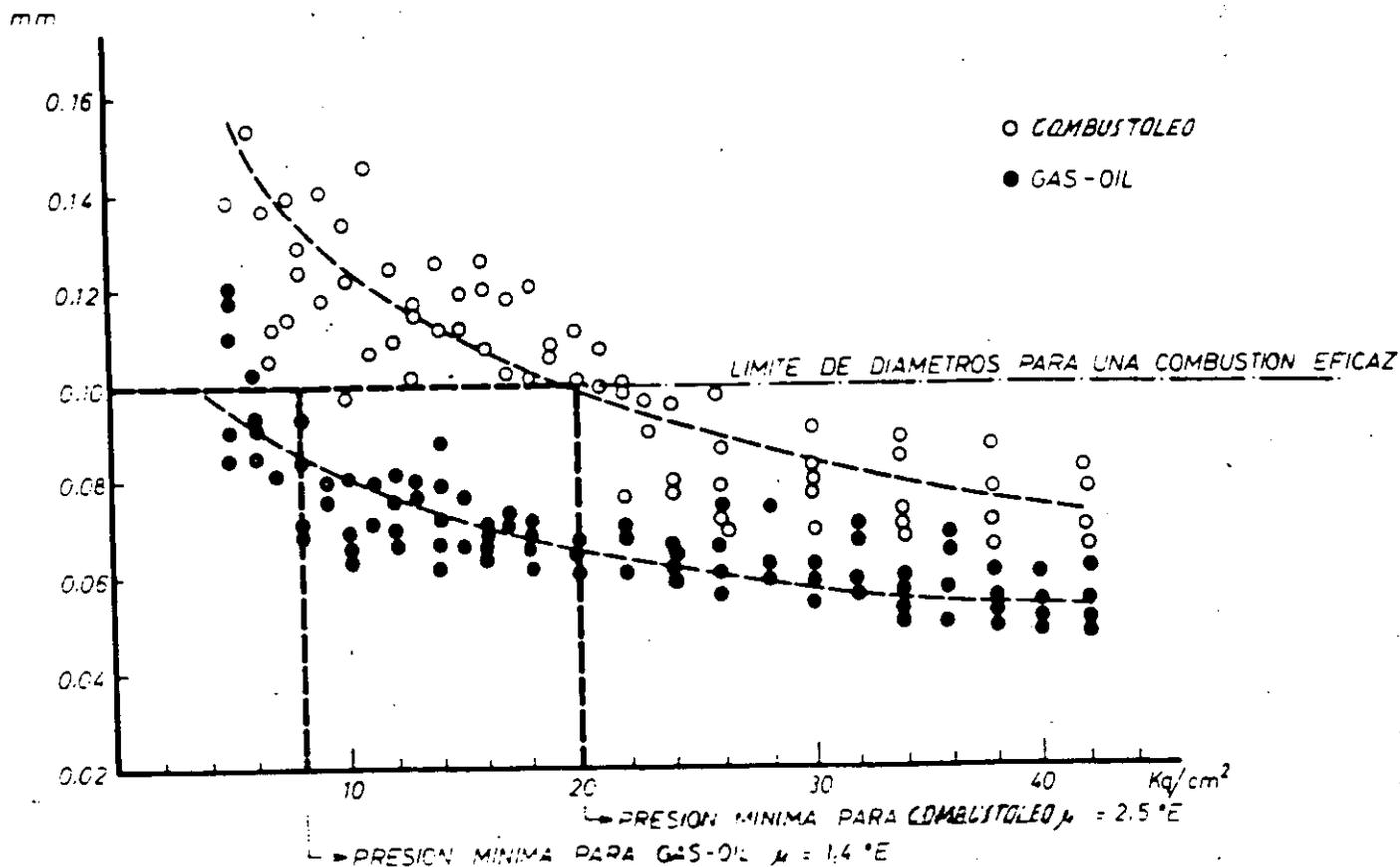
La subdivisión del aceite combustible conocida como atomización, se efectúa mecánicamente por medio de presión o bien por medio de un fluido auxiliar (vapor o aire), en la

Fig. 3 se muestra el tamaño de la subdivisión de gotas con la presión de atomización (pulverización) tanto para combustible como gasoleo. En la Fig. 4 se muestra la zona de los diferentes tipos de atomización.

Los aceites combustibles en condiciones de no excesiva turbulencia se caracterizan por llamas muy luminosas y radiantes.

De los diversos procesos físicos que intervienen en la combustión la turbulencia es con mucho el más importante. Corresponde a un movimiento desordenado de los fluidos con formación de un gran número de torbellinos que interfieren unos con otros, dispersos en todo el medio en reacción, de volumen y características cinéticas muy diversas entre sí.

#### RELACION DE LOS DIAMETROS DE PULVERIZACION CON LA PRESION



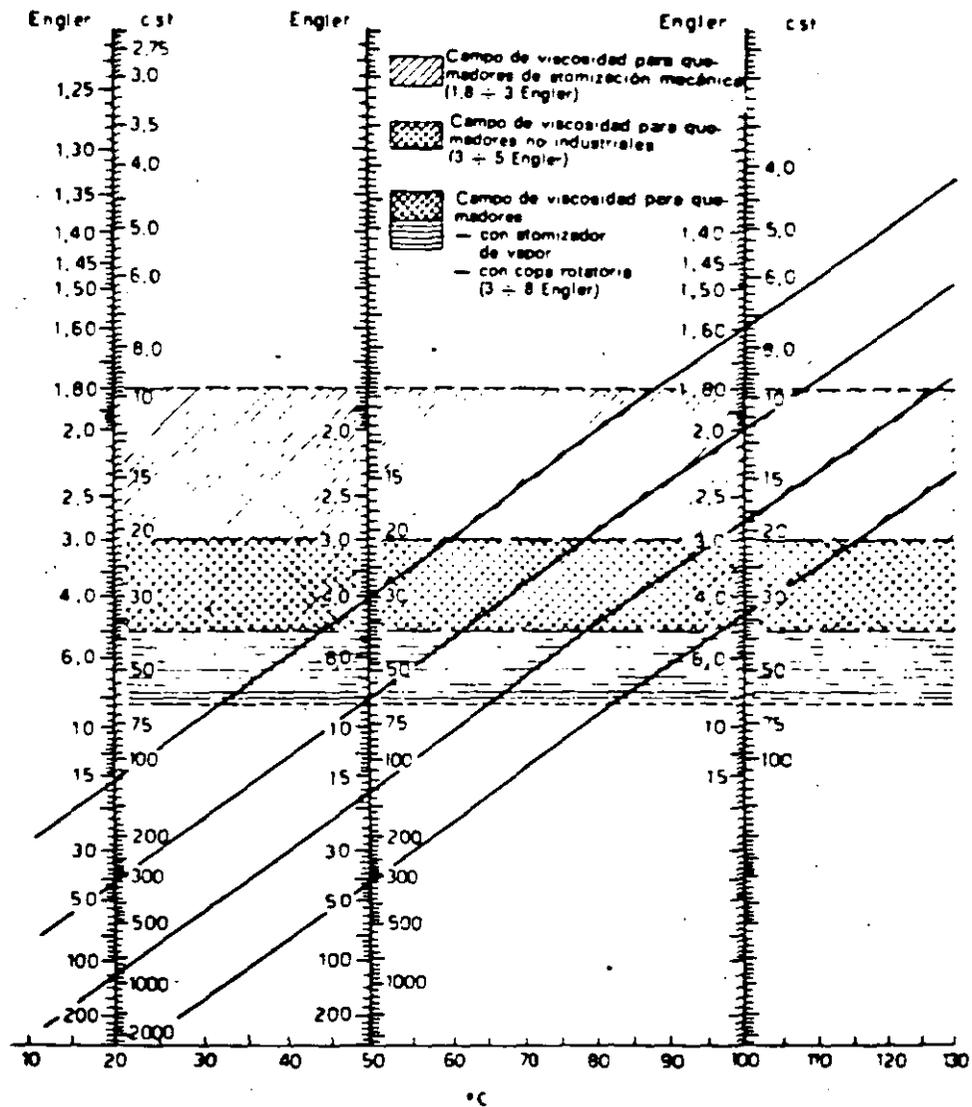


Fig . —Variaciones de la viscosidad de los aceites combustibles con la temperatura: las líneas oblicuas se refieren a algunos aceites típicos. Las zonas de puntos delimitan los campos de viscosidad referente al empleo, en condiciones óptimas, de los diversos tipos de quemadores industriales

Aire Teórico. - La cantidad de aire teórico necesario para la combustión  $A_t$ , de acuerdo con las ecuaciones de las reacciones químicas y la tabla III-2 de combustión, puede calcularse por medio de la siguiente ecuación conociendo la proporción de sus constituyentes:

$$A_t = 11.47C + 34.48 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 4.31S, \text{ en kg}$$

$$A_t = 0.89C + 26.77 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 3.33S, \text{ en m}^3$$

En donde H es el disponible para la combustión, que no está combinado en el oxígeno formando agua.

La cantidad de aire teórica para la combustión también puede ser expresada en forma práctica y conveniente, relacionándola con el poder calorífico superior del combustible y que para los aceites combustibles es de 6.1 kg de aire/10,000 kcal/kg.

Exceso de Aire. - Con objeto de asegurar que todo el combustible se mezcla en el oxígeno del aire, en la práctica se utiliza una mayor cantidad de aire que la teórica o estequiométrica, llamada exceso de aire que depende del tipo de combustible y sistema de combustión; si se designa al exceso de aire como E, la cantidad de aire real  $A_r$  empleado será:

$$A_r = A_t (1 + E)$$

Los valores usuales de E, son los siguientes:

- |                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| . Combustible gaseoso                | 5 a 10%  |
| . Combustible líquido                | 5 a 10%  |
| . Combustible sólido (en suspensión) | 20 a 40% |
| . Combustible sólido (en parrillas)  | 40 a 80% |

Combustible (peso)	Formula de combustión (peso)	Productos de Combustión (peso)	Productos de combustión.				Oxígeno y Nitrógeno del aire de combustión.							
			Por Kg de comb.		Por m <sup>3</sup> de comb.		Por Kg de combustible.				Por m <sup>3</sup> de combustible.			
			kg	m <sup>3</sup>	kg	m <sup>3</sup>	kg O <sub>2</sub>	kg N <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>	kg O <sub>2</sub>	kg N <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> N <sub>2</sub>
C (12)	C + O <sub>2</sub> (12 + 32)	CO <sub>2</sub> (44)	3.667	1.867	-	-	2.667	8.8	1.867	7.02	-	-	-	-
S (32)	S + O <sub>2</sub> (32 + 32)	SO <sub>2</sub> (64)	2.0	0.7	-	-	1.0	3.31	0.7	2.63	-	-	-	-
H <sub>2</sub> (2)	2 H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (4 + 32)	2 H <sub>2</sub> O (36)	9.0	11.19	0.804	1.0	8.0	26.48	5.6	21.1	0.713	2.36	0.5	1.88
CO (28)	2 CO + O <sub>2</sub> (56 + 32)	2 CO <sub>2</sub> (88)	1.57	0.8	1.97	1.0	0.572	1.9	0.4	1.504	0.714	2.36	0.5	1.88
CH <sub>4</sub> (16)	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> 16 + 64 subdividido: C + O <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O ( 80 )	5.0	4.2	3.571	3.0	4.0	13.24	2.8	10.52	2.86	9.5	2.0	7.52
		CO <sub>2</sub>	2.75	1.4	1.964	1.0	2.0	6.62	1.4	5.26	1.43	4.75	1.0	3.76
		2 H <sub>2</sub> O	2.25	2.8	1.607	2.0	2.0	6.62	1.4	5.26	1.43	4.75	1.0	3.76
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (28)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3O <sub>2</sub> 28 + 96 subdividido: 2C + 2O <sub>2</sub> 2H + O <sub>2</sub>	2CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O ( 124 )	4.43	3.2	5.548	4.0	3.43	11.35	2.4	9.02	4.3	14.2	3.0	11.28
		2 CO <sub>2</sub>	3.14	1.6	3.94	2.0	2.29	7.6	1.6	6.01	2.87	9.47	2.0	7.52
		2 H <sub>2</sub> O	1.29	1.6	1.608	2.0	1.14	3.75	0.8	3.01	1.43	4.73	1.0	3.76

TABLA III-2.- VALORES DE COMBUSTION

Productos De Combustión. -- Cuando se tiene una combustión completa existen los siguientes productos en los gases de combustión.

Composición

CO<sub>2</sub>

O<sub>2</sub>

N<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O (en forma de vapor)

En los combustibles que contienen azufre (S), se tienen además SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>.

En la combustión estequiométrica, se emplea 1 m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> para la combustión de un m<sup>3</sup> de carbono y se obtiene como producto de combustión 1 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>, pero como el O<sub>2</sub> se obtiene del aire atmosférico que está constituido por 21% de O<sub>2</sub> y 79% de N<sub>2</sub> en volúmen (23.13% de O<sub>2</sub> y 76.87% de N<sub>2</sub> en peso), resulta que un combustible que no contenga Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre deberá producir gases de combustión compuestos de 21% de CO<sub>2</sub> y 79% de N<sub>2</sub> en volúmen. Como en la práctica el combustible no sólo está constituido por C, el valor máximo de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión nunca llega a 21% y sólo se acerca más cuanto menor es el contenido de H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y S en el combustible. Para una combustión con exceso de aire y con un combustible formado prácticamente por C, la suma de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> se aproximan al 21%, siendo sus volúmenes complementarios para alcanzar esta cifra en función del exceso de aire empleado.

Cantidad de Gases de Combustión. -- Los gases de combustión se componen de los gases secos y del vapor de agua; la cantidad de gases teóricos C, se puede obtener de la tabla No. III-2 de combustión.

$$G_1 = 12.47 C + 26.48 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 5.31 S + N, \text{ en kg}$$

$$G_1 = 8.89 C + 21.1 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 3.36 S + 0.796 N, \text{ en m}^3$$

El valor  $26.48 \left( H - \frac{O}{8} \right)$  ó bien  $21.1 \left( H - \frac{O}{8} \right)$  es el nitrógeno que es liberado por el aire de combustión durante la combustión del H y 0.796 es el volúmen específico del nitrógeno.

El vapor de agua contenido en los gases  $G_2$  se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$G_2 = 9 H + E, \text{ en kg}$$

$$G_2 = 11.49 H + 1.244 E, \text{ en m}^3$$

En donde E es el contenido de agua o humedad en el combustible.

La cantidad total de gases teóricos  $G_3$ , será:

$$G_3 = G_2 + G_1$$

$$G_3 = 12.47 C + 35.48 H - 26.48 \frac{O}{8} + 5.31 S + N + E, \text{ en kg}$$

$$G_3 = 8.89 C + 32.29 H - 21.1 \frac{O}{8} + 3.33 S + 0.796 N + 1.244 E, \text{ en m}^3$$

Si  $\mu$  es el exceso de aire, la cantidad real de aire  $A_r$ , será:

$$A_r = \mu A_1$$

Y la cantidad de gases reales  $G_r$ , será:

$$G_r = G_3 + (A_r - A_1)$$

Densidad.— La densidad P de los gases de combustión de composición media a 0° y a 1.102 bar es:

$$P = 1.34$$

Es decir que  $1\text{m}^3$  de gases contiene 1.34 kg de materia; en la tabla III-3, se dan los pesos específicos y otros datos de varios gases. Altos contenidos de vapor de agua en los gases de combustión disminuyen sensiblemente la densidad.

Gas	Símbolo	No. de átomos	Masa molecular.	Peso específico de $1\text{kg}$ en $\text{m}^3$ .	Volúmen específico de $1\text{kg}$ en $\text{m}^3$ .
Vapor de agua	$\text{H}_2\text{O}$	3	18.016	0.804	1.2438
Aire (seco)	-	-	28.96	1.293	0.7735
Oxígeno	$\text{O}_2$	2	32.00	1.429	0.6998
Hidrógeno	$\text{H}_2$	2	2.016	0.0899	11.1222
Nitrógeno (del aire)	$\text{N}_2$	2	28.016	1.257	0.7957
Oxido de carbono	$\text{CO}$	2	28.0	1.25	0.80
Gas carbónico	$\text{CO}_2$	3	44.0	1.977	0.506
Anhídrido sulfuroso	$\text{SO}_2$	3	64.06	2.926	0.3417
Metano	$\text{CH}_4$	5	16.03	0.717	1.3951
Etileno	$\text{C}_2\text{H}_4$	6	28.03	1.2605	0.7933

TABLA III-3.- PROPIEDADES DE GASES

Calor Específico.- El calor específico es función de la composición y temperatura de los gases; el valor promedio de calor específico entre 0 y t °C de temperatura de un gas se designa por:

cp referido a 1 kg de gases

Cp referido a 1 m<sup>3</sup> de gases

El calor específico aumenta con el incremento de temperatura; los gases de combustión que contienen vapor de agua tienen un calor específico mayor que los gases secos.

En la tabla No. III-4 se muestran los calores específicos de algunos de los gases que componen los gases de combustión; como éstos en realidad son mezclas, el calor específico debe calcularse proporcionalmente a la composición.

Calor Total.- La cantidad de calor Q contenido en una masa G de gases con calor específico Cp o cp a la temperatura t es la siguiente:

$$Q = G C_p T, \text{ en kcal/Gm}^3 \text{ de gas}$$

$$Q = G c_p t, \text{ en kcal/Gkg de gas}$$

Si se enfrían Gm<sup>3</sup> o Gkg de gases de la temperatura t a t', la cantidad de calor Q extraída de los gases es:

$$Q = G C_p (t - t'), \text{ en kcal}$$

$$Q = G c_p (t - t'), \text{ en kcal}$$

Siendo cp y Cp los calores específicos promedios entre t y t'.

Densidad $\rho$ , en kg/cm <sup>3</sup>	1,257	1,429	1,293	1,977	0.804
t, en °C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Aire	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0	0.311	0.313	0.311	0.390	0.356
100	0.312	0.315	0.311	0.412	0.358
200	0.313	0.319	0.313	0.433	0.367
300	0.314	0.324	0.315	0.451	0.372
400	0.317	0.330	0.318	0.465	0.378
500	0.319	0.335	0.321	0.481	0.384
600	0.322	0.339	0.324	0.493	0.390
700	0.325	0.343	0.328	0.504	0.397
800	0.328	0.347	0.331	0.514	0.403
900	0.331	0.334	0.350	0.523	0.410
1000	0.334	0.354	0.337	0.530	0.416
1100	0.337	0.356	0.340	0.538	0.423
1200	0.340	0.359	0.343	0.545	0.427
1300	0.342	0.365	0.345	0.550	0.434
1400	0.345	0.364	0.348	0.556	0.439
1500	0.347	0.366	0.350	0.560	0.444
1750	0.352	0.370	0.354	0.571	0.453
2000	0.356	0.375	0.360	0.580	0.464

15  
 TABLA III-4.- CALORES ESPECIFICOS MEDIOS DE GASES, AI  
 RE Y VAPOR DE AGUA EN KCAL/M<sup>3</sup> (A PRESION  
 CONSTANTE, ENTRE 0 Y t °C.

Temperatura de Rocío.- La temperatura de rocío de los gases de combustión, es decir, la temperatura de condensación  $H_2O$  en los gases no debe alcanzarse o trabajarse por debajo de ella, debido que las superficies de cambio de calor se humedecen con lo que se vuelven susceptibles a ataques de corrosión.

La temperatura de rocío varia con el exceso de aire empleado, con la humedad y con el contenido de azufre del combustible.

La temperatura de rocío aumenta con el contenido de S en el combustible; el S se quema y da  $SO_2$  (Anhídrico Sulfuroso) - que a temperaturas inferiores a  $700^\circ C$  para un exceso de aire dado produce  $SO_3$  Anhídrido Sulfúrico. A temperaturas inferiores a  $500^\circ C$  el  $SO_3$  por reacción en el vapor de agua de los gases de escape, se transforma en  $H_2SO_4$  Acido Sulfúrico que aproximadamente a  $250^\circ C$  alcanza el límite de saturación; de acuerdo con lo anterior, la temperatura de rocío se vuelve extremadamente importante en las calderas que queman aceite combustible con alto % de S como en el caso del combustóleo de México que tiene hasta un 4% de S.

Diagrama de Calor Total-Temperatura (J-t) Fig. III-5.-

El diagrama de calor total - temperatura (J-t) es válido - con una buena aproximación para todos los combustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) y está fundamentado en el hecho de que en el caso de la combustión con la cantidad de aire teórico, el calor total por  $m^3$  de gas de combustión es aproximadamente el mismo para el carbono y para el hidrógeno.

En efecto 1 kg de C produce  $1,867 m^3$  de  $CO_2$  y  $7.02 m^3$  de  $N_2$  que dan en total  $8.887 m^3$  de gases de combustión conteniendo el PCI de 1 kg de C que es de 8080 kcal, de tal forma que  $m^3$  de gases de combustión contienen  $8080/8.887 = 909$  kcal.

Por otra parte, 1kg de  $H_2$  produce 11.9  $m^3$  de  $H_2O$  y 21.1  $m^3$  de  $N_2$ , que dan en total 32.29  $m^3$  de gases de combustión que contienen el PCI de  $H_2$ , es decir 28570 kcal y en consecuencia, 1  $m^3$  de gases de combustión contiene  $28750/32.29 = 885$  kcal.

La diferencia en el calor de los gases es de  $\pm 1.33$  en promedio.

En la misma forma el calor específico de los dos gases de combustión tiene poca diferencia.

En la parte vertical del diagrama se tiene el calor total de los gases y en la parte horizontal la temperatura, en tal forma que cuando se conoce el exceso de aire y el calor total por  $m^3$  de gas de combustión, se puede conocer la correspondiente temperatura de gas, o bien inversamente cuando se conoce la temperatura se puede determinar el calor total.

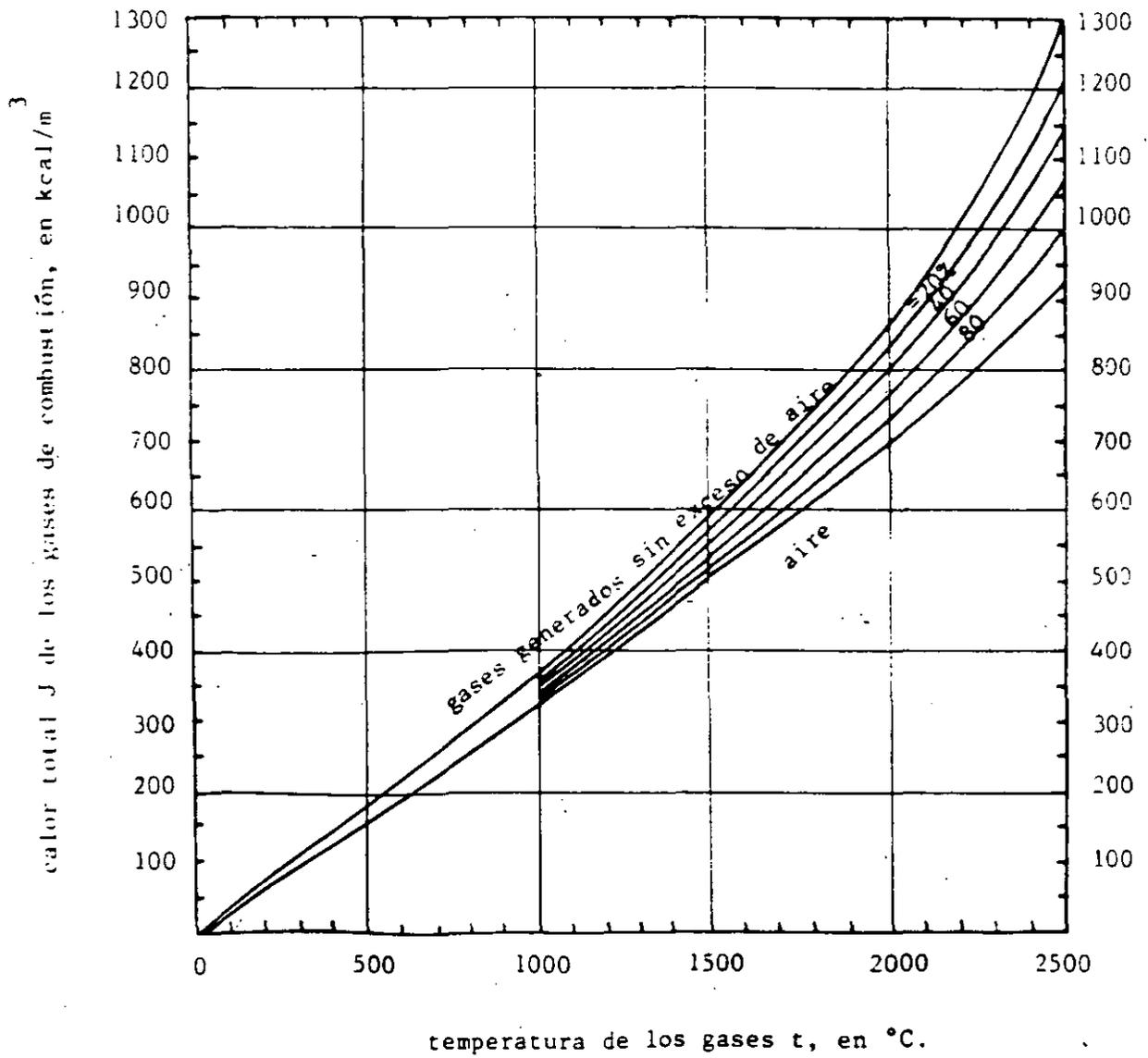


FIG. III-5.- DIAGRAMA CALOR TOTAL-TEMPERATURA (J-t) DE GASES DE COMBUSTION.

12



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

Enero 30 A FEB. 3

TEMA: SISTEMAS DE ALIMENTACION  
DE COMBUSTIBLE

EXPOSITOR:

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

#### IV.- SISTEMAS DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLE

Normalmente el combustible que se quema en las calderas no se produce en el sitio, sino que llega de fuera del predio de la planta, con algunas excepciones que no es la generalidad y que no serán tratadas en este trabajo.

Las operaciones fundamentales que se realizan para el manejo y alimentación de combustible a la caldera pueden ser agrupadas en la forma siguiente:

- . Recibo
- . Manejo (bombeo, transporte, etc.)
- . Almacenamiento
- . Preparación (calentamiento, molido, etc.)

A continuación se describirán estas operaciones fundamentales para las tres clases de combustibles: gaseoso, líquido y sólido.

##### 1.- GAS COMBUSTIBLE

Como se mencionó anteriormente, el gas combustible utilizado en las calderas grandes, es gas natural suministrado por PEMEX a través de una red de gasoductos a presión variable, normalmente alta; de los gasoductos parten ramales de alimentación hacia las plantas usuarias en donde se instalan estaciones reductoras de presión de uno o varios pasos hasta alcanzar una presión de unos  $7 \text{ kg/cm}^2$  y en dicha instalación se efectúa la medición del flujo de gas combustible.

El transporte dentro del predio de la planta se efectúa por medio de tuberías de acero reduciéndose la presión a unos  $2 \text{ kg/cm}^2$  hasta llegar a la caldera en donde nuevamente se reduce la presión a unos  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  antes de entrar a los quemadores.

Adicionalmente a la fuente normal de suministro de PEMEX, se tiene

en ocasiones otra fuente de emergencia que puede ser por medio de tanques de almacenamiento, es decir, que el almacenamiento de gas es sólo para casos de emergencia.

En el caso del gas natural, el bombeo es proporcionado por las mismas estaciones de compresión de PEMEX y el calentamiento del gas combustible, no existe.

La instalación de la tubería de gas puede hacerse enterrada en áreas abiertas y en donde atraviere lugares cerrados en que la acumulación de gases por fugas puedan producir una explosión o incendio, se debe hacer una instalación aérea preferentemente con ventilación adecuada; la velocidad del gas en la tubería es de unos 25 m/s.

El sistema de alimentación de gas a la caldera tiene una válvula de paro general accionada eléctricamente y enlazada al sistema de protecciones y bloqueos, que a caldera parada permanece cerrada mientras este abierta alguna de las válvulas macho a quemadores. Para el arranque, la válvula de paro general se bloquea con un relevador de tiempo enlazado con los ventiladores de aire de la caldera.

A continuación se hace una descripción del alcance, procedimientos de puesta en funcionamiento, paro y precauciones de un sistema de gas a una caldera (para quemadores y encendedores o pilotos) de 300 MW, que además puede quemar aceite combustible.

El objeto de éste procedimiento se puede resumir en los puntos siguientes:

- . Definir los modos de funcionamiento de los equipos que configuran el sistema de gas a quemadores y encendido.
- . Establecer la secuencia de actividades y/o pasos necesarios para el arranque y paro del sistema.

El alcance de este procedimiento comprende los equipos relacionados con el gas combustible, desde su suministro a la central hasta la inyección al generador de vapor.

En este procedimiento se incluyen los subsistemas siguientes:

- . Suministro de gas a pilotos de encendido.
- . Suministro de gas a quemadores.

Este sistema se compone de dos subsistemas, que son (Fig. IV-1):

- Subsistema de suministro de gas a pilotos.
- Subsistema de suministro de gas a quemadores.

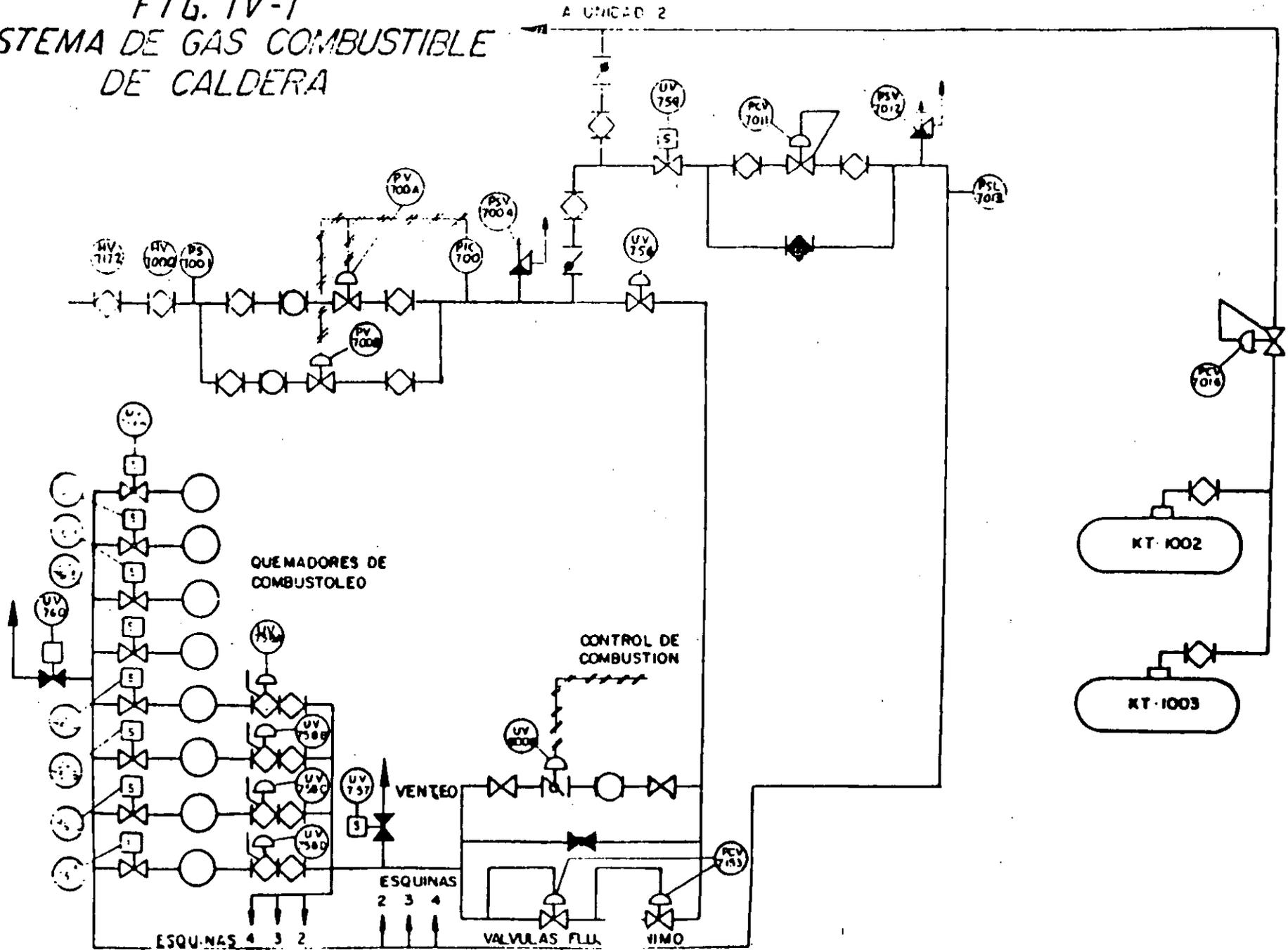
El suministro de gas puede proceder de dos fuentes diferentes; en condiciones normales el gas es proporcionado directamente por PEMEX. En caso de que este suministro no estuviese disponible, existe otra fuente de alimentación desde los tanques de emergencia (KT-1002, KT-1003) y que se usa solamente para el encendido de los pilotos de las unidades 1 y 2.

#### Subsistema de Gas a Pilotos

El suministro de gas a pilotos se puede hacer desde dos fuentes diferentes

- El suministro normal desde PEMEX a través de la válvula de aislamiento HV-7000 a una presión de  $9 \text{ kg/cm}^2$ . Existen alarmas por alta y baja presión, taradas a  $12$  y  $6 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente, y situadas en el Anunciador crítico, ventanas 1-3 y 1-4. El elemento originador de estas alarmas es el interruptor de presión PS-7001.

FIG. IV-1  
 SISTEMA DE GAS COMBUSTIBLE  
 DE CALDERA



Mediante las válvulas PV-700A y PV-700B, controladas por el PIC-700, se reduce la presión del gas a  $4.3 \text{ kg/cm}^2$ . Si por fallo en estas válvulas o en el controlador se produce una sobrepresión, actuaría la válvula de seguridad PSV-7004 descargando el gas a la atmósfera.

- El suministro desde los tanques de emergencia (sólo para pilotos de las unidades 1 y 2) se hace a través de la válvula autocontrolada - PCV-7016.

Existen válvulas de retención en las descargas de ámbos suministros al cabezal de gas a pilotos. A continuación se encuentra la válvula de corte UV-759. Esta válvula es de solenoide y su lógica de actuación se muestra en la Fig. IV-2. Los permisivos de apertura son:

- . Barrido y restablecimiento de caldera (ver parte de puesta en servicio).
- . Todas las válvulas de solenoide a pilotos deben estar CERRADAS.
- . No exista alta o baja presión de combustible durante más de dos segundos, estando alguna válvula de piloto abierta.
- . Presión del gas normal.
- . Interruptor en posición "ABRIR" o bien que estando el interruptor en "AUTO" se produzca señal de encendido.

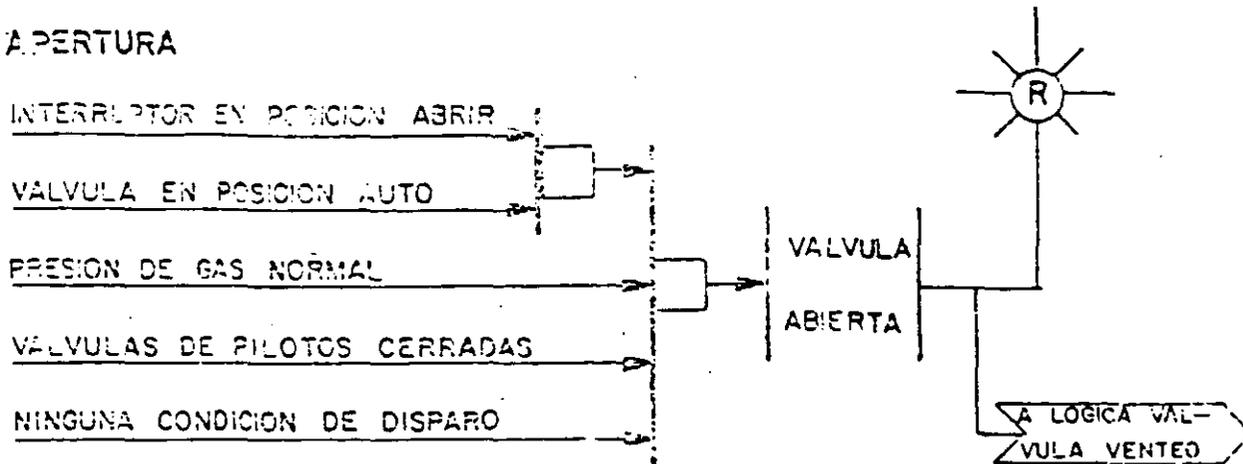
La válvula cerrará siempre que se produzca alguna de las siguientes condiciones:

- . Disparo de caldera.
- . Interruptor en posición "CIERRE"
- . Alta o baja presión de combustible durante más de dos segundos, estando alguna válvula de pilotos abierta.

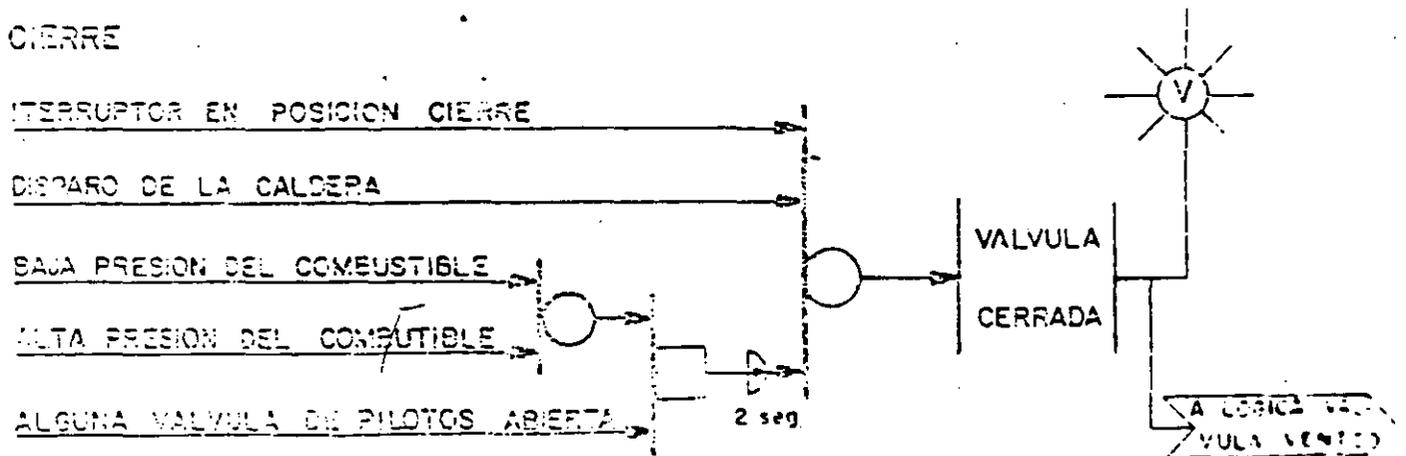
# DIAGRAMA LOGICO DE LA VALVULA DE CORTE DE GAS A PILOTOS

## FIG. IV-2

### APERTURA



### CIERRE



Después de la válvula de cortese encuentra la válvula autoregulada PCV-7011 y la válvula de seguridad PSV-7012.

La presión después de la válvula PCV-7011 debe mantenerse superior a  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  aproximadamente. Si la presión desciende a  $0.49 \text{ kg/cm}^2$  el PSL-7013 dará alarma de "GAS DE IGNICION A QUEMADORES, PRESION BAJA", ventana 2-4 el anunciador de Estado de Planta. A continuación el gas llega a los 32 pilotos de encendido de quemadores, con una capacidad unitaria de  $162 \text{ M}^3/\text{hora}$ , equivalentes a  $1'500,000 \text{ kcal/h}$ . La misión de los pilotos es servir como auxiliares para el encendido de los quemadores principales de combustóleo y/o gas.

El sistema dispone también de una válvula de venteo, UV-760, cuya lógica de actuación se muestra en la Fig. IV-3.

#### Subsistema de Gas a Quemadores

El generador de vapor consta de 16 quemadores de gas, distribuidos en cuatro niveles (elevaciones A, B, C y D) y capaces de suministrar 300 MW de potencia a plena carga.

El gas, procedente de PEMEX pasa a través de la válvula de corte UV-756. Se trata de la válvula de solenoide cuya lógica de actuación se muestra en la Fig. IV-4. Los permisos de apertura son:

- . Todas las válvulas a quemadores "CERRADAS".
- . Presión de gas normal.
- . Válvula de corte de pilotos "ABIERTA".
- . No exista condición de disparo.
- . Interruptor en posición "ABRIR".

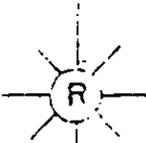
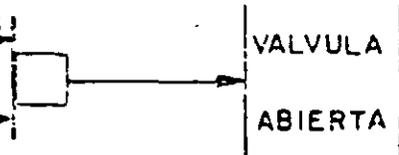
# DIAGRAMA LOGICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA DE VENTEO DE LOS PILOTOS UV-760

FIG. IV-3

## APERTURA

TODAS LAS VALVULAS DE LOS PILOTOS CERRADAS

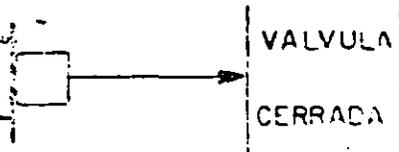
VALVULA DE CORTE DE PILOTOS CERRADA



## CIERRE

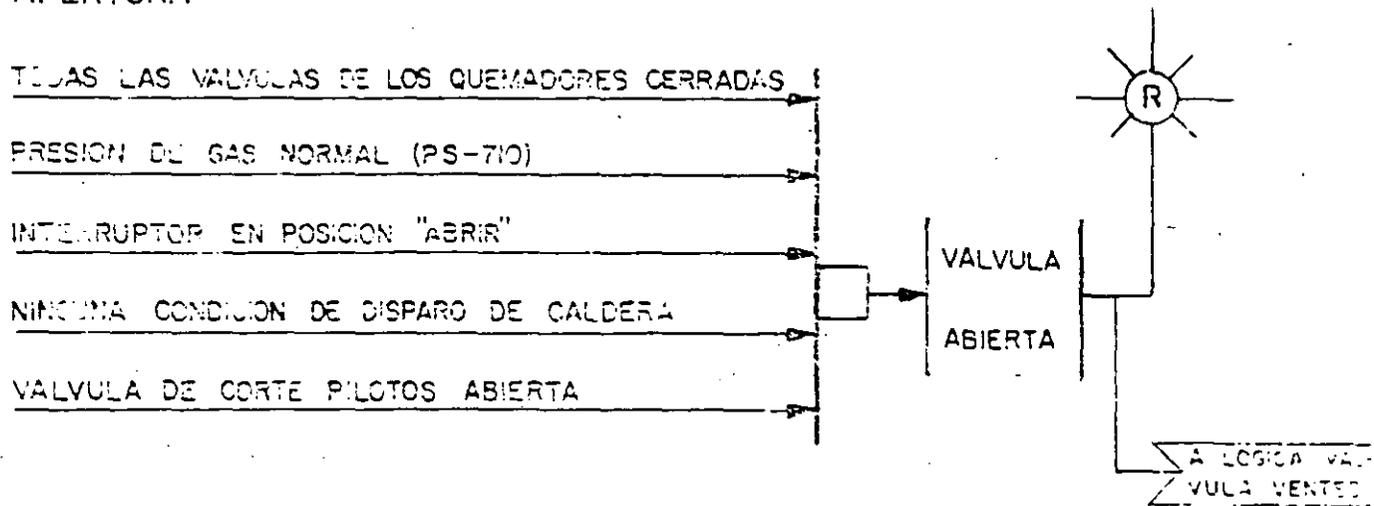
VALVULA DE CORTE DE PILOTOS ABIERTA

ALGUNA VALVULA DE PILOTOS ABIERTA

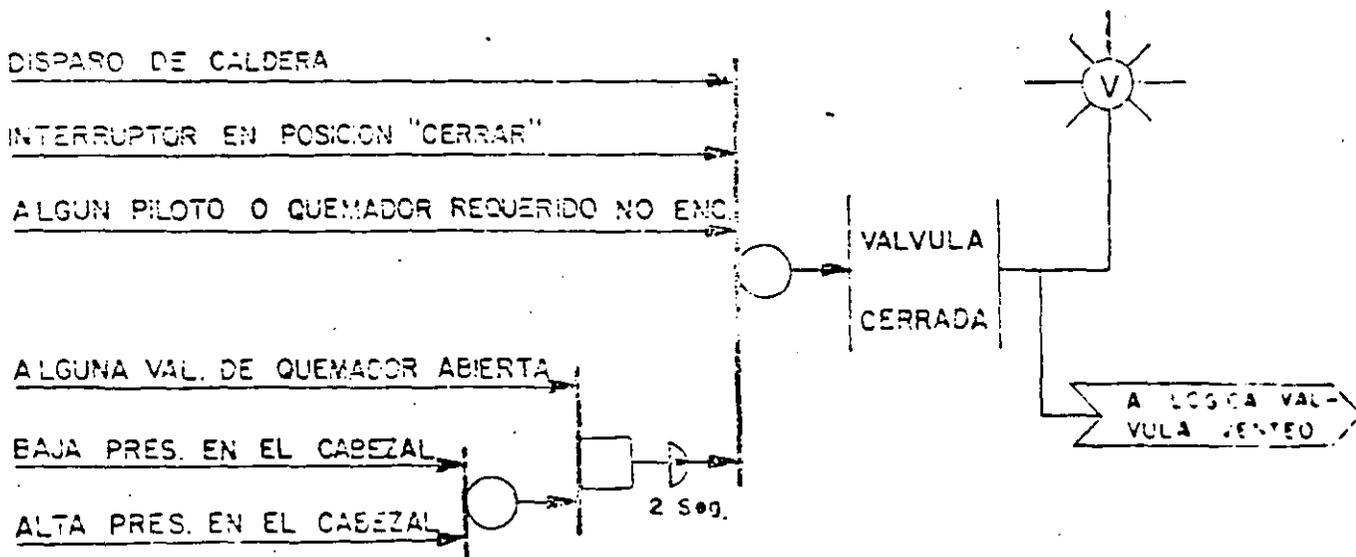


# LOGICO DE FUNCIONAMIENTO VALVULA DISPARO GAS A QUEMADORES      FIG. IV-4

## APERTURA



## CIERRE



La válvula cerrará siempre que se produzca alguna de las condiciones siguientes:

- . Disparo de caldera
- . Interruptor en posición "CIERRE"
- . Algún piloto o quemador requerido, no encendido.
- . Si transcurridos 2 segundos desde la apertura de la válvula, con alguna válvula de quemador abierta, se produce alta o baja presión de gas a quemadores (PS-711, PS-712).

Después de la válvula de corte, el gas pasa a través de la válvula UV-600B, que controla el flujo de acuerdo con la señal recibida del control de combustión. - En caso de que la presión del colector sea baja, abrirán las válvulas PCV-7153 situadas en serie y que actuarán como "by-pass" de la UV-600B.

Si la presión del gas desciende hasta  $0.3 \text{ kg/cm}^2$ , el interruptor de presión PS-712 da alarma de "GAS COMBUSTIBLE A QUEMADORES PRESION BAJA", ventana 2-3 del Anunciador Precrítico; si la presión desciende hasta  $0.25 \text{ kg/cm}^2$ , el mismo interruptor produce disparo de caldera.

El interruptor de presión PS-711 provoca disparo de caldera por alta presión al alcanzarse  $2.0 \text{ kg/cm}^2$ .

Existe una válvula de venteo UV-757 cuya lógica de actuación se muestra en la Fig. IV-5. A continuación el gas llega a los quemadores a través de las correspondientes válvulas.

El sistema de gas posee los siguientes dispositivos de protección cuya localización se muestra en la Fig. IV-6.

# DIAGRAMA LOGICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA DE VENTEO PRINCIPAL UV -757

FIG. IV-5

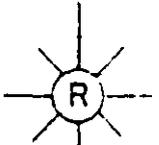
## APERTURA

VALVULA DE CORTE PRINCIPAL CERRADA

TODAS LAS VALVULAS DE QUEMADORES CERRADAS



VALVULA  
ABIERTA



## CIERRE

VALVULA DE CORTE PRINCIPAL ABIERTA

ALGUNA VALVULA DE QUEMADORES ABIERTA



VALVULA  
CERRADA

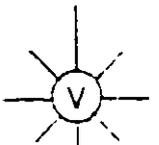
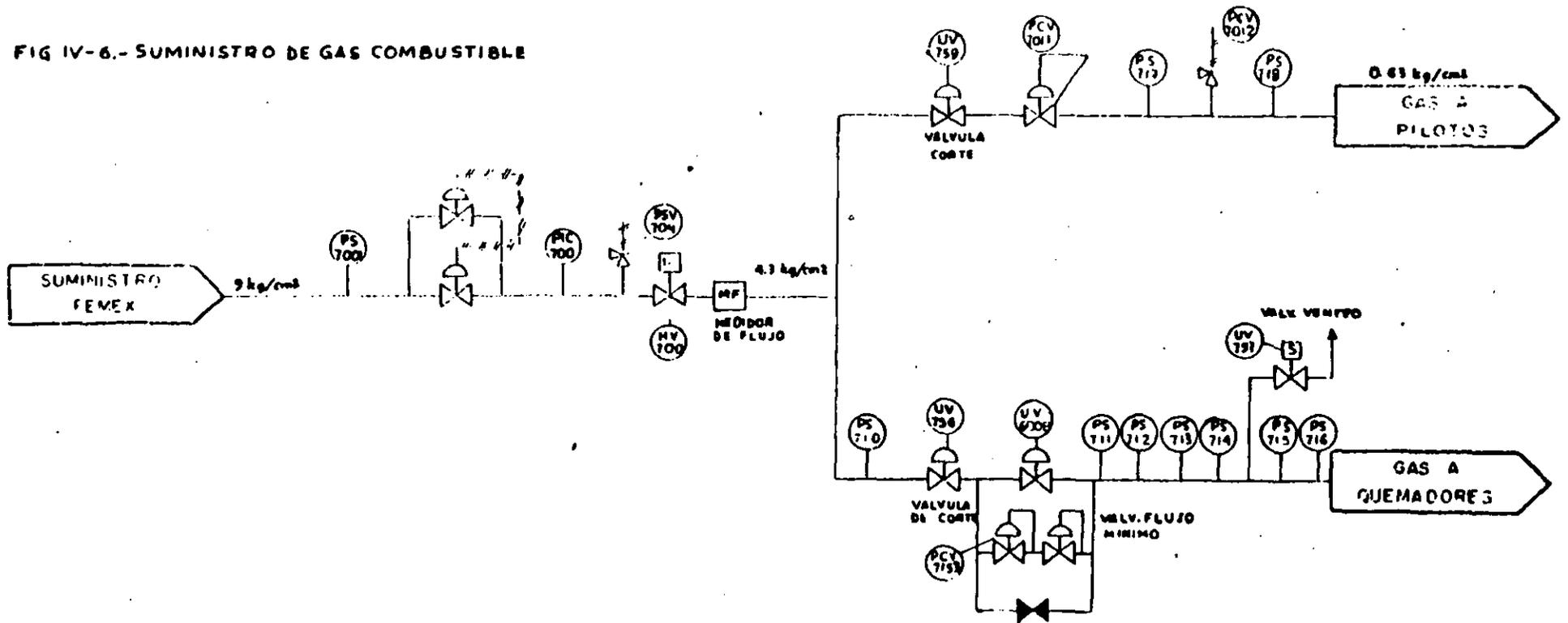


FIG IV-6.- SUMINISTRO DE GAS COMBUSTIBLE



<u>IDENTIFICACION</u>	<u>AJUSTE (kg/cm<sup>2</sup>)</u>	<u>OBSERVACION</u>
PS-710	4.3	Presión de gas de suministro.
PS-711	2.0	Disparo de caldera por alta presión de gas a quemadores.
PS-712	0.25	Disparo de caldera por baja presión de gas a quemadores.
PS-713	0.50	Paro de pilotos no requeridos.
PS-714	0.60	Arranque pilotos requeridos.
PS-715	1.4	Arranque elevación de quemadores.
PS-716	0.70	Para elevación de quemadores.
PS-717	1.00	Disparo alta presión - gas a pilotos.
PS-718	0.5	Disparo baja presión - gas a pilotos.
PS-7001	12-6	Alarmas por alta y baja presión en el suministro de gas.
PSV-7004		Muy alta presión suministro de gas.
PSV-7012		Muy alta presión gas a pilotos.

Antes de la puesta en servicio del sistema, han de comprobarse los siguientes requisitos:

- Comprobar que existe suministro de gas desde PEMEX estando abiertas las válvulas de aislamiento HV-7172 y HV-7000.
- Alinear el sistema de forma que se permita el paso de gas hasta las válvulas de corte principales, y desde éstas hacia los quemadores y pilotos.
- Si por algún motivo se ha vaciado la tubería, antes de la puesta en servicio, será necesario expulsar el aire. Esto se hará a través de las válvulas de venteo.

Para el arranque del sistema han de cumplirse las condiciones previas del apartado anterior y los permisivos de apertura de las válvulas de corte UV-759 y UV-756.

#### Comprobaciones del Funcionamiento

Durante el funcionamiento del sistema se deberá mantener un control constante sobre la evolución de los distintos parámetros y equipos, siendo los principales los siguientes:

- La presión del gas suministrado por PEMEX no deberá exceder de  $12 \text{ kg/cm}^2$ , ni disminuir a menos de  $6 \text{ kg/cm}^2$ , siendo la presión normal de funcionamiento de  $9 \text{ kg/cm}^2$ .
- Las válvulas reductoras de presión en el cabezal de gas deberán estar sujetas para mantener una presión constante de  $4.3 \text{ kg/cm}^2$  cualquiera que sea el número de quemadores en servicio.
- La válvula autoregurable de suministro de gas a pilotos deberá mantener una presión constante de  $0.63 \text{ kg/cm}^2$ .

- Las válvulas reductoras de presión de gas a quemadores deberán mantener una presión constante de  $0.4 \text{ kg/cm}^2$ .

La parada del sistema se produce por cierre de las válvulas de corte principales. Simultáneamente a este cierre, se produce la apertura de las válvulas de venteo correspondientes.

### PRECAUCIONES

- No sobrepasar los límites de presión de gas, para evitar alcanzar los puntos de disparo. Además se puede provocar al apagado de algún quemador o piloto - con el consiguiente peligro.
- Siempre que se proceda al encendido de una elevación de gas deberá comprobarse visualmente el encendido de pilotos y quemadores.
- Cuando se apague algún quemador y no cierre su válvula de corte, se recomienda el disparo del sistema para evitar el riesgo de una explosión en el hogar.

## 2.- SISTEMA DE ACEITE LIQUIDO COMBUSTIBLE

El combustible líquido que se utiliza en las calderas de potencia, como se mencionó anteriormente, es un producto residual de la destilación del petróleo, conocido como combustóleo, Bunker C o aceite pesado; este combustible se utiliza en los quemadores principales, y aceite ligero o diesel se emplea para el encendido de algunas calderas que queman combustóleo o carbón pulverizado.

El transporte del combustóleo hasta la planta, puede hacerse por:

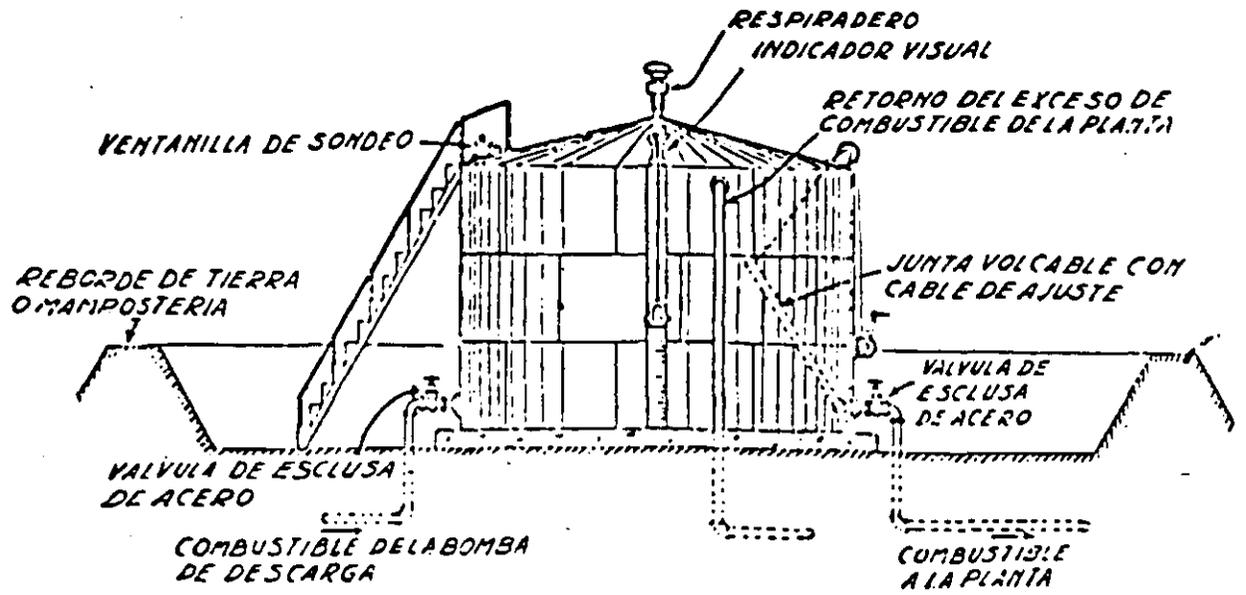
- . Carros tanque o pipas.- En este caso el calentamiento para el llenado de las pipas se conserva para poder hacer la descarga ( $40$  a  $45^\circ\text{C}$ ).

- . Carros tanque de FFCC de 35000 a 40000 litros.- Normalmente el tiempo de transporte es mayor por lo que, es necesario que tengan serpentines de calentamiento con vapor para poderlos descargar para lo cual se debe de contar con suministro de vapor en la zona de descarga.
- . Oleoductos que pueden provenir de una Refinería, un depósito de almacenamiento de PEMEX, o una descarga submarina de barcos.
- . Buques tanques (volúmenes mayores de 400 000 litros)

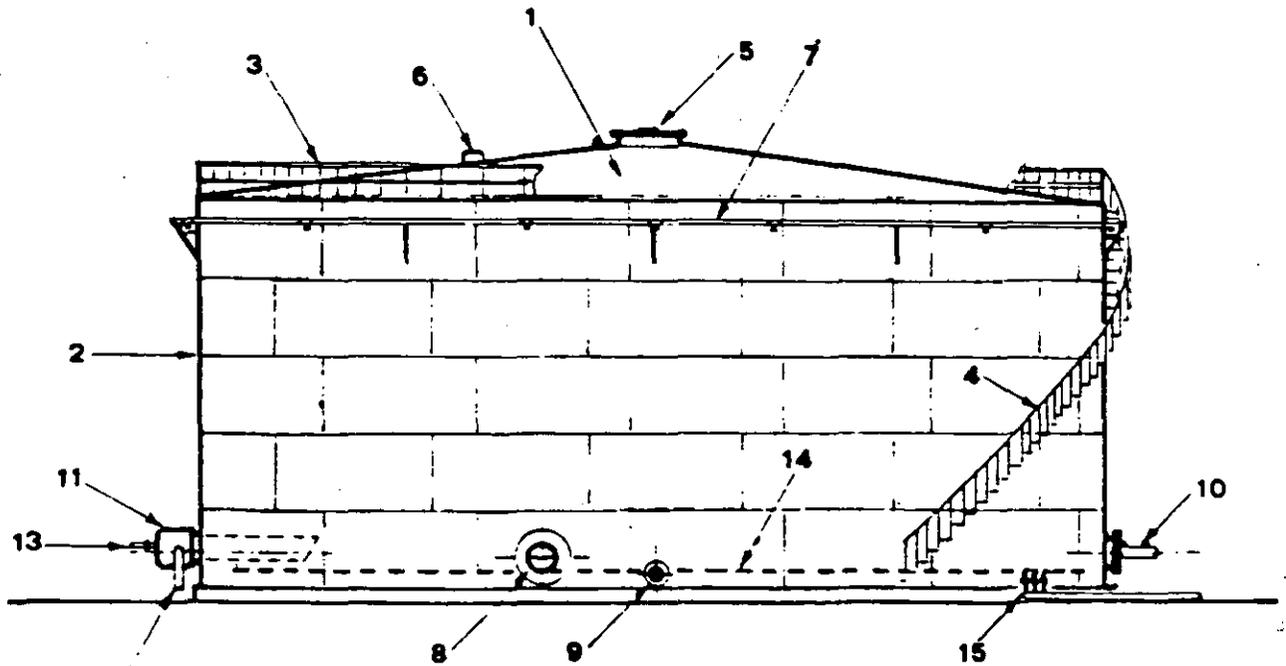
El volúmen de almacenamiento depende de factores como la distancia y confiabilidad de la fuente de abastecimiento, etc., aunque en general se considera satisfactoria una reserva para operar a plena capacidad durante 15 ó 30 días. Generalmente el almacenamiento se efectúa en tanques de acero fabricados en el sitio sobre el piso, que tienen las ventajas de bajo costo para grandes almacenamientos, minimizar los problemas de bombeo y se tiene el equipo accesible para mantenimiento; las desventajas son de que requieren grandes áreas y se localizan lejos de las zonas de uso. En la figura IV-7 se muestran dibujos de tanques de almacenamiento de combustóleo que normalmente se fabrican de acuerdo a la especificación API 650. Adicionalmente a los tanques de almacenamiento, se instalan tanques de servicio diario con un volúmen de 24 horas a plena capacidad de la unidad. Cada tanque de almacenamiento debe estar equipado con un dispositivo para indicar la cantidad de combustóleo que contiene; estimación precisa del contenido de los grandes tanques es muy difícil, entre otras razones porque la gravedad específica no es homogénea por tener diferentes temperaturas. Alrededor de cada tanque se construyen muros de retención con capacidad para retener todo el aceite del tanque en caso de falla de éste.

Toda la tubería que conduce el aceite combustible o combustóleo debe ser de acero, debiendo observarse las recomendaciones siguientes:

- . Las válvulas deben ser de bronce de buena calidad del tipo apertura total.



Tanque vertical de acero para almacenamiento de petróleo.



Flg IV-7.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

- . No deben usarse válvulas de fundición de hierro en donde están sujetos a esfuerzos, en válvulas de paro de tanques o en otros servicios importantes.
- . Cuando se use tubería de fundición de hierro, deberán ser con bridas y no emplear roscadas.
- . En combustóleo no debe emplearse tubería de menos de 2.5 cm (1") de diámetro.
- . Las líneas de aceite caliente deben formarse y enrutarse de tal forma que se conserven tan calientes como sea posible, manteniéndolas fuera de corrientes de aire.
- . Los tubos no deben enterrarse en el suelo o piso, sino que deben pasar a través de trincheras cubiertas en tapas protectoras adecuadas.
- . Todas las juntas deben mantenerse fácilmente accesibles.
- . Todas las fuentes mayores de fugas como juntas, curvas agudas, válvulas y otros accesorios deben reducirse al mínimo, además de que ofrecen mayor resistencia al flujo de aceite.
- . Se debe inspeccionar y lavar en caso necesario la tubería antes de su instalación para asegurarse que está libre de incrustaciones.
- . Debe procurarse que todas las juntas sean soldadas, pero en caso contrario debe ponerse especial atención para apretar y sellar las conexiones.
- . En el tendido de las venas de calentamiento, se debe prever la expansión del aceite durante los paros; el combustóleo incrementa su volumen cerca de 7% cuando se calienta de 40 a 150°C y una línea aislada a la que se le dejen las venas de calentamiento en servicio durante un paro puede estallar al generar su propia presión.
- . Se deben instalar válvulas de alivio en las secciones de tubería que lo requieran.

Calentamiento del aceite.- En los tanques de almacenamiento el aceite se calienta por medio de serpentines de vapor o bien con cambiadores de calor externos (Fig.IV-8); en tanques pequeños se emplean calentadores de inmersión eléctricos.

El combustóleo forma una membrana estática contra las paredes frías de los tanques que da un efecto de aislamiento equivalente al 25% de un forro aislante; para temperaturas entre 27 y 43°C, las pérdidas de calor son aproximadamente a  $12.2 \text{ kcal/m}^2/\text{°C}$  de diferencia de temperatura con el aire ambiente exterior. En los tanques no es necesario calentar todo el volumen ya que el calentamiento local permite el bombeo del combustóleo; en la gráfica de la Fig.IV-9, se muestra el calor necesario para la elevación de cierta diferencial de temperatura del aceite en función del flujo manejado.

Venas de calentamiento.- Tienen el objetivo de mantener las líneas de tubería largas calientes; el medio de calentamiento puede ser electricidad o vapor, empleándose por economía éste último a baja presión ( $3.5 \text{ kg/cm}^2$ ) con tubería de 2.5 cm (1") de diámetro, tendida en contacto con la tubería de aceite en toda su longitud, encapsulándose y forrándose, incluyendo los filtros y las bombas. Para las venas de vapor se debe tener un suministro de vapor independientemente con una caldera auxiliar que se utiliza durante los paros y además debe contarse con trampa de vapor con las que se puede recuperar el condensado vía un eliminador de aceite y una planta de filtración; las venas de vapor pueden dificultar el mantenimiento de bombas al interferir en su desensamble.

Los calentadores de combustóleo a quemadores se montan adyacentes a las bombas; con excepción de las bombas centrífugas, con los demás tipos, los calentadores se localizan flujo abajo de la bomba y manejan el aceite a la presión final de encendido. En los sistemas de bombas centrífugas, se bombea el aceite caliente, localizándose los calentadores flujo arriba de las bombas por lo que están sometidos a más baja presión de aceite reduciendo las dificultades de fugas de aceite en los calentadores.

Nota: Las bombas de engranajes requieren una lubricación constante del fluido que bombean por lo que NUNCA deberán funcionar en vacío.

La válvula de by-pass de la retención situada en la descarga de la bomba permite la recirculación, en contraflujo, de combustóleo a través de la misma pudiendo mantenerse el equipo en condiciones de temperatura de arranque.

### 3.- COMBUSTIBLE SOLIDO (CARBON)

A diferencia del combustible gaseoso o líquido, cuando se utiliza carbón como combustible, tanto el manejo de éste en patios, como la preparación para el quemado presentan problemas complejos en su diseño, operación y mantenimiento.

La instalación de carbón en la planta puede ser esquematizada por una serie de operaciones que se efectúan desde el arribo del carbón hasta que se inyecta como polvo a los quemadores de la caldera, como se muestra en la Fig. IV-24.

Entre varias de estas operaciones se tiene transportación del carbón. Este esquema es para quemar el carbón en suspensión en quemadores; la instalación para quemar el carbón en parrillas es menos compleja, sin embargo, no puede afirmarse que a la fecha tengan mayor importancia estas instalaciones ya que, la máxima capacidad de evaporación de las calderas con hogares de parrillas para el quemado de carbón está limitada a 130,000 kg/h de vapor producido. Más allá de esta capacidad se requieren quemadores de carbón pulverizado.

El transporte del carbón hasta la planta o central puede hacerse en alguna de las siguientes formas:

- Por ferrocarril normal, en trenes unitarios de 1000 a 1500 t., con vagones autodescargables lateralmente o por el fondo de 30 a 60 t., cada uno. Esta forma de transporte es técnicamente posible para cual-

quier distancia y consumo; sus limitaciones son de tipo económico.

- . Por vía angosta de ferrocarril minero, con trenes de 100 a 120 t, en vagones de 12 a 20 t; en este medio se emplea en plantas y desarrollos pequeños.
- . Por funicular.- Se emplea para cantidades hasta 4,000 t/día y distancias menores de 5 km.
- . Por camiones.- Es el medio más económico cuando la planta se encuentra a "boca de mina"; se puede asegurar un suministro hasta de 4,000 t/h en distancias de 4 a 5 km con velocidades de traslado de 4 m/s.
- . Por barco o barcazas.- Se utiliza cuando se tiene este medio de transporte; normalmente para distancias grandes.
- . Por carbo ducto.- Se emplea como medio alternativo con ventajas económicas sobre el transporte por ferrocarril bajo ciertas condiciones.

Las facilidades de recepción en la planta se ajustan al modo de transporte seleccionado; en las figuras IV-26a y b se muestran formas de descarga de carbón que llega por ferrocarril y por barco respectivamente.

El carbón que se recibe en la planta puede pesarse en los vagones de ferrocarril, camiones o en las bandas transportadoras que lo conducen a la planta, utilizándose los resultados para propósitos de contabilidad. En el caso de pesarse los vagones de ferrocarril y los camiones, se hace obteniendo primero el peso bruto y posteriormente se taran, con lo cual se está en posibilidades de conocer la cantidad de carbón descargado. Las máquinas de pesar de bandas son el único equipo práctico para pesar el carbón que llega por barco o de las minas; éstas máquinas de pesar se emplean en todas las plantas para conocer cuanto del carbón entrando va hacia los silos de la caldera, cuanto va al almacenamiento abierto de carbón y cuanto se recupera de este almacenamiento. En las figuras IV-27 y VI-28 se muestran esquemas de funcionamiento de patios de carbón.

## Parada del Sistema de Combustóleo

Para proceder al PARO de las bombas de combustóleo y de los equipos auxiliares, se provoca el cierre de la válvula de corte (disparo) con lo que se abrirá automáticamente la 1a. recirculación HV-751.

El sistema de calentamiento deberá ser aislado, cerrando las válvulas manuales anteriores a las controladoras de vapor secundario.

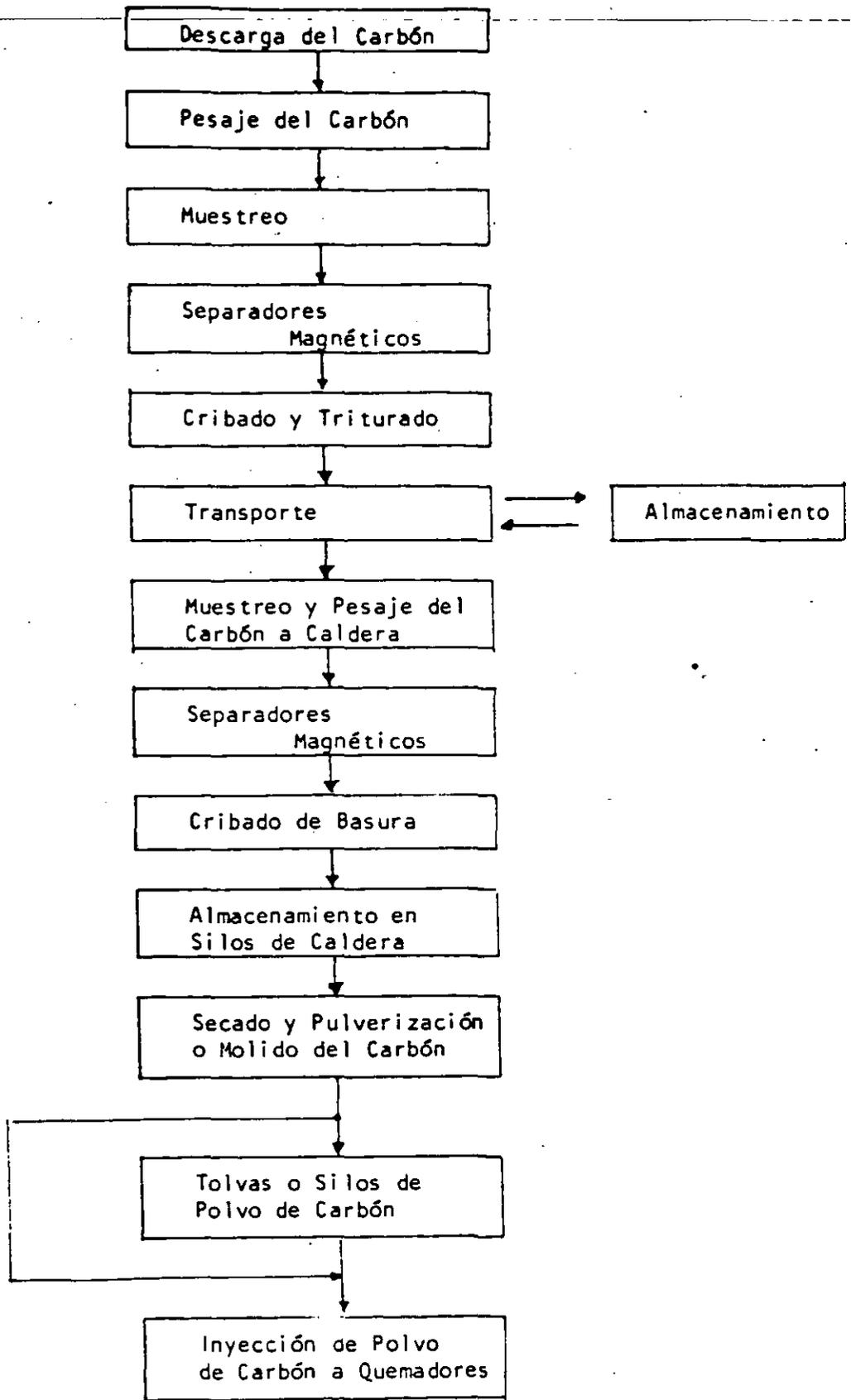
Los pulsadores de las bombas de combustóleo que se encuentren en posición AUTO, deberán pasarse a la posición PARO con el fin de evitar el arranque automático por baja presión del cabezal o paro de otra bomba.

## P R E C A U C I O N E S

Las presiones y temperaturas de funcionamiento del sistema de combustóleo son los principales factores que deben ser controlados, debiendo prestar especial atención a los puntos siguientes:

- . El ensuciamiento excesivo de los filtros puede provocar cavitación en las bombas de trasiego o combustóleo. La presión diferencial en los mismos no debe sobrepasar el valor de  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ .
- . Los arrastres de agua mezclada con el combustóleo pueden provocar cavitación y fluctuaciones de presión en el colector de alimentación, es por esto que deberán drenarse los tanques de almacenamiento periódicamente.
- . Cuando se tiene vapor secundario con baja temperatura, el calentamiento del combustóleo no es suficiente para mantener la temperatura entre  $120-135^\circ\text{C}$  en el cabezal.

Una falla en el control de nivel de condensado en el reboiler, puede ocasionar una baja o alta temperatura del vapor secundario.



IV-24 DIAGRAMA DE FLUJO

FIG. 1.- ESQUEMA DE MANEJO Y PREPARACION DEL CARBON

Si la temperatura del combustóleo llega a ser menor de  $95^{\circ}\text{C}$ , abrirá la recirculación No. 2 (HV-752) ocasionando una caída de presión del combustóleo a quemadores y por lo tanto, puede ocurrir el cierre de la válvula de corte de combustóleo.

En caso necesario puede regularse la presión de descarga de las bombas de combustóleo mediante las válvulas D, E, F, G, H e I que recirculan parte del combustible bombeado al tanque de día.

Antes de la puesta en servicio del sistema, deberán ventearse las tuberías y filtros del mismo con objeto de eliminar el aire almacenado en los puntos altos.

Una temperatura excesiva en el combustóleo puede ser la causa de:

a) Cavitación de las bombas

b) Coquización del combustóleo en el calentador (A temperaturas superiores a  $145^{\circ}\text{C}$ ).

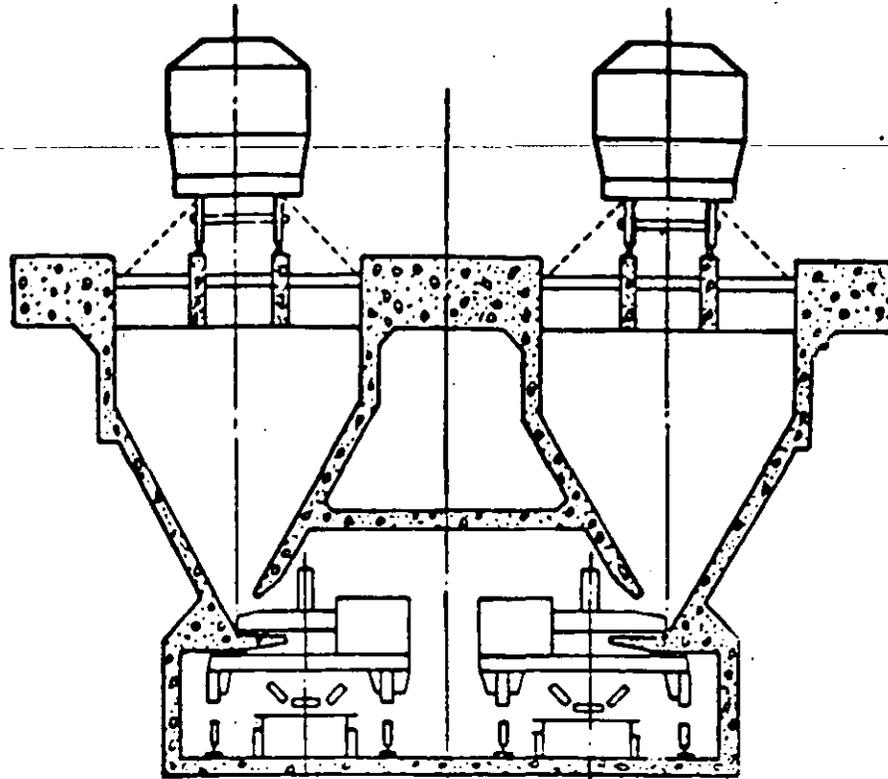
Si al arrancar una bomba de combustóleo se observa que la presión de descarga permanece en valores bajos, deberá DISPARARSE la bomba y proceder a comprobar los puntos siguientes:

a) Alineación de las válvulas de succión de la bomba desde el tanque de día y comprobación de nivel del tanque.

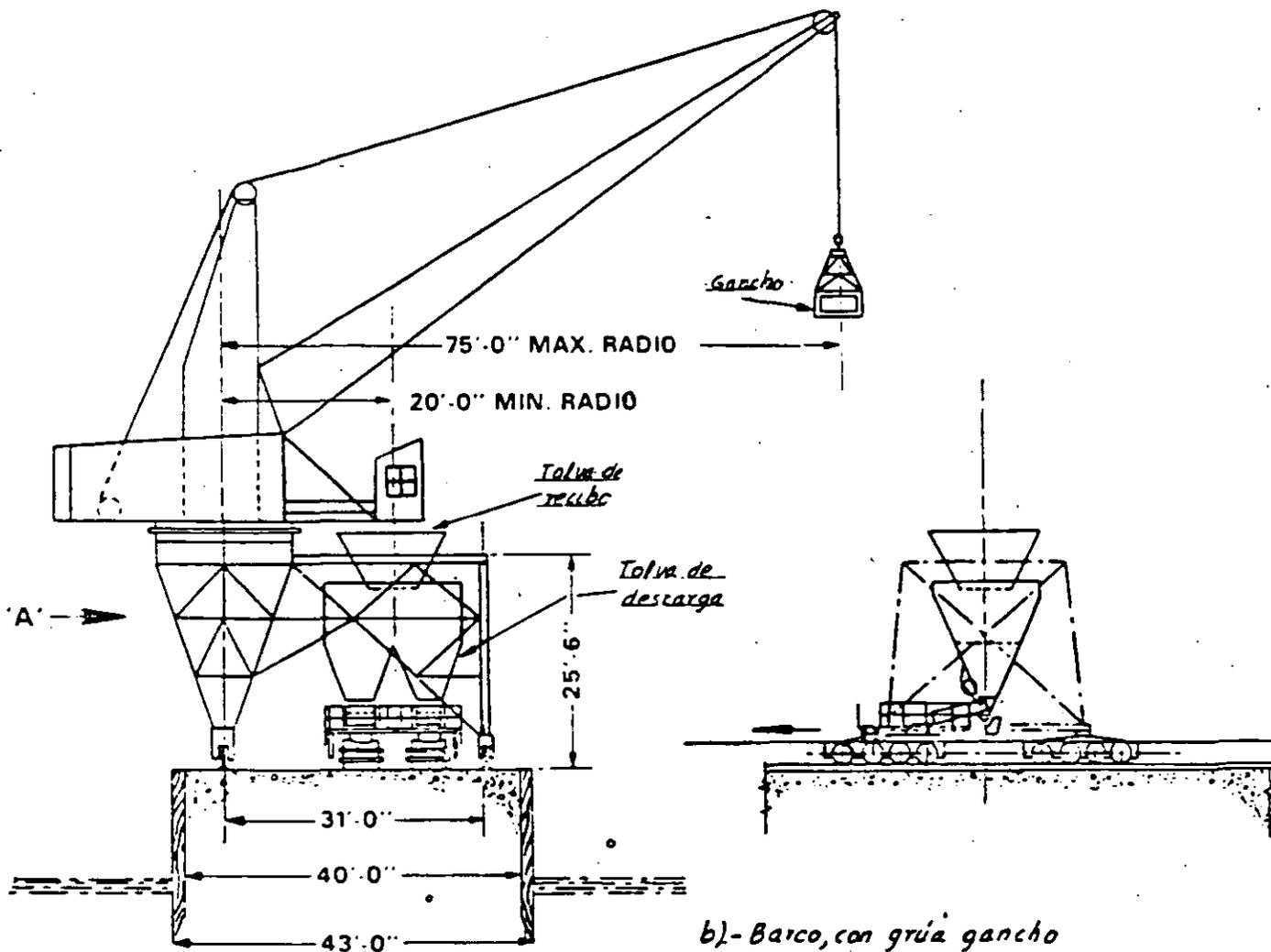
b) Temperatura de combustóleo en la succión (un "TAPON" de combustóleo frío puede interrumpir el paso hacia la succión de las bombas).

c) Alineación de las válvulas de recirculación y by-pass de la controladora de presión.

d) Limpieza de filtros duplex.



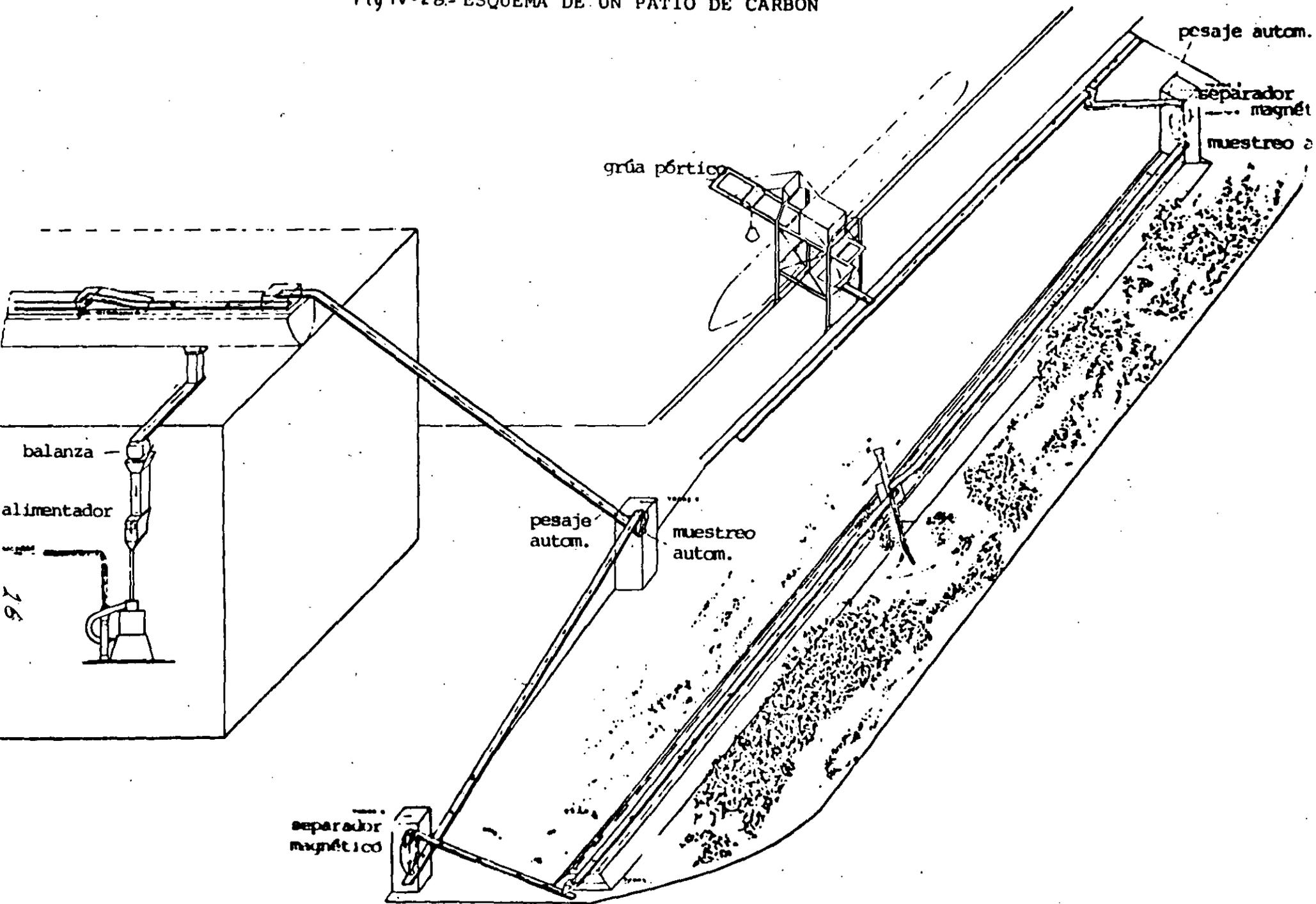
a) - Vagones de FFCC



b) - Barco, con grúa gancho

Fig IV-26.- Métodos de descarga de carbón

Fig IV-28.- ESQUEMA DE UN PATIO DE CARBON



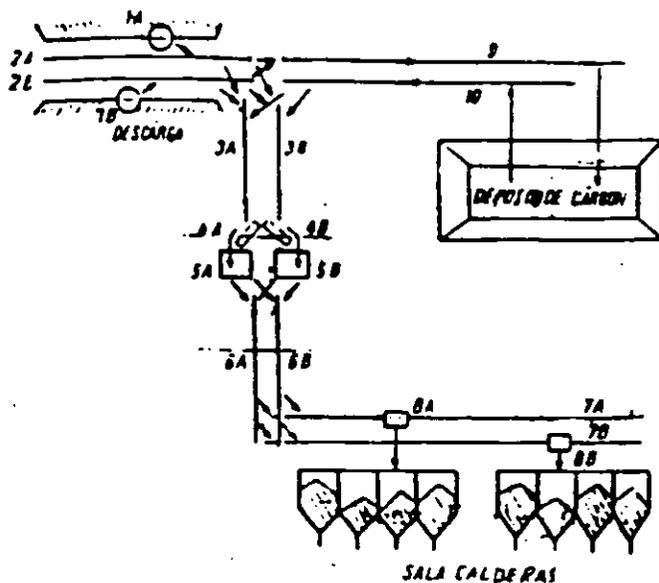


Fig IV-27.- Esquema de funcionamiento del transporte de carbon a la caldera

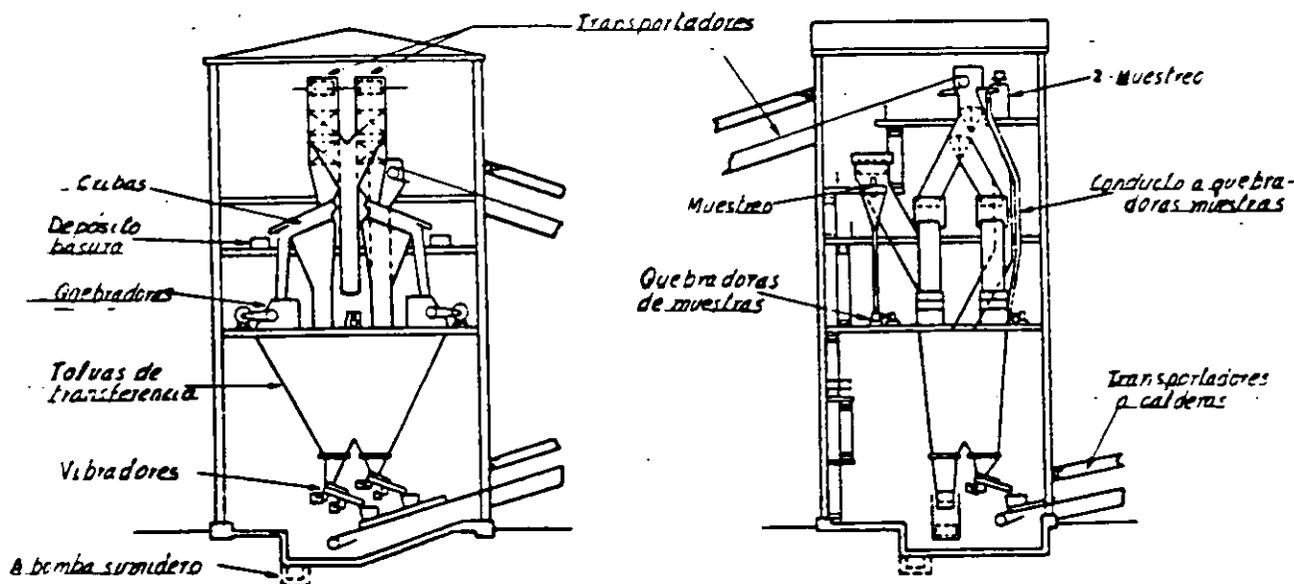


Fig IV-29.- Sección de una torre unión



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

Enero 30 A FEB. 3

TEMA: EQUIPO, COMPONENTES, PARTES  
AUXILIARES Y ACCESORIOS

EXPOSITOR:  
ING. MARTINIANO AGUILAR R.

## V .- EQUIPOS, COMPONENTES, PARTES, AUXILIARES Y ACCESORIOS

Los equipos, componentes, partes, auxiliares y accesorios de las calderas, pueden ser descritos analizando los circuitos o sistemas principales de - que constan las calderas y que son:

- . Circuito de agua - vapor
- . Circuito de aire - gases
- . Circuito de combustible

Este último se analizó en el capítulo IV.

En las figuras VIII-1 y VIII-2 se muestra el circuito de agua-vapor en una caldera de circulación natural y otra de circulación controlada respectivamente. En la figura VIII-1 pueden observarse el economizador, domo, tubos de bajada, paredes de agua, sobrecalentadores, atemperador y recalentador; en la Fig. VIII-2 se muestra además la bomba de recirculación y el flujo de vapor en la turbina.

En las figuras VIII-3 y VIII-4 se muestra el circuito de aire y gases de calderas de hogar presurizado (la No. VIII-3 con quemadores tangenciales y la No. VIII-4 con quemadores frontales); en dichas figuras pueden observarse los ventiladores de tiro forzado, de recirculación de gases, precalentador de aire con vapor, ductos, compuertas, precalentador regenerativo, chimenea, etc.

A continuación se describirán los equipos, componentes, partes, auxiliares y accesorios más importantes.

### 1.- SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

Los sobrecalentadores son equipos de calentamiento en donde el vapor se sobrecalienta.

Los recalentadores son equipos de calentamiento en donde el vapor se recalienta.

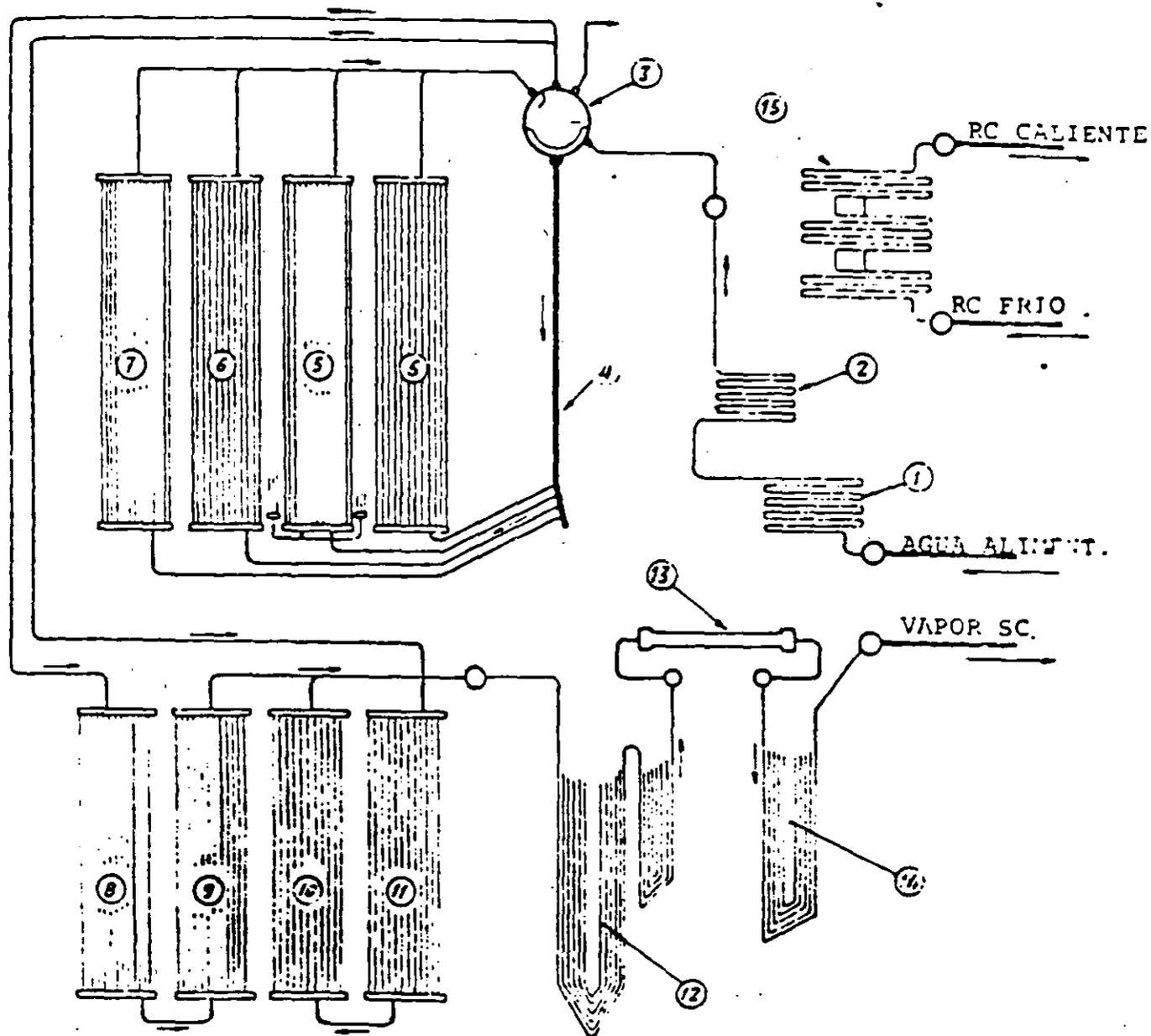
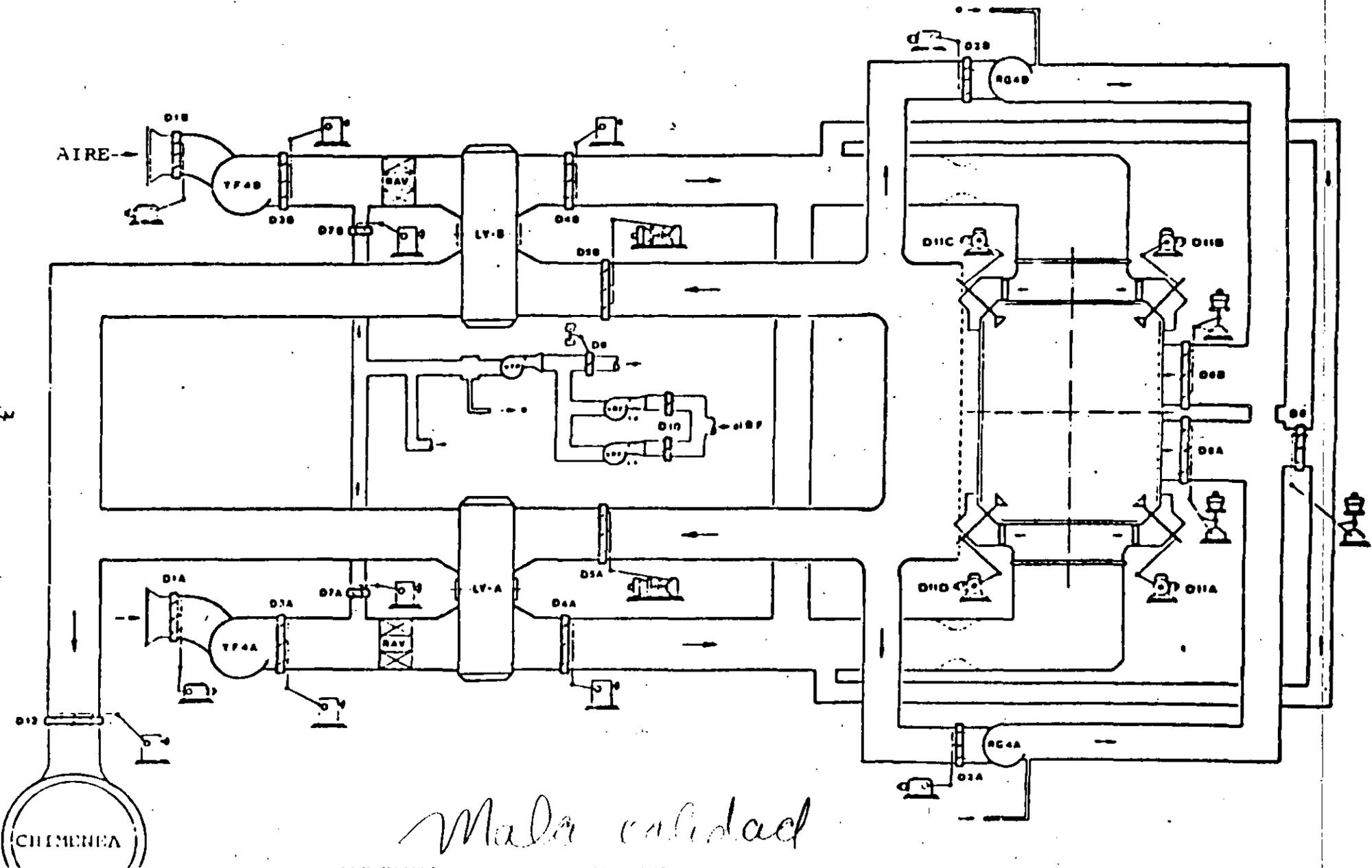


FIG VIII-1.- CIRCUITO DE AGUA - VAPOR EN UNA CALDERA DE CIRCULACION NATURAL.



*Mala calidad*

Debido a que los elementos de tubos de sobrecalentadores y recalentadores están sujetos a alta temperatura, se fabrican de aleaciones de acero de alta calidad o bien, de aceros inoxidable, sin embargo, en las zonas de baja temperatura de gas se hacen de acero al carbón.

Los sobrecalentadores y recalentadores son denominados de varias formas que denotan su tipo de construcción o el arreglo de sus elementos de tubos; los nombres típicos que se utilizan en calderas grandes, son las siguientes:

Radiante de pared  
Tablero (panel)  
Platina o cuadro (platen)  
Suspendido o colgante (pendant)  
Horizontal

En las Figs. VIII-5 y VIII-6 se muestran los arreglos y localizaciones de estos tipos.

Los sobrecalentadores y recalentadores radiantes de pared se usan muy poco en calderas recientes.

En algunos casos se llama a los sobrecalentadores y recalentadores por el orden en que fluye el vapor, por ejemplo, 1o. 2o., 3o. etc. o bien, por el nivel de la temperatura de vapor, por ejemplo, alta, media y baja.

Los sobrecalentadores son elementos de la caldera que aseguran el calentamiento del vapor a una temperatura más elevada que la de saturación cuando estas condiciones son requeridas; de acuerdo con el modo preponderante de transmisión de calor en estos elementos, los sobrecalentadores pueden ser de convección o de radiación.

Los sobrecalentadores convectivos se colocan en el paso de gases a un nivel de temperatura de 700 y 1250°K estando constituidos por un sistema de serpentines de tubos de acero; los serpentines se unen en paralelo en los cabezales de entrada y de salida en colectores de vapor, como se muestra en la Fig. VIII-7. Los tubos usados para fabricar los

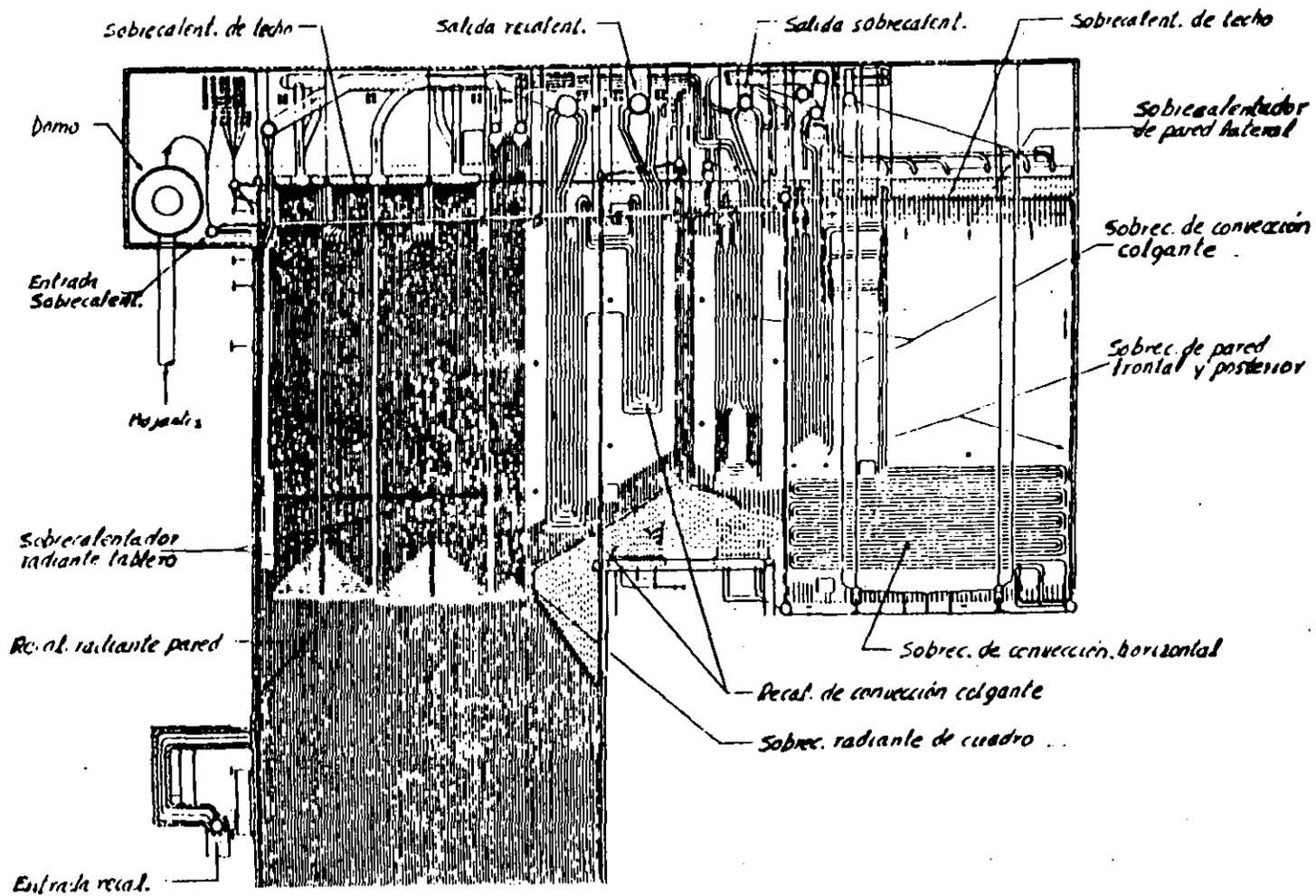


FIG. VIII-5.- ARREGLOS DE SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

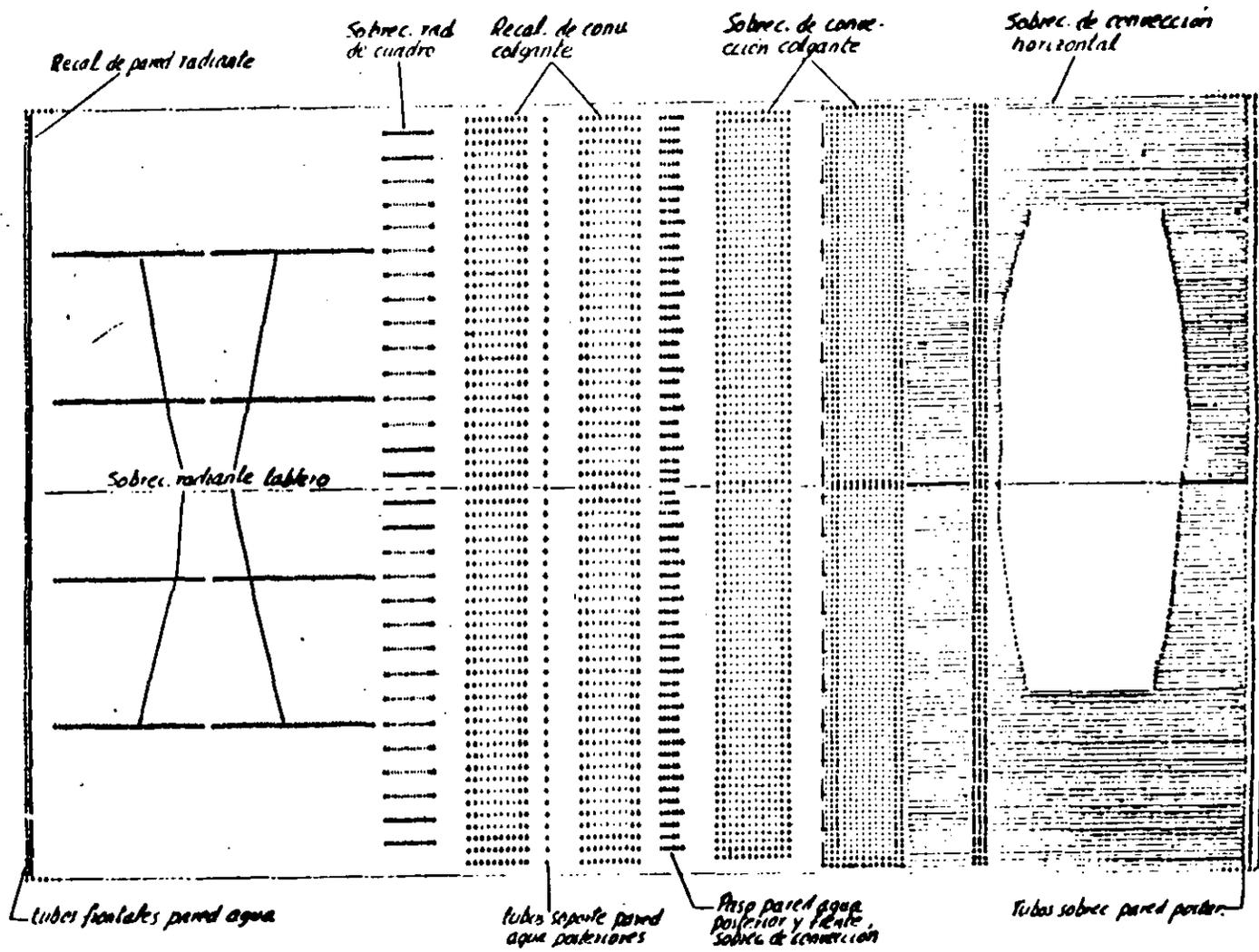


FIG. VIII-6.- VISTA SUPERIOR DE ARREGLO DE PAREDES DE AGUA,  
 SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES.

serpentes son de diámetro pequeño (32 a 45 mm), debido a que los esfuerzos mecánicos y térmicos del material son elevados.

En atención a la diferencia en la fabricación de los sobrecalentadores, debe conferirse igualdad de flujo por los serpentes montados en paralelo; en el caso, cuando no es posible una uniformidad de la resistencia hidrodinámica en los diferentes serpentes, se montan diafragmas de obturación parcial en las secciones de entrada.

El doblado de los tubos para fabricar los serpentes se hace con un radio mínimo de curvatura de  $r = 2$  a  $2.5 d$ , pero en los casos cuando se requiere una cercanía mayor en los ramales se adoptan vueltas en esquinas o ángulos separados, forjados o soldados. Para fabricar serpentes más compactos próximos a los cabezales de los ramales, se doblan en paralelo dos tubos.

El arreglo de las superficies de los sobrecalentadores y recalentadores, se hace considerando los siguientes puntos:

a. Confiabilidad y Economía

- . Prevención de corrosión a alta temperatura, localizando las superficies de calentamiento con el vapor de baja temperatura a la salida del hogar (sobrecalentadores o recalentadores tipo radiante).
- . Prevención de elevación excesiva de temperatura de metal, localizando el sobrecalentador final en un modo de flujo paralelo con relación al flujo de gas.
- . Mejoramiento de la transferencia de calor, arreglando las superficies de calentamiento por convección en un modo a contra flujo con relación al flujo de gas.

b. Controlabilidad de la Temperatura de Vapor

Las superficies de calentamiento se arreglan en tal forma que sean adecuadas para un efectivo y amplio rango de control de temperatura de vapor.

## 12. OTRAS PARTES Y ACCESORIOS

Además de los equipos y componentes mencionados anteriormente, la caldera requiere de otras partes y accesorios para poder hacerla funcional; entre estas partes y accesorios (Fig. VIII-42), se encuentran las siguientes:

- A.- Mirillas de observación y registros de inspección.
- B.- Cristales de nivel que muestran el nivel del agua en el domo.
- C.- Grifos de prueba que sirven para probar los niveles de agua.
- D.- Válvulas de diversos tipos requeridos para purgas, venteos, paro, aislamiento, control, etc.
- E.- Instrumentos de diversos tipos para medición, control y regulación de diversos factores, así como protección de la caldera y sus diversos componentes.
- F.- Tomas para muestreos e instrumentos
- G.- Cámara de TV para observación de los fuegos en el hogar.
- H.- Purgas y venteos.- A lo largo de la tubería y colectores de las calderas se proveen válvulas de purgas o drenajes y venteos.

Las válvulas de purgas en las calderas se usan para los siguientes propósitos:

- . Drenaje de la caldera
- . Bajar el nivel de agua
- . Remover el exceso de químicos y lodos precipitados del agua de la caldera.
- . Eliminar el agua que se condensa en las zonas que en funcionamiento normal son recorridas por vapor.
- . Asegurar la circulación del fluido refrigerante (vapor) en sobrecalentadores durante los arranques en que todavía no se establece el suministro normal de vapor.

Las válvulas de venteo se instalan en donde se prevee la formación de bolsas de aire en el circuito agua-vapor y que tienen los siguientes inconvenientes (las bolsas de aire):

- . Reducción en la capacidad de cambio de calor en las zonas de utilización.
- . Ruidos en el circuito
- . Disturbios en la circulación regular del agua

Las purgas y venteos en un generador de vapor se proveen con una válvula interceptora en la raíz y de una válvula de maniobra. La forma de la válvula, la naturaleza del material, los elementos internos y de maniobra se estudian en relación al tipo de fluido, a la presión, a la temperatura y al sistema.

En la Fig. VIII-43 se muestran las purgas y venteos de una caldera de circulación controlada, cuyas funciones y condiciones son las siguientes.

- . Descarga entrada al economizador (1); se abre para drenar la caldera únicamente. Fuera de lo anterior debe estar cerrada siempre.
- . Venteo cabezal superior de economizador al domo (2); se abre para drenar la caldera y para llenado o arranques, cerrándose a 2 atmósferas.
- . Venteo de domo superior (3); se abre para drenar la caldera y durante los arranques, cerrándose a 2 atmósferas.
- . Descarga cabezal de succión bomba de circulación (4); se abre para drenar la caldera únicamente y fuera de esto debe estar cerrada siempre.
- . Drenaje descarga bomba de recirculación (5); únicamente se abre para drenar la caldera y fuera de esto, debe estar cerrada siempre.
- . Drenaje domo inferior (6); se abre para descarga y purgas de la caldera y en los demás casos debe estar cerrada siempre.
- . Recirculación entre economizador y domo inferior (7); se abre durante los arranques para asegurar circulación de agua en el economizador; después debe estar cerrada siempre.
- . Drenaje cabezal de entrada de sobrecalentador radiante (8). Se abre durante los arranques y se cierra a 2 atmósferas.

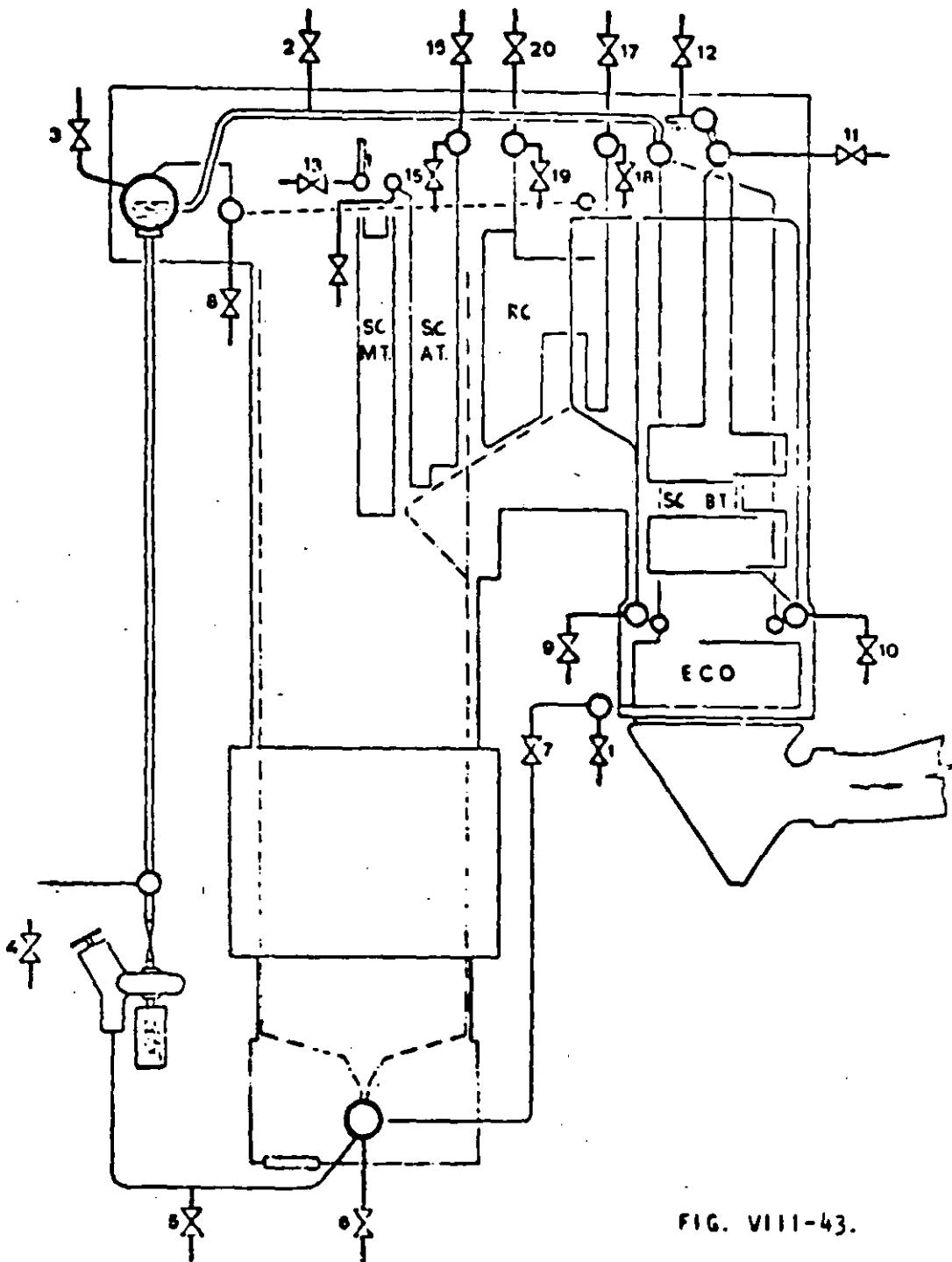


FIG. VIII-43.

PURGAS Y VENTEOS DE UNA CALDERA DE CIRCULACION CONTROLADA

- . Drenaje cabezal frontal (9). Se abre únicamente para descarga de la caldera y después debe estar cerrada siempre.
- . Drenaje cabezal de entrada de sobrecalentador de baja temperatura - (10). Se abre durante los arranques y se cierra a 2 atmósferas.
- . Drenaje cabezal de salida de sobrecalentador de baja temperatura - (11). Se abre durante los arranques y se cierra a 2 atmósferas.
- . Venteo cabezal de sobrecalentador de b.t./sobrecalentador intermedio (12). Se abre para arranques y después se cierra a 2 atmósferas
- . Drenaje cabezal de entrada de sobrecalentador intermedio (13). Se abre durante arranques y se cierra a 2 atmósferas.
- . Drenaje cabezal de salida de sobrecalentador intermedio (14). Se abre durante arranques y se cierra a 2 atmósferas.
- . Drenaje cabezal de salida de sobrecalentador de alta temperatura - (15). Se abre durante arranques y se cierra hasta que se tiene entrega de vapor suficiente a la turbina para garantizar el flujo de vapor y enfriamiento de los tubos de sobrecalentadores.
- . Venteo del cabezal de salida del sobrecalentador de alta temperatura (16). Se abre durante los arranques y se cierra a 2 atmósferas.
- . Venteo del cabezal de entrada al recalentador (17). Se abre antes del arranque y se cierra después de éste.
- . Drenaje cabezal de entrada al recalentador (18). Se abre antes del arranque y se cierra después de éste.
- . Drenaje del cabezal de salida del recalentador (19). Se abre antes del arranque y se cierra después de éste.
- . Venteo del cabezal de salida del recalentador (20). Se abre antes del arranque y se cierra después de éste.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

ENERO 30 A FEBRERO 3

TEMA: QUEMADORES.

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

## 1. GENERAL

El objeto de usar quemadores para quemar el combustible en las calderas, es el de extender la liberación de calor en el horno a través de un volumen más grande de el hogar, que el que fue posible primeramente con los equipos de parrillas para el quemado de combustible; los quemadores de combustible introducen éste junto con el aire en una mezcla tan bien realizada, que la combustión se completa mientras el combustible está todavía en suspensión.

Como la combustión esta condicionada a factores aerodinámicos y térmicos, el significado del proceso de combustión no puede ser estudiado independientemente del quemador o parrillas y el hogar en donde tiene lugar el proceso de combustión; a continuación se presentan algunos principios fundamentales sobre los quemadores.

El quemador es un elemento del hogar para combustión en suspensión que asegura la alimentación del combustible con aire en proporciones bien estables y crea las condiciones aerodinámicas necesarias para producir en el hogar una flama con características adecuadas a la instalación.

De la definición general anterior de quemador, resultan sus principales funciones:

- preparación del combustible para la mezcla con el aire.
- asegurar la dirección y velocidad del chorro de aire y de combustible para el mezclado.
- regulación del flujo de aire y de combustible para asegurar una cierta carga térmica con una cierta relación de aire-combustible.
- crear las condiciones de estabilidad de la flama en su campo de funcionamiento.

- realizar la turbulencia inicial necesaria para obtener una cierta velocidad de combustión.
- dirigir el combustible y el aire de modo que se realice una cierta distribución de la flama de acuerdo con las zonas de temperatura del hogar.

La variedad de combustibles utilizados y las características de las flamas necesarias en el hogar hacen que existan numerosos tipos de quemadores; la clasificación de estos tipos es sólo posible bajo ciertos criterios de funcionamiento y fabricación. *En la Fig. 1 se muestra un arreglo de quemadores*

Los quemadores de atomización o pulverización mecánica están constituidos por un inyector o atomizador que tiene la misión de dividir el aceite en finísimas gotas, o bien, de proyectar en el interior de la cámara las partículas de carbón previamente pulverizado y por un sistema de entrada de aire estudiado en forma que asegure una mezcla lo más íntima posible de las gotas de atomización o de las partículas de carbón con el aire en forma tal que cada una disponga de la cantidad de oxígeno neces. para su combustión.

En general se han definido los siguientes conceptos en cuanto a los quemadores:

Una tobera es un dispositivo para acelerar un fluido, ya sea en estado líquido o en estado gaseoso.

Un chorro es la corriente de fluido acelerada por la tobera.

Un atomizador es un dispositivo apto para desintegrar un líquido y dirigir las partículas en una dirección precisa.

Un quemador es un dispositivo para mezclar el combustible con el aire y dar lugar a la combustión.

Una cámara de combustión es el espacio en el cual se produce la combustión.

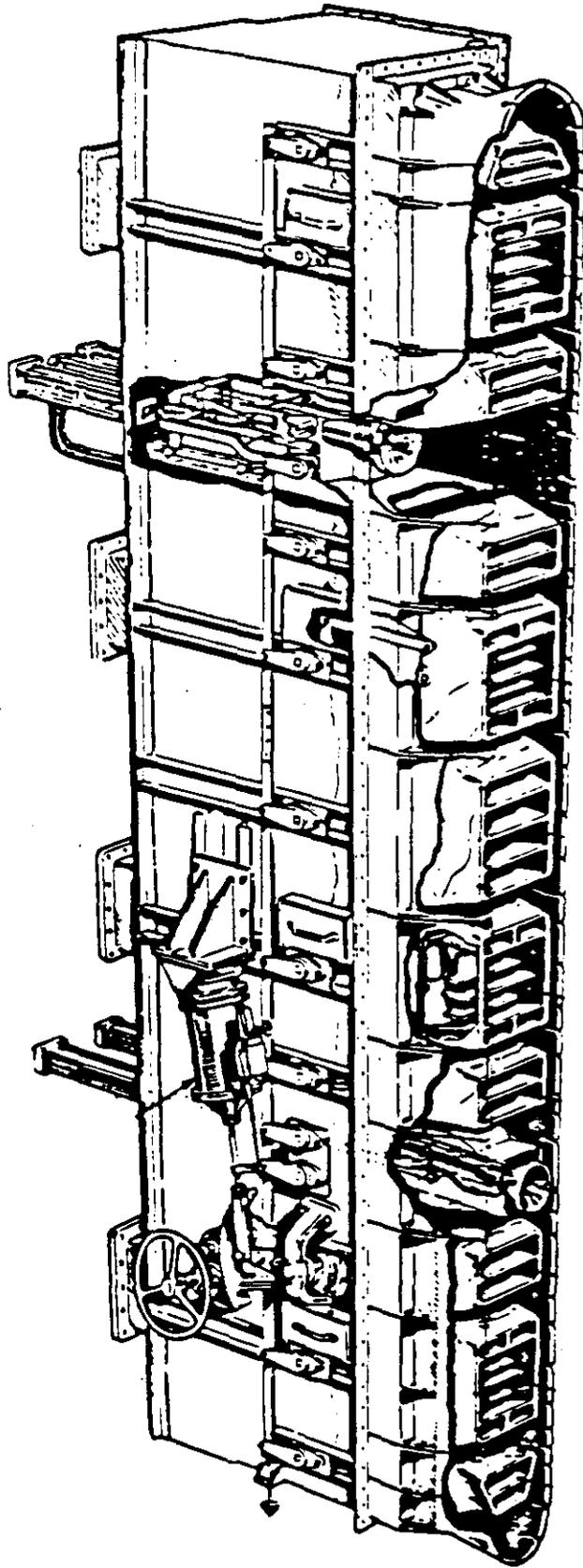


Fig. VI-1. - ARREGLO DE QUEMADORES

Una tobera puede formar parte de un atomizador, un atomizador puede formar parte de un quemador y un quemador puede formar parte de una cámara de combustión.

2.-

## QUEMADORES PARA COMBUSTIBLE GASEOSO

Normalmente el combustible gaseoso que se emplea en las calderas es gas natural compuesto principalmente por metano y sólo en calderas muy pequeñas se emplean otros combustibles como gas licuado a presión, gas de alto horno, etc., provenientes de procesos de industrias.

En general los combustibles gaseosos se queman y se regulan con mayor facilidad. La combustión se realiza en una sola fase y no existen problemas de atomización y vaporización de los aceites combustibles o de vaporización de combustibles sólidos. Los quemadores de gas se pueden regular fácilmente y su precio es más bajo que el de los quemadores de combustibles líquidos y sólidos.

Según la forma de introducción del gas y del aire en el horno los quemadores de gas se clasifican en: quemadores con llamas de difusión, en los que el gas y el aire penetran sin mezclar en la cámara; quemadores con premezclado parcial, y quemadores con llamas y premezclado total. Esta clasificación es indicativa puesto que a menudo muchos quemadores de gas presentan propiedades de dos categorías.

Las propiedades típicas de los quemadores con premezclado son: llama corta, intensa y fuerte de gran velocidad, alta temperatura y baja luminosidad. Por el contrario los quemadores de difusión producen llamas largas y suaves, poco intensas y de temperaturas relativas bajas.

Los quemadores con premezclado representan la categoría más difundida de quemadores industriales de gas. Generalmente son capaces de producir todo tipo de mezclas mediante la simple regulación del aire y del gas con lo que se obtiene el premezclado total y se consigue la liberación de calor más uniforme o lo que

~~es lo mismo el menor volumen de combustión para una determinada capacidad.~~

*a.- Quemadores autoaspirantes*

El campo de regulación de los quemadores con aspiradores o eyectores se ve limitado por tener que aspirar grandes volúmenes de aire con un pequeño volumen de gas. Generalmente con los gases naturales de combustión lenta puede haber inestabilidad o retorno de la llama a una presión inferior de 6mm de H<sub>2</sub>O y con los gases de combustión rápida a menos de 10 a 12 mm.

Los quemadores para combustible gaseoso *que* funcionan absorbiendo una parte de aire para la combustión por eyección, se emplean sólo en flujos pequeños. La aspiración por medio de eyector se hace con la presión disponible del gas y el aire aspirado es aproximadamente del 40 al 60% del necesario para la combustión y el resto se admite directamente en el hogar, por la depresión que existe, como aire secundario. En la energía total de encendido, en que está incluida junto a la energía mínima de encendido parte de combustible y energía necesaria para el secado y desprendimiento de la materia volátil, tiene lugar la combustión del residuo carbonoso en suspensión.

En la Fig. VI-2a se muestra el esquema de un quemador autoaspirante en donde puede observarse la tubería (1), la cámara de mezcla (2), el dispositivo de regulación del aire (3), que constituye parte del eyector que aspira el aire primario; se tiene también una cabeza cerámica del quemador en donde se mezcla aire por medio de orificios durante la operación para estabilizar la flama piloto y la flama del chorro principal central. Los quemadores de este tipo (combustible gaseoso), funcionan con un chorro compacto, combustión cinética, piloto de flama estable y con turbulencia natural. Para flujos mayores se pueden combinar varios de estos tipos de quemadores alimentando el aire secundario por un sistema común central.

Las ventajas de los quemadores autoaspirantes son en primer lugar que no necesitan ventilador para introducir el aire, y en segundo lugar, que el flujo de aire aspirado es proporcional al flujo de gas que pasa por la tobera, de acuerdo con las diferentes

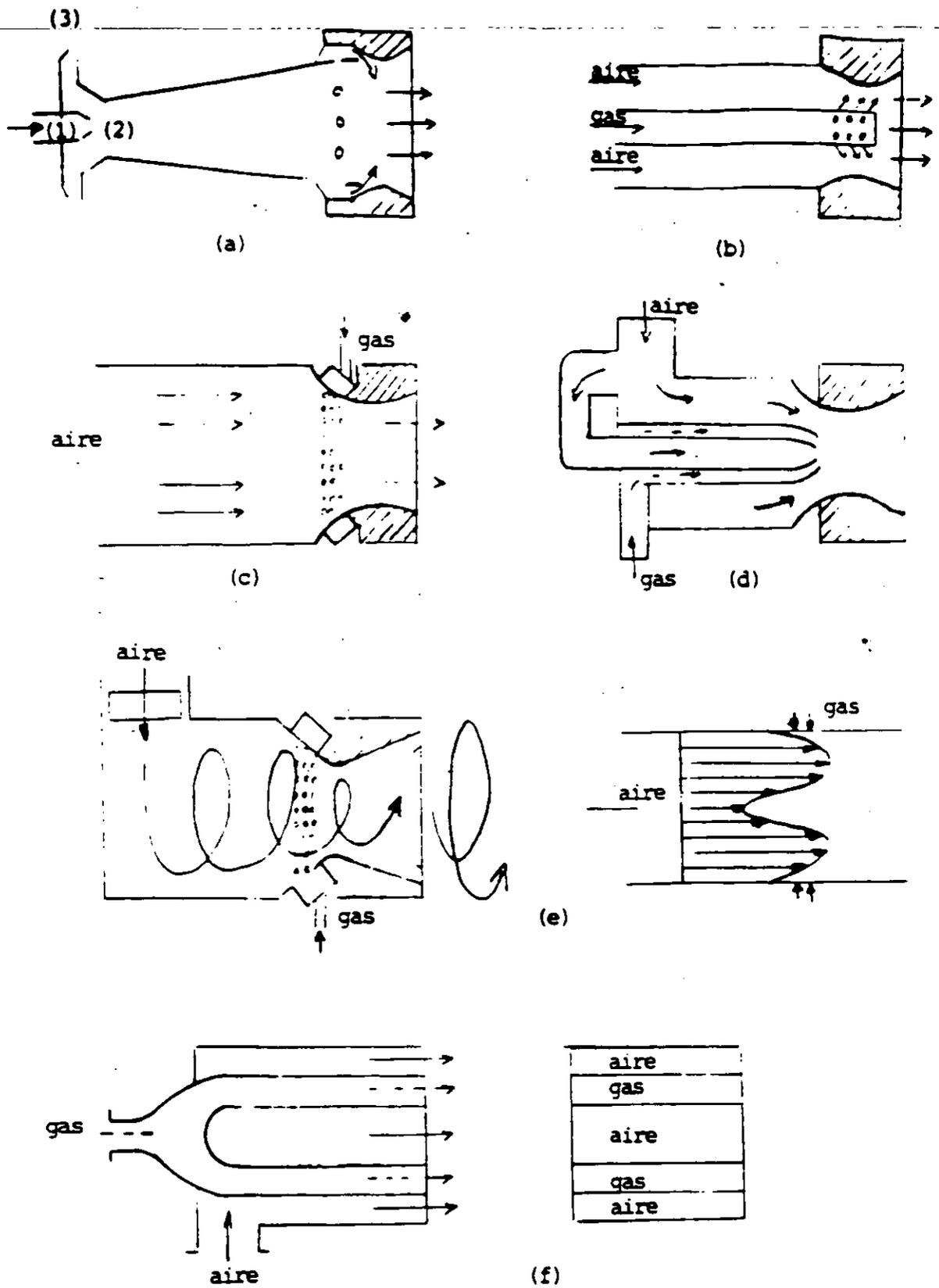


FIG. 3.- ESQUEMAS DE DIFERENTES TIPOS DE QUEMADORES  
PARA GAS COMBUSTIBLE

## Cargas de funcionamiento.

Las principales desventajas de los quemadores autoaspirantes son los límites relativamente restringidos de regulación de flujo y la imposibilidad de control eficiente del flujo de aire de combustión debido a la existencia del aire secundario. Estas desventajas limitan la utilización de estos quemadores a un flujo de cerca de  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  de combustible y a instalaciones que no necesitan automatización en el proceso de combustión.

El mejoramiento de las condiciones de aspiración en estos quemadores se puede lograr con la utilización de eyectores de 2 ó 3 pasos con lo que se aumenta el coeficiente de eyección pero disminuye la calidad de homogenización de la mezcla lo que conduce a la obtención de una flama cinética-difusiva, es decir, lenta y luminosa.

### *b.- Quemadores con aire de ventilador*

Los quemadores alimentados con aire por ventilador se utilizan para flujos pequeños, medianos y grandes, siendo flexibles y con flama regulable con lo cual se eliminan las desventajas de los quemadores autoaspirantes; con relación al aire suministrado para la combustión, los gases combustibles pueden admitirse por el centro, en la parte media o en la periferia. La función de la posición de admisión con relación a la mezcla entre aire y gas combustible, es la de obtener cierto grado de homogenización de la mezcla.

En los quemadores con admisión central como el mostrado en el esquema de la Fig. VI-2b, el grado de mezcla obtenido es rela-

tivamente reducido, especialmente en el centro del quemador, resultando una flama con un carácter pronunciado difusivo, es decir, larga y luminosa.

En los quemadores con admisión periférica tal como el mostrado en el esquema de la Fig.VI-2c, la mezcla se efectúa bastante bien debido a que la admisión del gas se hace dispersándolo en la corriente de aire; los quemadores de este tipo dan una combustión de carácter pronunciadamente cinética con flama corta y no luminosa.

Los quemadores con admisión en medio producen flamas de carácter medio; un quemador de este tipo se muestra en la Fig.VI-2d, en donde puede observarse que el combustible sale por un espacio anular entre dos chorros de aire. El flujo exterior de aire es mayor que el interior con lo que se produce un movimiento turbulento que asegura un ángulo mayor de salida del chorro de la mezcla. La presión del aire es de 600 a 2 000 N/m<sup>2</sup> en función de la resistencia aerodinámica del trayecto y los gases se inyectan a una presión de 2 000 a 15 000 N/m<sup>2</sup>. La velocidad de salida de los gases del orificio es de cerca de 10 veces mayor que la del aire para asegurar una penetración en toda la profundidad del chorro de aire.

En la construcción de quemadores de grandes flujos se prevén dispositivos que crean condiciones para una combustión intensa. El movimiento axial de gran turbulencia necesario para la combustión intensa se puede obtener introduciendo el chorro de la mezcla en

obstáculos no aerodinámicos que provocan turbulencia por aceleración brusca de la corriente y por turbulencia local creada en los espacios de los obstáculos. Los obstáculos pueden ser rejillas auxiliares cuyo efecto turbulento se determina siempre experimentalmente. El método que más se emplea para intensificar la combustión es el de la mezcla turbulenta del aire antes de la zona de combustión que, en forma general, asegura un movimiento helicoidal del aire de combustión que siendo relativamente grande le da también movimiento helicoidal al combustible. La turbulencia se obtiene introduciendo el aire al quemador en una carcasa espiral o introduciendo en el tambor de aire una serie de caletas que eventualmente pueden ser con dirección regulable, que imprimen al aire un movimiento circular como el mostrado en el esquema de la Fig.VI-2e.

Desde el punto de vista funcional estos quemadores, debido a la turbulencia creada en el movimiento helicoidal y de una mezcla bien realizada, dan flamas cinéticas cortas y con un ángulo grande de salida; los quemadores de este tipo sólo pueden efectuarse con admisión periférica del gas, como se muestra en la Fig.VI-2e. En el centro de la turbulencia se crea una zona con velocidad axial pequeña que a veces es nula o negativa y en la periferia se tiene la velocidad mayor por lo que es normal que el combustible se introduzca en esta parte en donde el flujo de aire específico por sección es mayor; en la Fig.VI-2e, se muestra el espectro de la velocidad por la introducción turbulenta de aire.

En el caso de turbulencias muy fuertes puede aparecer una zona de depresión en el centro del quemador con circulación inversa

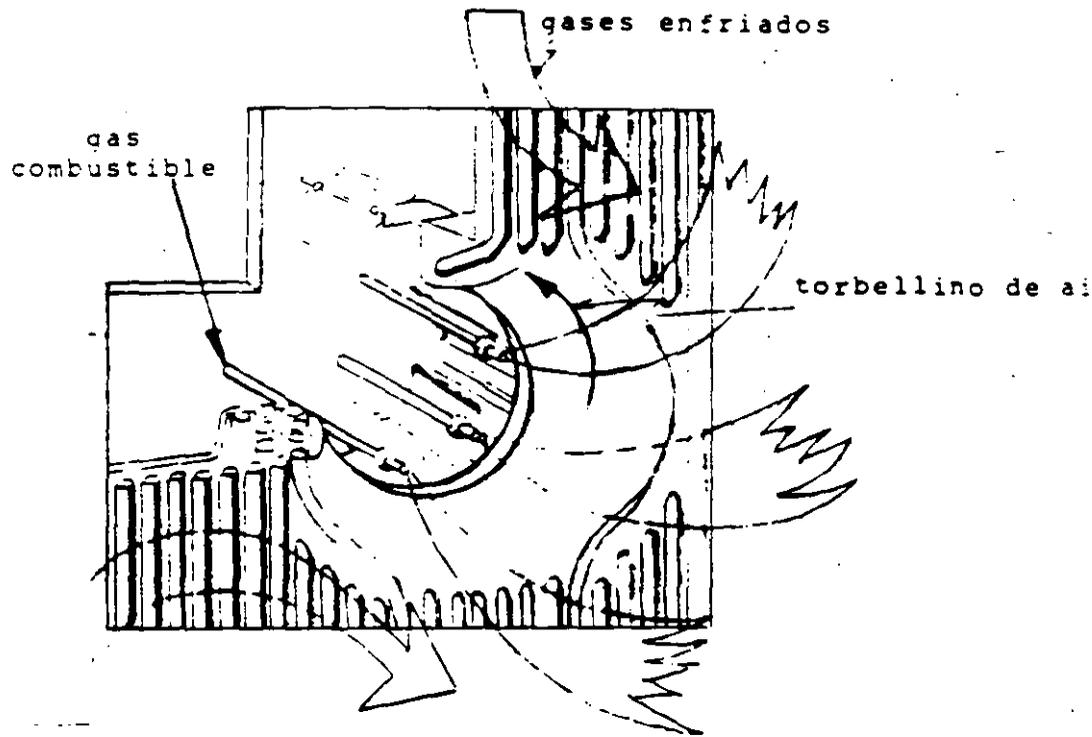
~~del fluido (del hogar hacia el quemador); esta situación debe evitarse ya sea disminuyendo la turbulencia, o acelerando la salida del chorro con dispositivos auxiliares para aumentar la velocidad en el centro. El regreso de la flama hacia el quemador produce el apagado de la flama.~~

En algunos casos raros se necesita obtener una flama larga luminosa (radiante) en el hogar; esta flama se puede efectuar por medio de una combustión difusiva, proceso en el que a alta temperatura se tiene falta de aire para la combustión y se produce la aparición de carbono libre fuertemente radiante en la flama. Los quemadores para flama difusiva con canales circulares o rectangulares funcionan haciendo que los chorros de aire y gases penetren en forma paralela al hogar con una velocidad turbulenta reducida para evitar la mezcla rápida; un ejemplo de estos quemadores se muestra en la Fig. VI-25. - En la Fig. VI-3 se muestra el aspecto de un quemador de gas natural.

3 -

#### QUEMADORES PARA COMBUSTIBLE LIQUIDO

Para realizar la combustión del combustible líquido en un tiempo breve (2 a 3"), tiempo de recorrido en el hogar, el combustible líquido debe pulverizarse en partículas finas con lo que se aumenta la superficie de contacto con el aire de combustión y se disminuye el espesor del estrato de quemado; la energía necesaria para separar el combustible en partículas se hace, ya sea comprimiendo el combustible con ayuda de una bomba (pulverización mecánica) o con un agente secundario que puede ser aire para combustión o vapor. Para obtener partículas suficientemente finas la viscosidad del combustible debe ser de 1.5 a 2°E



QUEMADOR DE GAS NATURAL

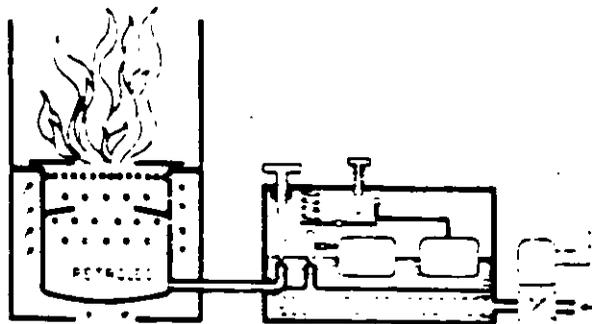
admitiéndose, en algunos casos, hasta 5°E, El combustible especial utilizado en las calderas pequeñas es suficientemente fluido para pulverizarse, pero el combustóleo debe precalentarse de 360 a 420 °K para obtener la fluidez necesaria.

Si se intenta quemar un aceite, en estado líquido, la única parte que participa en la combustión es el vapor que se forma en la superficie del líquido y que se quema a una velocidad que va unida a la posibilidad del vapor de mezclarse con el oxígeno presente.

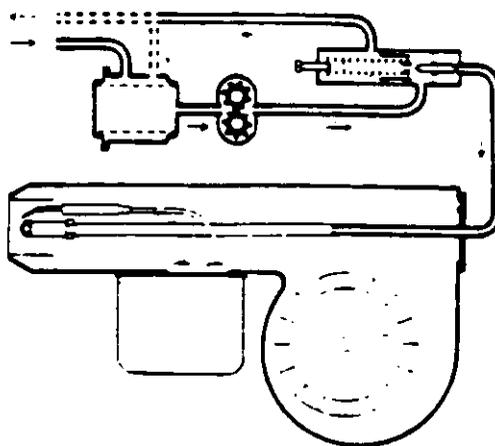
Los combustibles líquidos pueden quemarse, ya sea mediante su evaporación para que reaccionen como gases, o mediante la subdivisión en gotas diminutas que, calentadas por radiación y mezcla turbulenta, se evaporarán durante la combustión.

Generalmente, el diámetro de las gotas producidas, oscila entre 10 a 200 micras, aunque también pueden darse gotas más gruesas. Suele admitirse que un buen atomizador comercial produce más de un 85% de las gotas con un diámetro inferior a 50 micras.

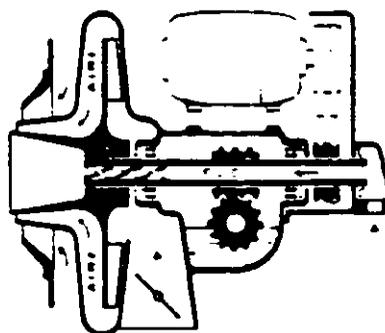
La necesidad de subdividir el aceite en gotas pequeñas y de que éstas tengan que mezclarse con el aire por turbulencia se explica por la condición de aumentar con la evaporación la superficie del líquido en la combustión y además por las siguientes consideraciones: El aceite combustible se compone de moléculas que sufren rompimiento ("cracking") fácilmente con el calentamiento y durante la pirólisis se pasa por una fase en que se produce carbono libre mezclado con residuos parcialmente "craquizados" y moléculas de anillos condensados poliaromáticos con un peso molecular elevado. Si estas mezclas se encuentran con superficies sólidas y faltas



GASIFICACION

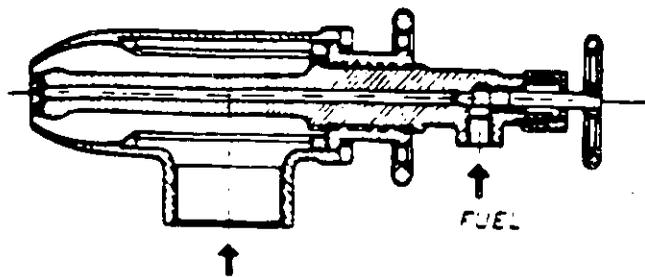


PULVERIZACION MECANICA  
(Presion hidraulica)

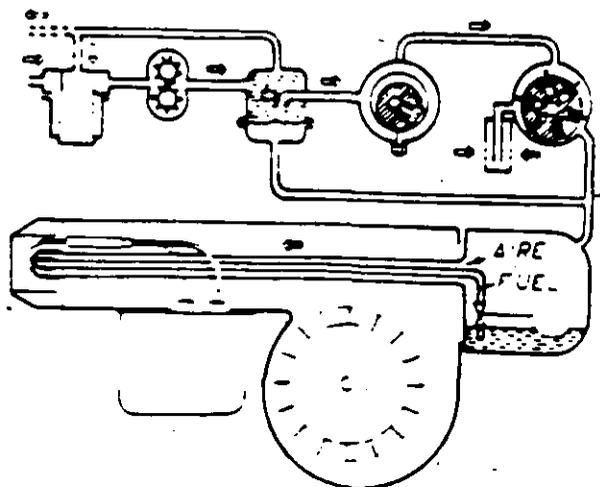


COPULA ROTATIVA

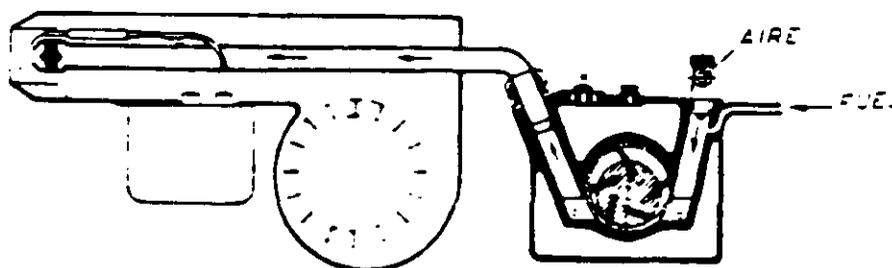
VI-5.-QUEMADORES DE COMBUSTIBLE LIQUIDO



ARRASTRE POR FLUIDOS



PULVERIZACION NEUMATICA



EMULSION INTERNA DE AIRE

V-6. QUEMADORES DE COMBUSTIBLE LIQUIDO

del aire necesario, se producen formaciones de una masa carbonosa que se acumula y tiende a obstruir los conductos del horno. Si las paredes se hayan alejadas del quemador no es estrictamente necesario que la subdivisión y la mezcla sean perfectas pero si el espacio de la cámara de combustión es limitada se manifiesta la exigencia de una subdivisión finísima y una buena mezcla.

Una buena instalación de combustión de aceite debe reunir los siguientes requisitos:

- a) lograr una intensidad elevada de combustión, es decir quemar la mayor cantidad de aceite en un volumen determinado.
- b) conseguir el máximo campo de regulación que sea compatible con el rendimiento de la combustión.
- c) llegar a un rendimiento de combustión, relación entre el calor liberado y al poder calorífico, que sea superior a 99%.
- d) evitar desperfectos en las paredes o en los tubos de la cámara de combustión debido a depósitos de carbón y hollín.
- e) capacidad de modificar la forma de la llama dentro de algunos límites para permitir la posibilidad de adaptación a las dimensiones de la cámara de combustión.
- f) lograr la temperatura más alta de llama, o dicho de otro modo funcionar con el mínimo exceso de aire sin producción de elementos sólidos o gaseosos no quemados en los gases de combustión.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

ENERO 30 A FEBRERO 3

TEMA: ACCESORIOS CALDERAS

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

## ACCESORIOS CALDERA

Con objeto de cumplir con regulaciones y normas, y asegurar una operación eficiente, las calderas tipo domo deben tener los siguientes dispositivos o accesorios:

- un número aprobado de válvulas de seguridad;
- un número aprobado de válvulas de purga y drenes para sobrecalentadores, paredes de hogar, caldera y economizador;
- válvulas para purga de aire en donde sea necesario;
- cristal de nivel de agua de lectura directa e indicador remoto de nivel de agua;
- alarma por bajo y alto nivel de agua;
- equipo para muestreo de agua de caldera y provisiones de conexión en el domo de vapor para muestreo de vapor;
- válvula de pa<sup>s</sup>o de vapor principal;
- equipo para inyección de sustancias químicas al domo;
- sistemas de instrumentación y control (agua de alimentación, combustión, temperatura de vapor).

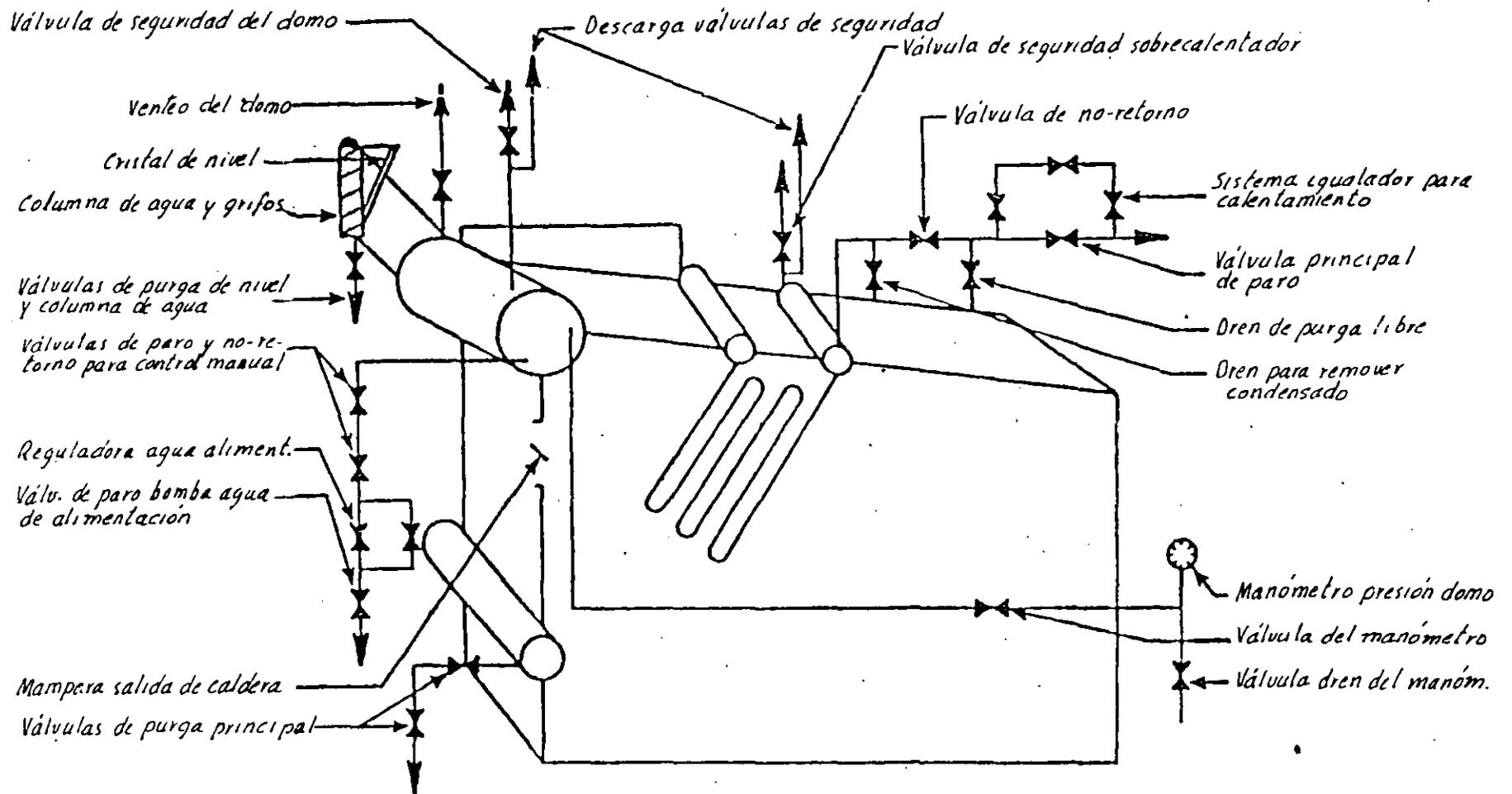


FIG ACCESORIOS DE CALDERAS

## **VALVULAS DE SEGURIDAD.**

En la Fig. , se muestran algunos de éstos accesorios.

La válvula más importante en una Caldera es la válvula de seguridad. El propósito primario de una válvula de seguridad es el de limitar la presión interna de la caldera a un punto por abajo de su presión segura de trabajo. Las calderas se diseñan para una cierta presión máxima de operación y si ésta presión se excede existe el peligro de una explosión a menos de que se alivie esta presión.

La válvula de seguridad original de uso regular se conoció como válvula de seguridad de "peso-muerto" y consistía de una serie de conjunto de pesos sobre lo alto de la válvula: los pesos dependían de la presión que debía ser retenida (Fig. ).

Una mejora a la válvula anterior fue la introducción de la válvula de seguridad de pesos muertos tipo palanca, la cual combinaba una palanca, un punto de apoyo o pivote y pesos para proveer una válvula de presión variable de alivio (Fig. ).

Las aplicaciones marinas hicieron necesario el empleo de una válvula de seguridad cargada con resorte, debido a que el movimiento del casco causaba que variara el centro de gravedad de los pesos, y con ello la presión a la cual la válvula abría (Fig. ).

Para determinar la carga en cualquier válvula de seguridad, se multiplica el área de la válvula por la presión en la caldera; para determinar la presión, se divide la carga sobre la válvula entre el área de la válvula.

En la actualidad lo más común es que las Calderas estén equipadas con válvulas de seguridad cargadas con resorte tipo trueno o detonación.

### **Definiciones.**

La función de todas las válvulas de seguridad es la de abrir a una presión de ajuste y cerrar cuando la presión se ha reducido un poco por abajo de la presión de ajuste; la diferencia entre la presión de ajuste y la presión de cierre se conoce como el "blowdown" de la válvula, y éste se logra usando alas extendidas sobre la válvula (Fig. ), de manera que cuando levanta la válvula se amplía el área que esta expuesta a la presión del vapor causando que la válvula permanezca abierta más allá de la presión de ajuste.

Las reglas que gobiernan la instalación y diseño de las válvulas de seguridad son las siguientes:

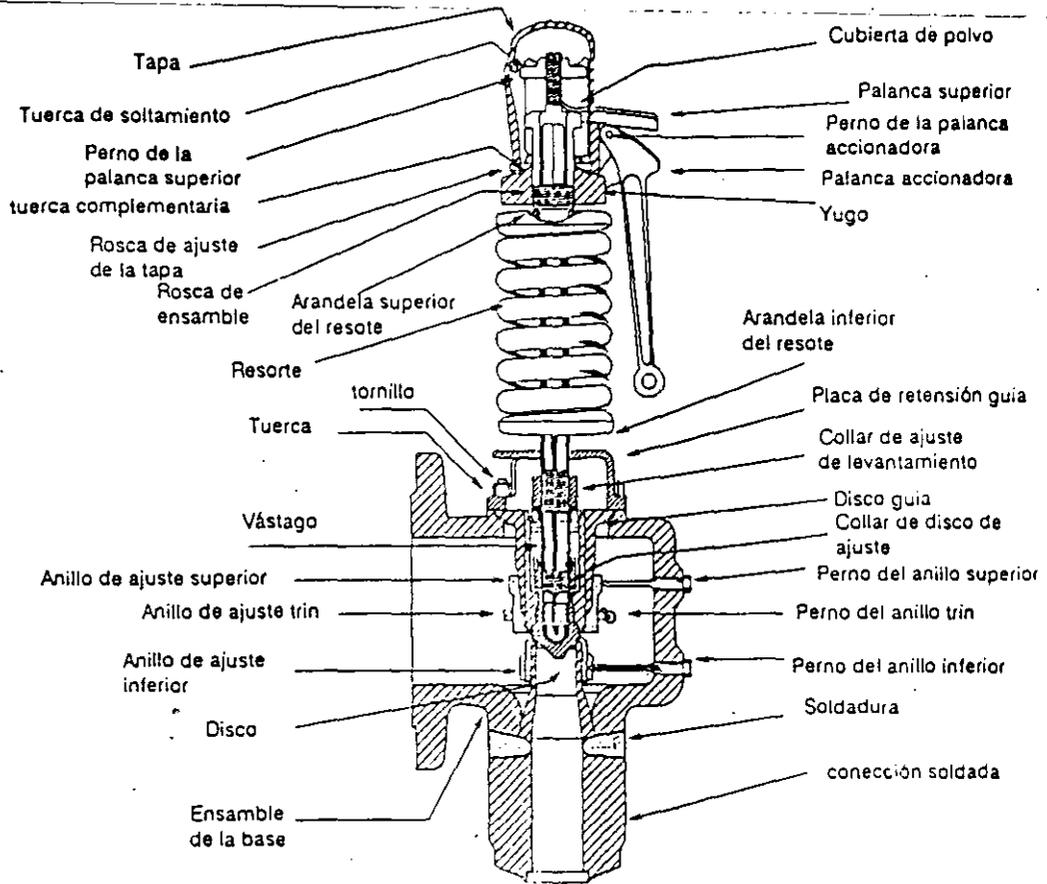
- cada caldera debe tener al menos una válvula de seguridad, pero si tiene más de 46.7 m<sup>2</sup> (500 pies<sup>2</sup>) de superficie de calentamiento de agua, deberá tener dos o más válvulas de seguridad;
- la capacidad de la válvula de seguridad de cada caldera debe ser tal que la válvula o válvulas de seguridad descarguen todo el vapor que pueda ser generado por la caldera, sin permitir que la presión se eleve más de 6% arriba de la presión más alta a la cual cualquier válvula esté ajustada, pero en ningún caso más de 6% arriba de la máxima presión de trabajo permisible (MPTP);
- una o más de las válvulas de seguridad de la propia caldera deben ajustarse a o abajo de la MPTP. Si se usan válvulas adicionales, la presión mas alta de ajuste no debe exceder la MPTP más de 3%;
- el rango completo de ajuste de presión de todas las válvulas de seguridad de vapor saturado en la caldera, no debe exceder 10% de la presión mas alta a la cual cualquier válvula está ajustada;
- se debe revisar cuidadosamente el código ASME para el número requerido y tamaños de válvulas así como su ajuste apropiado;
- todas las válvulas de seguridad deben construirse en forma que la falla de cualquier parte no obstruya la libre y completa descarga de vapor de las válvulas;

### Definiciones

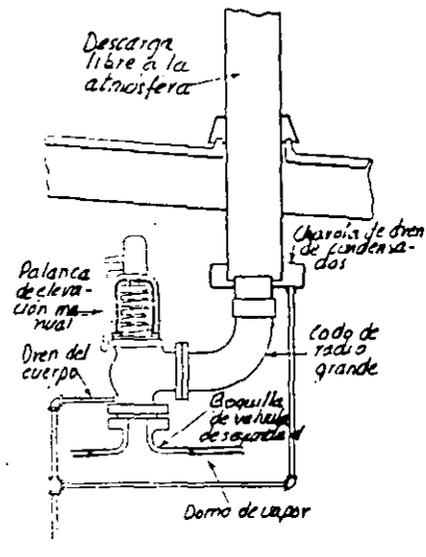
Hay un número de términos usados en relación con las válvulas de seguridad, entre los que se encuentran los siguientes:

**Presión de trueno o soltamiento.** Es la presión de alivio a la cual la válvula de seguridad abre. La presión correcta para una válvula no está en la placa de datos

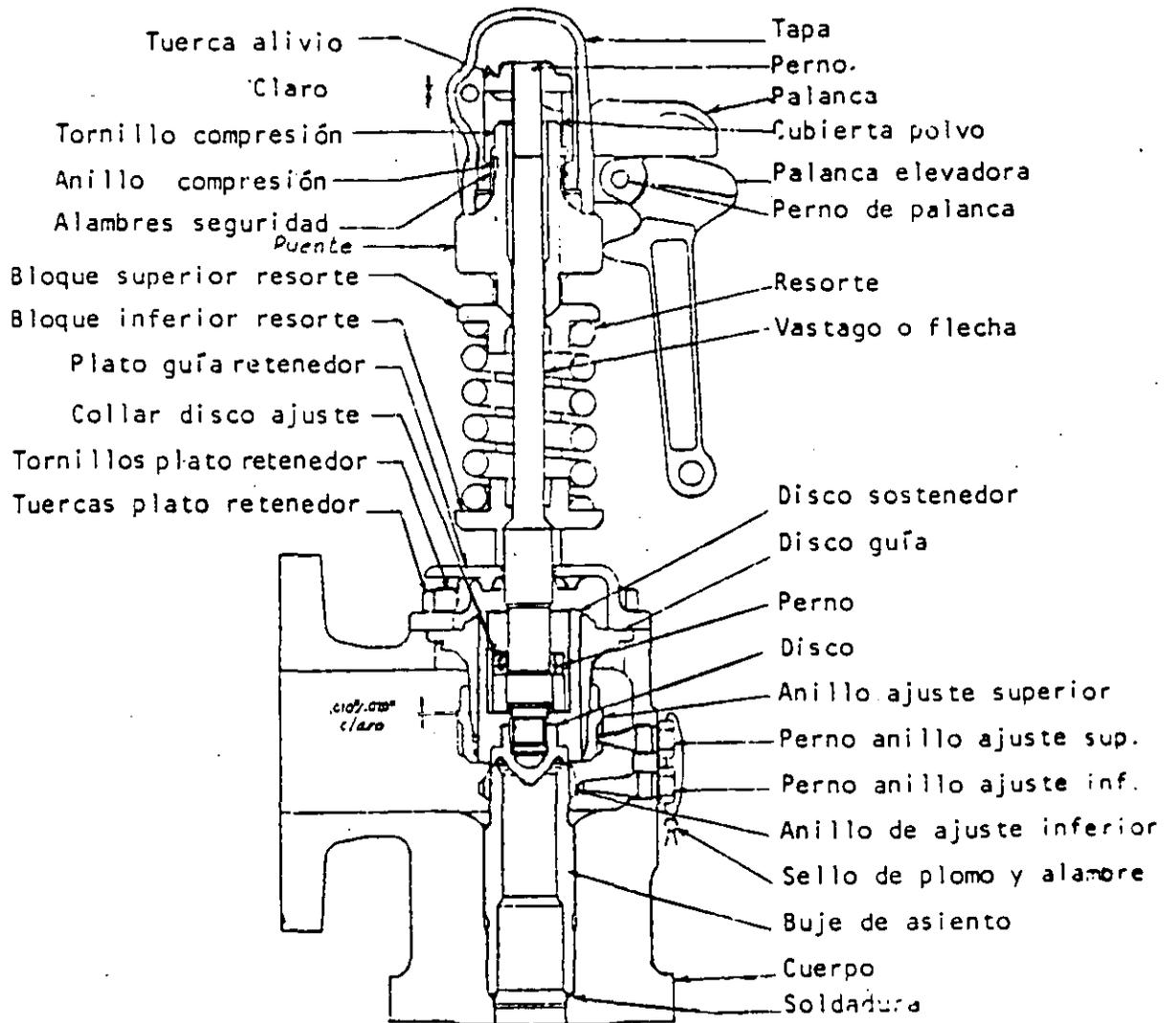
**Blowdown o Blowback.** (Golpe de cierre o golpe de regreso). Es la diferencia de presión a la cual la válvula abre y a la cual la válvula cierra. La calidad correcta de blowdown está usualmente estampada en la placa de datos de cada válvula.



Partes de una Válvula de Seguridad Típica.



Descarga y drenes de válvulas de seguridad



VALVULA DE SEGURIDAD TIPO RESORTE

Tuerca del vástago de válvula

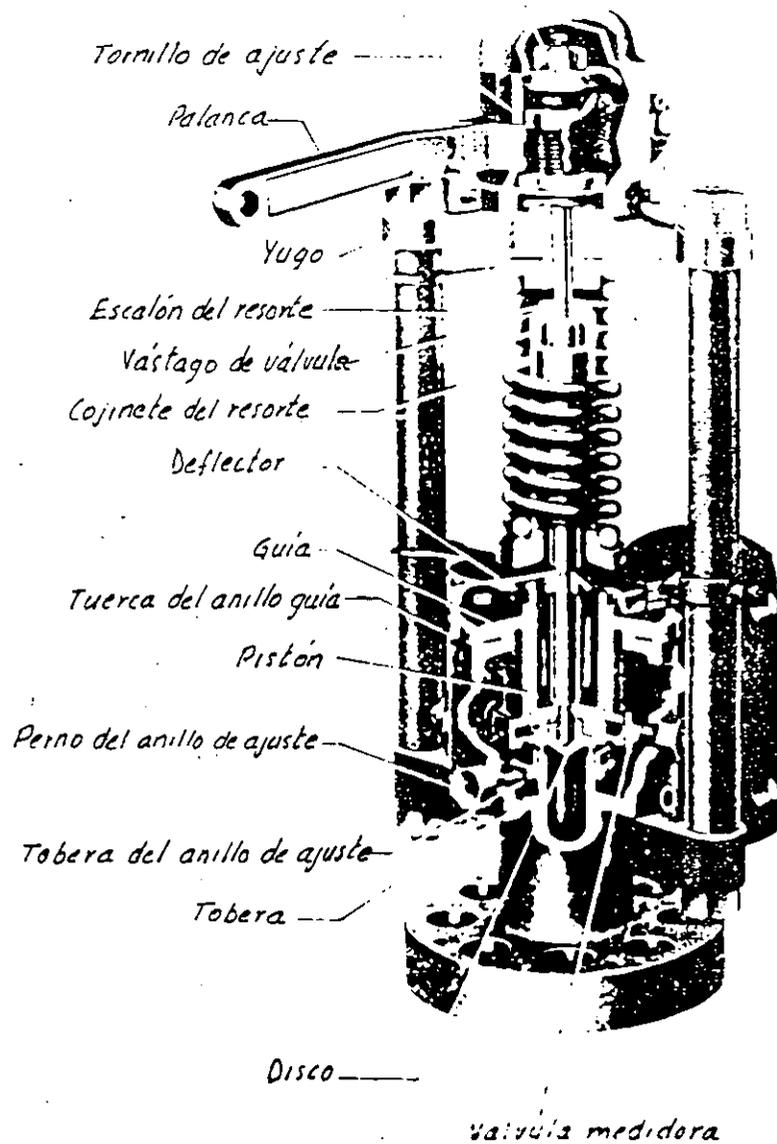
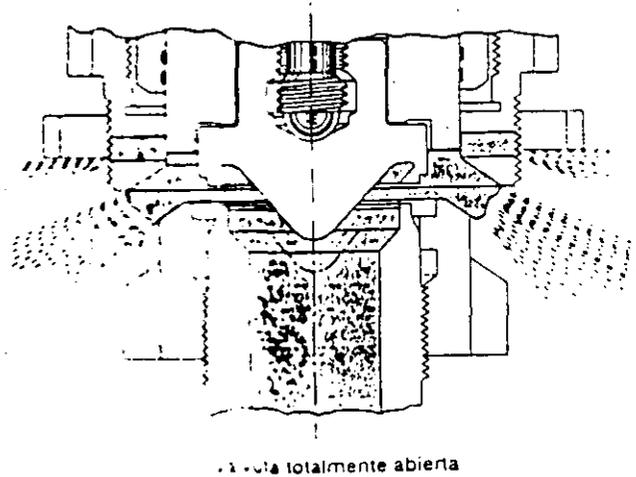
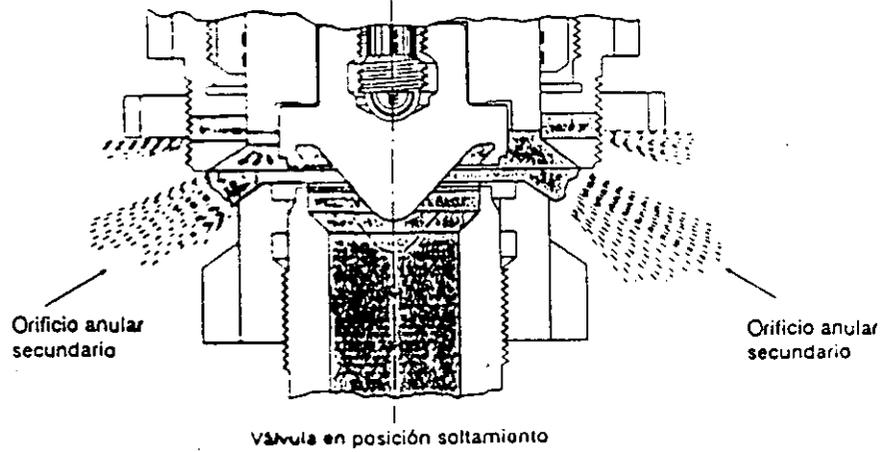
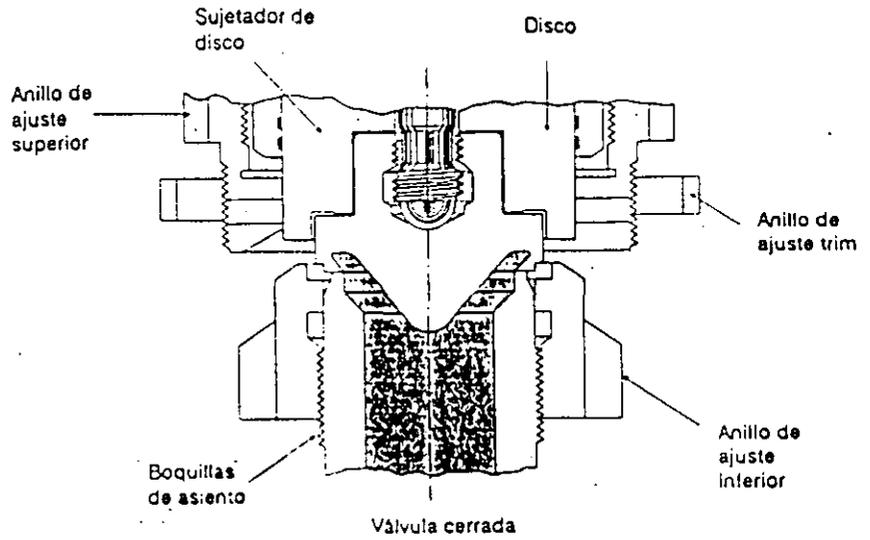
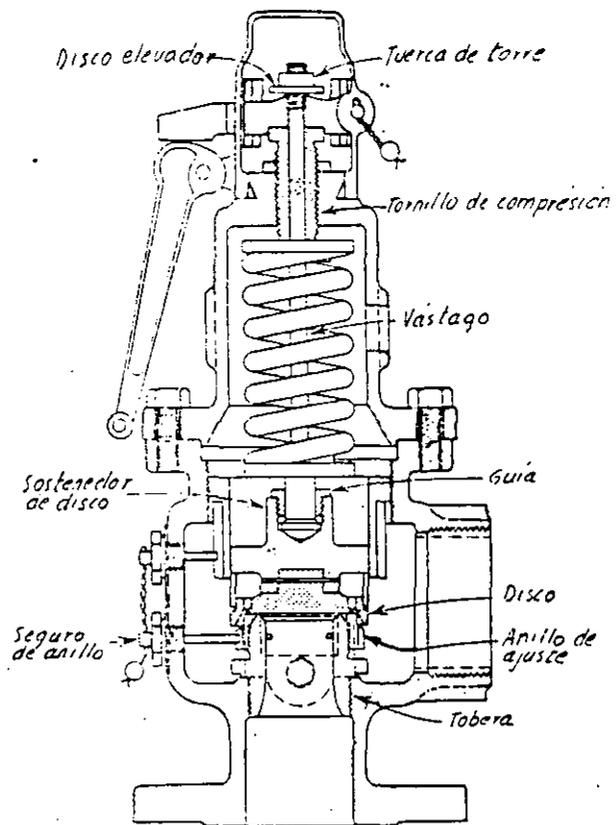
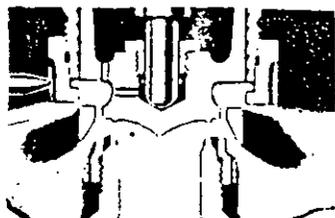


FIG VALVULA DE SEGURIDAD DE FLUJO A CHORRO

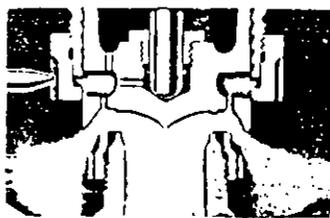




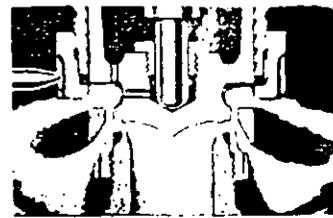
Cerrada



Abriendo a 3/4



Abierta completa



Cerrando a la mitad

FIG VALVULA DE SEGURIDAD DE REACCION-TOBERA

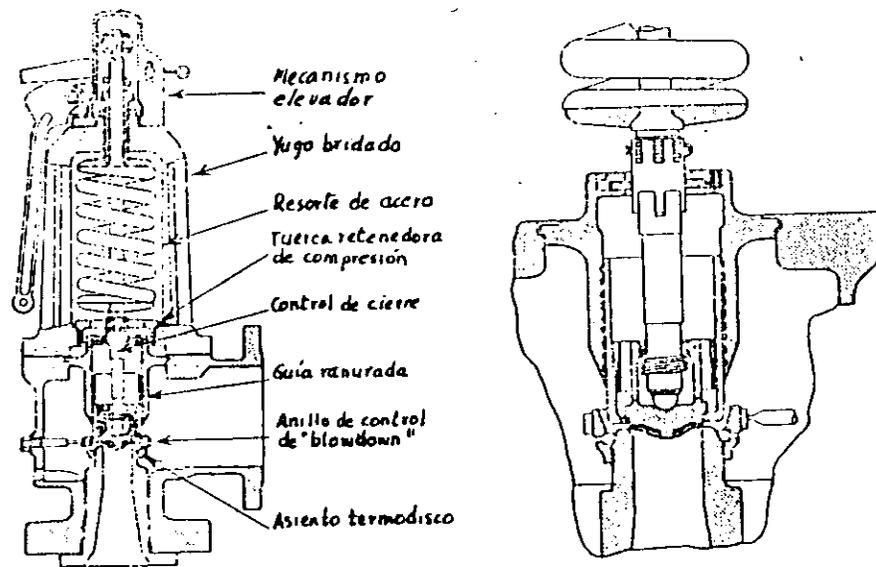


FIG VALVULA DE SEGURIDAD DE CAMARA REUNION

## PURGAS

El agua alimentada a la caldera contiene impurezas en la forma de sólidos disueltos y sólidos suspendidos; una parte importante de éstas impurezas se quedan en la caldera cuando el vapor sale de ella.

Algunas de las impurezas suspendidas son de tal naturaleza que se asientan en la parte mas baja de la caldera, pero otras son ligeras y flotan en la superficie del agua. Esta condición frecuentemente requiere la instalación de líneas de purga tanto de superficie como de fondo en algunas calderas.

Hay dos tipos de arreglos de purga de superficie:

- uno consiste de un tubo que entra al domo aproximadamente en el nivel normal de agua con el tubo fijo en una posición;
- otro arreglo tiene una junta o articulación giratoria en un extremo de una pieza corta de tubo, siendo sostenido el extremo libre en la superficie por un flotador.

La purga de superficie tipo flotador frecuentemente se conoce como "espumadera". La purga de superficie es ventajosa para quitar la espuma o remover el aceite del agua de caldera; una línea de purga de superficie no debe exceder de 63 mm. (2 1/2) de diámetro.

Por lo general la purga de superficie se hace sobre una base continua y después de que se prueba el agua de alimentación; una válvula Flocontrol es una válvula tipo orificio equipada con un indicador (para mayor precisión) y regulada manualmente para controlar la cantidad de agua descargada, basada en el análisis del agua. Purgas a bajo régimen sobre largos periodos de tiempo reducen la concentración mas efectivamente de lo que es posible con aperturas grandes de la válvula principal de purga, con lo que se logra un mejor control y regulación mas precisa de la purga; adicionalmente, la erosión y el desgaste de partes de la válvula se mantienen al mínimo.

La purga continua requiere de un tanque de "flasheo" en donde el agua a alta presión pueda ser "flasheada" a vapor de baja presión y usada para proceso o calentamiento de agua de agua de alimentación, o bien la purga continua puede pasarse a través de un cambiador de calor para precalentar el agua de repuesto. En caso necesario, una pequeña parte del agua de la purga con alcalinidad alta puede inyectarse a la línea de agua de alimentación a la caldera para elevar el valor del pH del agua y eliminar la corrosión en la línea de alimentación o economizador.

Para ser efectiva la purga continua, la toma debe colocarse en un punto de la caldera en donde el agua tiene la concentración mas alta de sólidos disueltos; por lo general este punto se localiza en donde la mayor parte del vapor se separa del agua de la caldera; ordinariamente en el domo de vapor, de donde adquiere el nombre de purga de superficie.

Todas las calderas deben estar equipadas con una tubería de purga de fondo unida con una válvula conectada directamente al punto mas bajo en el espacio de agua de manera que pueda ser drenada completamente la caldera.

Las líneas de purga de fondo deben ser extra-fuertes, de no menos de 25.4 mm. (1") y no mas de 63.5 mm. (2 1/2") de diámetro, excepto para las calderas con 9.3 m<sup>2</sup> (100 pies<sup>2</sup>) de superficie de calentamiento o menos, que pueden llevar un tamaño mínimo de 19 mm. (3/4"). Una tubería muy pequeña puede taponarse y una muy grande podría descargar el agua demasiado rápido.

Debido a que no hay circulación de agua en la tubería de purga de fondo, frecuentemente se les acumula incrustación y lodos, a menos que esta tubería se proteja de los gases calientes con materiales aislantes adecuados, está en riesgo de quemarse.

En calderas que operan a una presión de 7 kg/cm<sup>2</sup> (100 psi) o mayor, se requieren dos válvulas de purga (de fondo); éstas pueden ser:

- dos válvulas de apertura lenta
- una de apertura lenta y otra válvula de apertura rápida

Una válvula de apertura lenta es una en la cual se requiere al menos cinco vueltas de 360° del dispositivo de operación para cambiar de completamente cerrada a abierta o viceversa.

En la Fig. se muestra una válvula de apertura rápida con sellado de doble asiento; ésta válvula se usa frecuentemente en tandem con una válvula sin asiento.

La válvula de apertura rápida se instala cerca de la caldera y es la "primera" en abrir y la "última" en cerrar.

En la combinación tandem la válvula de apertura rápida se convierte en la válvula selladora en lugar de la válvula de purga o soplado; la válvula mostrada esta diseñada para operar a una presión máxima de 22.5 kg/cm<sup>2</sup> (320 psi).

**NOTA:** Para todos los otros arreglos de válvulas en tandem, la secuencia de operación es al revés; aquí, la segunda válvula desde la caldera se abre primero y se cierra al último; la purga o soplado tiene lugar a través de la siguiente válvula de la caldera.

## NIVELES O COLUMNAS DE AGUA

Mientras que la válvula de seguridad es la "válvula mas importante" de la caldera debido a que puede prevenir la presión excesiva, la columna de agua con su cristal de nivel agrega mas seguridad a la operación, permitiendo ver al operador cuanta agua hay en la caldera; todas los manuales de operación de caldera, bajo todas las circunstancias, dan las siguientes instrucciones:

el primer trabajo de un operador de caldera al tomar la operación, es verificar el nivel de agua en el cristal de nivel.

La columna de agua y su cristal de nivel es un dispositivo simple, la comprensión completa de su función y los medios para asegurar su precisión es esencial en la operación de calderas.

El nivel de agua son los ojos del operador dentro de la caldera; sin un nivel confiable el operador esta vendado.

El mantenimiento correcto del nivel de agua en la caldera es siempre responsabilidad del operador de la caldera; los cristales de nivel se proveen como asistencia y se instalan para indicar el nivel de agua en la caldera o el domo de la misma.

Para pequeñas calderas, los cristales de nivel se conectan directamente al domo o cubierta con conexiones roscadas (Fig y ), o bien se puede emplear una columna de agua.

Una columna de agua es un recipiente al cual se conectan cristales de nivel u otros dispositivos indicadores del nivel de agua (Fig y ); la columna de agua permite que el cristal de nivel se localice en donde pueda ser observado fácilmente y hace accesible la instalación para inspecciones y reparaciones.

La localización del cristal de nivel y columna de agua varía en los diferentes tipos de calderas, pero en donde quiera que se localicen, el agua en el cristal debe mantenerse en el nivel requerido para evitar sobrecalentamiento de las superficies de la caldera.

Los grifos de prueba se emplean para verificar el nivel de agua en la caldera cuando el cristal de nivel se rompe o está fuera de servicio, así, en adición al cristal de nivel, cada caldera debē tener tres o mas grifos (Figs. y ) localizados dentro del rango de longitud visible del cristal de nivel cuando la presión máxima permisible excede 1.05 kg/cm<sup>2</sup> (15 psi), excepto cuando la caldera tiene dos cristales de nivel con conexiones independiente a está, localizadas en la misma linea horizontal y separadas no menos de 60 cm.

Las calderas de 91 cm (36") de diámetro y menores, en las cuales las superficies de calentamiento no exceda de 9.3 m<sup>2</sup> (100 pies<sup>2</sup>), necesitan tener dos grifos: el grifo inferior se localiza al nivel mas bajo de agua permisible, y el grifo superior al nivel mas alto deseado. Si los grifos se localizan apropiadamente, el agua debe siempre llegar del grifo mas bajo, y el vapor del grifo mas alto. Dependiendo del nivel de agua en la caldera, el agua o el vapor entraran por el grifo del centro.

Las conexiones de los cristales de nivel de agua se hacen con válvulas abajo y arriba, de forma que si se rompe el cristal, se puede cerrar el agua y el vapor para reemplazar el cristal. Con frecuencia las válvulas manuales se operan con cadenas con objeto de mantener el operador fuera de peligro.

Muchos niveles tienen válvulas de cierre tanto manuales como automáticas; las válvulas de cierre automáticas consisten de válvulas de no-retorno en las conexiones superior e inferior del nivel. Si se rompe el cristal, el impulso del agua y del vapor causarán que cierren éstas válvulas.

Las válvulas de no-retorno son de material no-ferroso, y están diseñadas para abrir por gravedad; éstas válvulas automáticas (bolas) deben ser de al menos 12.7 mm. (1/2") de diámetro, y debe ser posible remover para inspección la válvula inferior con la caldera en servicio.

Para agregar seguridad, algunas veces los cristales de nivel se encierran en una placa de vidrio insertada con alambre para proteger al operador en el caso de rotura del cristal.

Para presiones altas, las columnas de agua se hacen de vidrio plano (Fig. ) con una placa de mica para proteger al vidrio de la acción destructiva (etching) del vapor.

Las siguientes maniobras para verificar las válvulas de los cristales de nivel se refieren a la Fig. :

· para asegurarse que la tubería del lado de vapor esta limpia, ciérrase las válvulas C y D y abra al dren E: si sopla vapor, la tubería esta limpia;

· para asegurarse que la tubería del lado de agua está libre, cierre las válvulas A y B, y abra el dren E: si sopla agua, el paso esta limpio.

· si después de que se sopló el cristal el agua no regresa, entonces la válvula D ó C están bloqueadas: Para probar D, cierre las válvulas A y C y sople a través de D y B al dren E: si sopla agua, entonces D está bien. Para probar C, cierre las válvulas B y D y sople a través de A y C al dren E: si sopla vapor, entonces C está libre;

... si después de soplar el cristal, este se llena completamente, las válvulas de vapor están tapadas. Para localizar cual válvula esta tapada cierre, D y B, sopla a través de A y C al dren E: si sopla vapor, entonces A está limpia. Para probar B, cierre A y C, y sopla a través de D y B al dren E: si sopla agua, entonces B está bien.

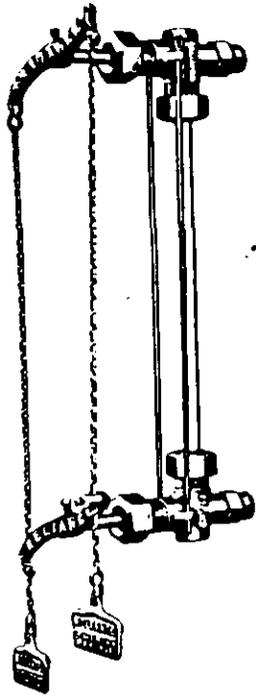
La columna de agua contiene varios dispositivos de advertencia de alto o bajo nivel de agua, como alarmas que dan una señal (silbido) cuando el agua se eleva o cae por abajo del nivel seguro de agua (Fig. ); dentro de la columna de agua se localizan dos flotadores, uno arriba de otro, y a cada flotador está conectada una varilla que abre una válvula, es decir, que opera el silbido. Si el nivel del agua es suficientemente alto para elevar el flotador superior, la varilla abre la válvula, admitiendo vapor para crear el ruido de silbido, y lo mismo ocurre si el nivel de agua cae, haciendo que el flotador inferior caiga y haga la advertencia. Hay muchos diseños diferentes de alarmas alto-bajo nivel que operan bajo el mismo principio; los silbidos pueden diseñarse para que el tono denote si la alarma es por alto o bajo nivel de agua. Estas alarmas son advertencias antes de que ocurra el disparo de la caldera por bajo o alto nivel de agua.

El nivel bicolor simpliport (Fig. ) se utiliza para servicio de alta presión; tiene la ventaja de que esta construido seccionalmente, de forma que el reemplazo de puertos es rápido y sin remover el nivel de la caldera; normalmente solo se requiere darle servicio a un puerto por ves. El nivel está iluminado para obtener el máximo contraste de color: el agua verde y el vapor rojo, y el nivel de agua está siempre donde se encuentran los colores.

La operación del nivel simpliport se basa en el principio óptico simple de que la deflexión de un rayo de luz difiere cuando el rayo pasa oblicuamente a través de medios diferentes, por lo tanto, cuando la luz pasa a través de una columna de vapor, la cantidad de deflexión a la cual está sujeto no es la misma que cuando pasa a través de una columna similar de agua. Si el vapor ocupara el espacio entre las ventanas adelante del cristal, la luz verde (agua) se flexionaria fuera del campo de visión y la luz roja (vapor) apareceria en el cristal, si el agua ocupara el espacio entre las ventanas, la luz roja se flexionaria fuera del campo de visión y apareceria la luz verde en el cristal.

A veces la columna de agua está lejos del pozo de operación, pero este problema se soluciona empleando un periscopio para llevar la imagen del nivel al piso de operación. los colores en el cristal se dirigen a un espejo, que a su vez esta reflejado en un espejo en el piso de operación. La distancia no es un factor y la indicación real del nivel de agua esta disponible todo el tiempo. En unidades modernas a veces se usa fibra óptica para transmitir la indicación del nivel del domo a la sala de control del operador que puede estar localizada a considerables distancia de la caldera.

Otros dispositivos para indicar el nivel de agua están actuados por la altura del agua en el domo; la presión diferencial puede usarse para operar una aguja en un manómetro, o puede hacerse para registrar el nivel.



Valvulas de cristal de nivel

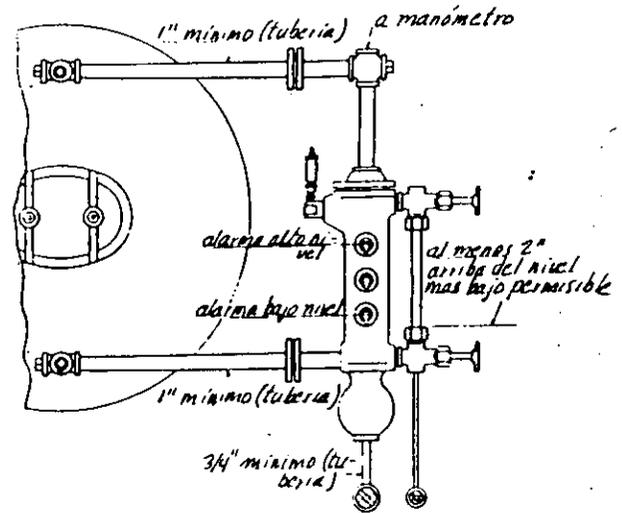
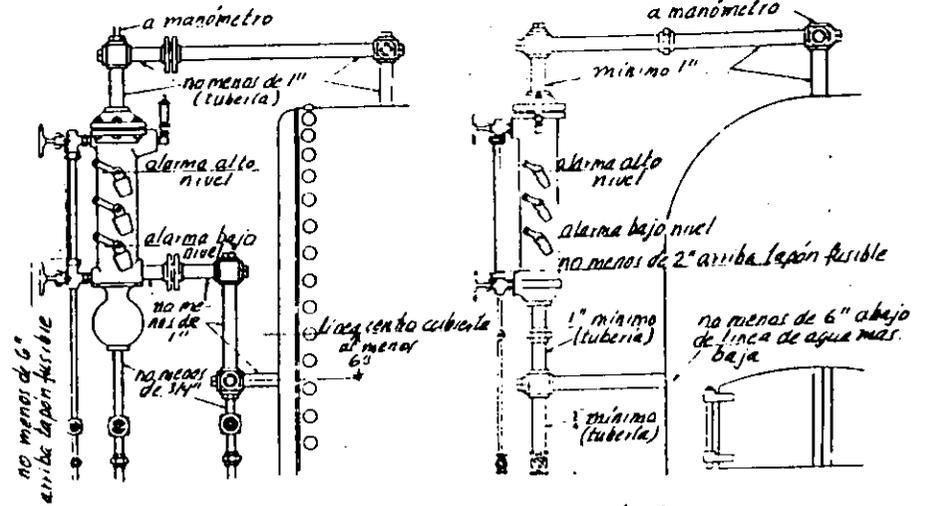
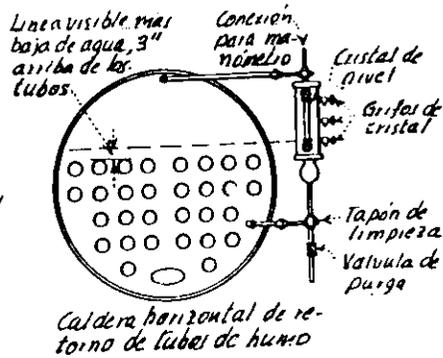
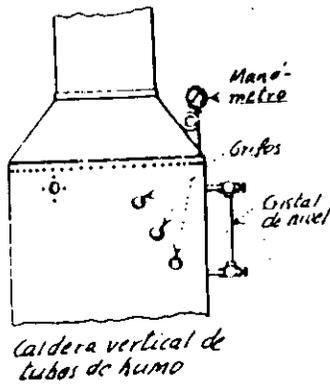


FIG CONEXIONES DE COLUMNAS DE AGUA Y CRISTALES DE NIVEL

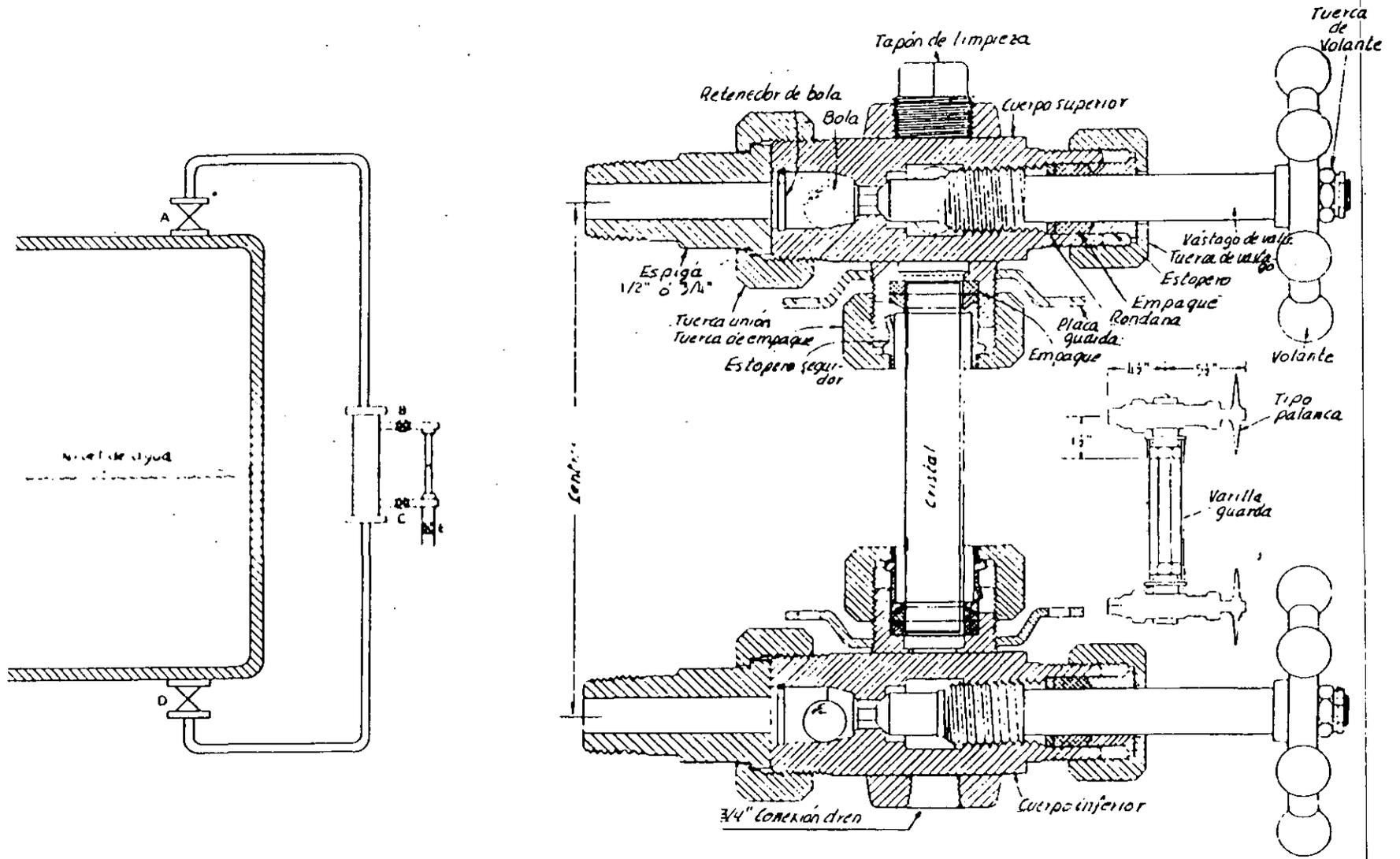


FIG COLUMNA DE AGUA TIPICA Y SECCION TRANSVERSAL DE GRIFOS



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

ENERO 30 A FEBRERO 3

TENA: H O G A R .

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

## VI- HOGAR

### 1. GENERAL

El hogar de las calderas es una cámara en donde se quema el combustible, normalmente de sección cuadrangular o circular, cerrada en sus cuatro lados con tubos de agua que se conocen por paredes de agua y también en el fondo y en el techo; el diseño del hogar no sólo considera el fenómeno de combustión, sino también la evacuación o transmisión de calor.

Las principales funciones del hogar son las siguientes :

- mantener una combustión estable del combustible suministrado y realizar la combustión completa de éste, para la cual deberá tener un tamaño adecuado.
- permitir una circulación de agua suficiente a través de las paredes para enfriar todos los tubos de las paredes de agua a un nivel apropiado de temperatura.
- mantener una temperatura de los gases, a la salida del hogar, adecuada para que en las superficies de calentamiento por convección, se tenga un efectivo cambio de calor y una temperatura del metal de los tubos apropiada.

El combustible se inyecta al hogar junto con el aire para la combustión, en donde se quema completamente y el calor radiante de la flama y los gases de combustión es absorbido por los tubos de las paredes de agua que lo transmiten al agua que fluye dentro de ellos. Los gases de combustión enfriados por los tubos de las paredes de agua a una temperatura apropiada, salen del hogar y entran a las superficies de calentamiento por convección del sobrecalentador, recalentador y economizador, como se muestra en la Fig. V-1 .

Considerando el desarrollo de los fuegos y la colocación de quemadores, los hogares pueden clasificarse en la siguiente forma :

- paralelos (quemadores al frente o al frente y atrás)
- turbulento (quemadores en las esquinas que inyectan el combustible en forma tangencial cerca del centro)

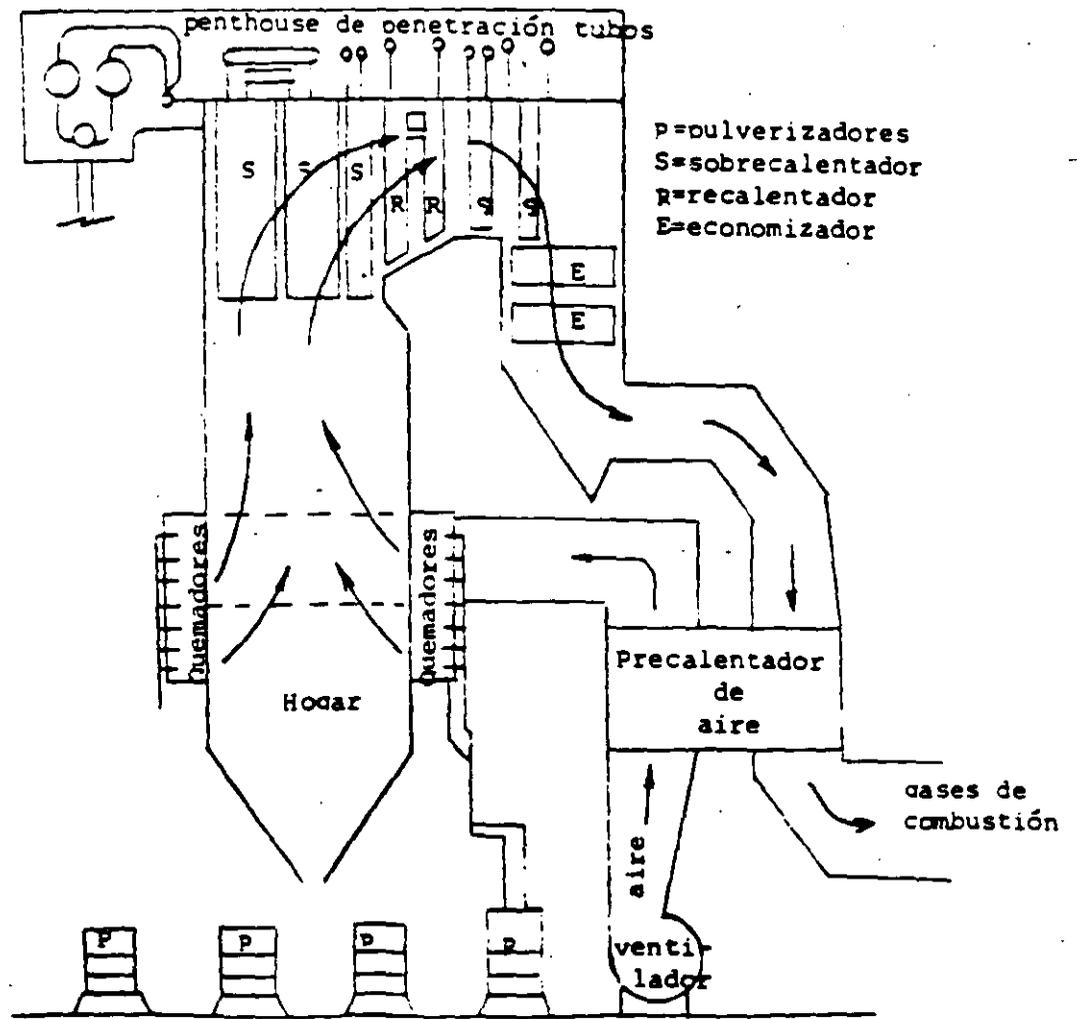


FIG. V-L- CALDERA DE CARBÓN PULVERIZADO

Los factores que influyen en el diseño (volumen y proporciones) del hogar son principalmente los siguientes :

- . tipo de combustible
- . características de las cenizas del combustible
- . régimen de variación de carga
- . régimen de liberación de calor, % de recuperación de calor en forma económica
- . paredes (material, fabricación, etc.)
- . otros como temperatura máxima, exceso de aire, longitud de la flama, etc.

En la figura V-2 , se muestran las proporciones y tamaños relativos de los hogares para los diferentes tipos de combustibles: carbón, petróleo y gas. En el caso del carbón los hogares pueden ser para quemarlo en lechos o parrillas y para quemarlo en suspensión utilizando quemadores, cuya descripción se hace en *la sección 6-b de este Capítulo*

2- TERCERA

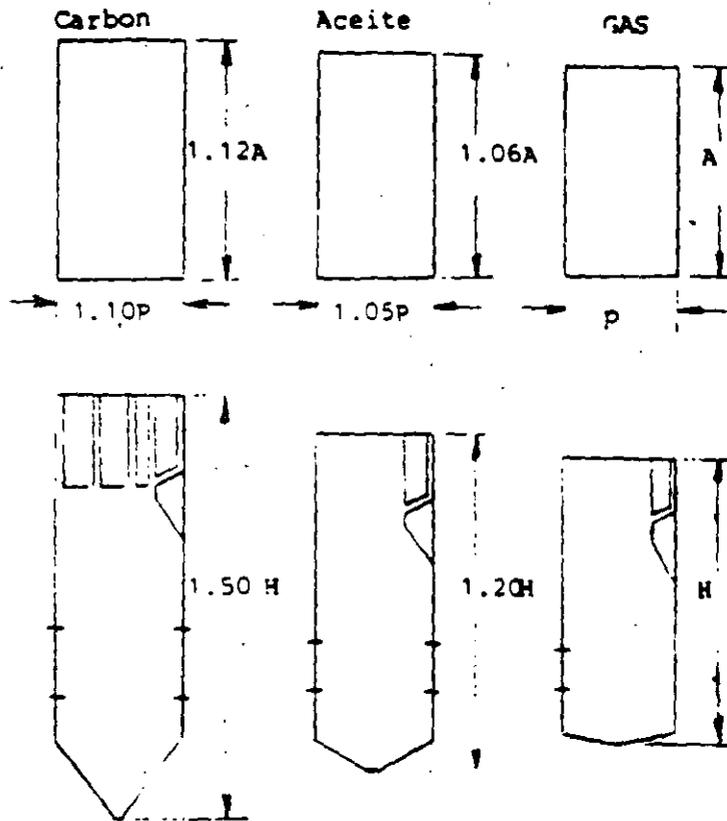
El espacio necesario para la combustión está estrechamente relacionado con la forma de la llama. Generalmente el modelo de quemador es el que determina la forma del horno y sólo en casos excepcionales es preciso que un quemador se ajuste a las dimensiones de una cámara de combustión; esto no excluye que para las dimensiones de una llama determinada se pueda fabricar un horno con medidas diferentes.

*En la Fig V-3 se muestran las longitudes de las cámaras de combustión, según el flujo de aceite combustible*

Se entiende por rendimiento de una llama en una cámara de combustión, la relación entre el calor absorbido por el material a calentar, o bien, transformado en potencia y el calor liberado durante la combustión.

El coeficiente de transmisión global del calor en un horno, depende del coeficiente de radiación que varía con el cubo de la temperatura absoluta de la llama

Ej. No excluye.



Exceso de aire	25	10	8
Relación C/M	15	6 a 8	3
Relación en peso aire / com- bustible	12	16	18

TAMAÑOS RELATIVOS Y PARAMETROS AIRE-COMBUSTIBLE DE  
HOGARES DE CALDERAS

## 5.- HOGARES PARA QUEMAR EL COMBUSTIBLE EN LECHOS O PARRILLAS.

Los hogares de parrillas se caracterizan por la combustión del combustible en estratos, en donde las parrillas sirven para soportar al combustible en todas las fases de combustión, para la admisión y distribución del aire necesario para la combustión, así como para evacuar los residuos de combustión (ceniza y escoria). En los hogares con parrillas, generalmente se quema el carbón con una granulometría mayor de 5 mm. El proceso de combustión del carbón en parrillas consta de las siguientes fases: secado, desprendimiento de materia volátil, combustión del coque y post-combustión. En la etapa de secado, el carbón que se coloca en la parrilla pierde por vaporización la humedad total que contiene, usando para esto un flujo de calor del carbón contenido en el hogar, bastante para alcanzar el desprendimiento de calor de combustión. El carbón seco eleva su temperatura de 380 a 1100 °K, etapa en la cual tiene lugar el desprendimiento de la materia volátil y desde el punto de vista del estrato de carbón, esta etapa es endotérmica debido a que la materia volátil arde en el volumen situado por sobre el estrato. En la fase siguiente el carbón restante que se encuentra en la forma de coque alcanza la temperatura de encendido y se quema en el estrato desprendiendo una cantidad de calor equivalente a la combustión del carbón. La masa de ceniza restante de la etapa

precedente queda unida a algunas partes de carbón, partículas que no pueden quemarse debido a que el aire no tiene acceso a ellas, pero en la última etapa de combustión cuando se revuelve o raspa la ceniza, estas partículas se ponen en contacto con el aire y se quema, comprendiéndose que en esta etapa de post-combustión la cantidad de calor producida en el estrato es relativamente pequeña y en la misma forma también el aire necesario.

## 6.- HOGARES PARA QUEMAR EL COMBUSTIBLE EN SUSPENSIÓN

Los hogares con quemadores se emplean para quemar combustible sólido y líquido en estado pulverizado, así como para quemar combustible gaseoso mezclado con el aire.

Desde el punto de vista del proceso físico de combustión, tanto el combustible sólido en estado de polvo como el combustible líquido pulverizado se comportan en forma similar al quemarse en suspensión debido al hecho de que las fases de quemado son similares y que constan de lo siguiente :

Preparación inicial térmica del combustible, enseguida el desprendimiento de la materia volátil y finalmente la combustión difusiva del residuo carbonoso. El quemado del combustible gaseoso tal como se efectúa en los hogares de calderas es una combustión cinética en vista de los dispositivos y métodos que se toman para homogeneizar la mezcla combustible-aire antes de la entrada al hogar.

Desde el punto de vista constructivo, los hogares con quemadores son simples ya que se realizan en la forma de una cámara paralelepípeda o circular calculada en tal forma de que por una parte se asegure el quemado del combustible dentro del hogar y por otra parte, que la superficie de cambio de calor por radiación produzca la temperatura óptima en el hogar; en general, esta temperatura se determina por consideraciones técnico-económicas pero está limitada en los valores inferiores a realizar una combustión estable dentro de un intervalo de tiempo igual al tiempo disponible para el quemado del combustible en el espacio del hogar. La solución constructiva para hogares con quemadores son diferentes de acuerdo con la naturaleza del combustible.

En el caso de quemadores de combustibles colocados en la cara frontal, la profundidad del hogar debe ser cuando menos de 3 m. para quemadores con gasto menor de 250 kg/h y de más de 4 m. para quemadores más grandes; para evitar el goteo de combustible que forma depósitos duros, los quemadores deben instalarse con una separación entre ellos y con una distancia a los extremos de las paredes y al fondo del hogar no menor de 1.0 a 1.2 m. El calor necesario para llevar el combustible a las condiciones adecuadas para una buena combustión, varía de 250 a 300 kcal/kg. Las antracitas y carbones secos que contienen del 4 al 18% de materia volátil, se queman económicamente si sus partículas son inferiores a 90 micras; las hullas que contienen del 20 al 30% de materia volátil, se queman económicamente cuando sus partículas son menores de 200 micras. El espaciado entre quemadores, entre éstos y los extremos de las paredes y el fondo no debe ser menor de 1.5 a 2.0 m.

#### *2.- Combustibles líquidos, gaseosos.-*

En el caso de combustibles gaseosos, la mezcla entre combustible y aire se hace esparciendo uniformemente el gas en el aire; en el caso de combustibles líquidos, esparciendo una pulverización fina de combustible y después mezclándolo con el aire de combustión.

Uno de los papeles importantes del hogar, en este caso, es el de terminar el proceso de mezcla y después crear las condiciones térmicas necesarias para el encendido de la mezcla.

En el caso de calderas pequeñas, se colocan los quemadores en la pared frontal del hogar y la parte anterior se protege en toda la circunferencia, en una longitud de 600 a 1000 mm para protección de la flama en la zona frente a ésta para evitar el enfriamiento fuerte por contacto con paredes frías; en esta forma, se asegura un flujo de calor suficiente en el proceso permanente de encendido. En la mayor parte de los casos se tiene una aportación suplementaria de calor para asegurar el encendido estable, suministrado por la recirculación local de gases de combustión en la zona de salida del chorro del quemador.

Aún en el caso del encendido con una mezcla de combustible bien estable la zona recubierta de la porción del hogar conserva su importancia para asegurar una combustión completa. En vista de que el enfriamiento fuerte de los productos de combustión que contienen CO y H<sub>2</sub> en una etapa en que la temperatura de los gases de combustión está relativamente baja, se produce el paro de la reacción de combustión en estos componentes y en consecuencia aparecen cantidades importantes de gases no quemados en la salida del hogar.

La longitud del hogar está limitada al valor inferior necesario para terminar la combustión en el hogar, a la longitud de la flama y en general, a la longitud de la zona convectiva.

La combustión de los combustibles líquidos y gaseosos en hogares de tipo cámara de calderas medianas y grandes, aumenta la importancia del problema de ligar la emisividad de la flama radiante, la carga térmica en el hogar, la estabilidad de la flama, el dominio de temperatura de la flama y el coeficiente de exceso de aire necesario.

Un papel diferente del hogar en el proceso de combustión está implícito en su construcción para estabilizar los componentes de combustibles a temperaturas elevadas. Desde este punto de vista, debe tomarse en consideración los que no son termoestables en especial el metano y los hidrocarburos superiores. En condiciones de fuerte calentamiento de los gases de combustible mezclados con los productos de combustión con una dosificación local insuficiente de oxígeno, se forman productos de la rama de hidrocarburos como carbón atómico e hidrógeno, apareciendo la combustión difusiva del carbono y en consecuencia la repartición del flujo radiado directo de la flama está en mayor medida en función del modo como se organizó el proceso de mezcla de los gases combustibles y los gases de combustión que dependen directamente del tipo de quemador, de la presencia de estabilizadores y del grado de turbulencia realizada.

En el caso, cuando los quemadores realizan una buena mezcla de combustible con el aire y con características aerodinámicas adecuadas en el hogar, se produce un precalentamiento rápido de la mezcla, debido a la turbulencia y recirculación de los gases de combustión, obteniéndose una elevación intensa de la flama con valores pequeños del coeficiente de emisividad de flama y de longitud corta de flama.

Cuando los quemadores no realizan una mezcla homogénea y la mezcla de aire-combustible se hace en el recinto del hogar, el tiempo de mezcla va a ser mayor y aparece la posibilidad de precalentamiento del combustible a temperaturas altas sin estar en contacto con suficiente oxígeno para la combustión; en este caso se tiene una combustión difusiva del carbono con coeficientes de radiación de flama mayor y en consecuencia la temperatura máxima se desplaza hacia el centro y final del hogar obteniéndose una temperatura a la salida del hogar disminuida, debido al aumento de cambio de calor por radiación.

En el caso de una combustión con una mezcla demasiado homogénea de combustible-aire, el flujo radiante de la flama va a ser menor y va a variar mucho con la altura del hogar, pero en el caso de que la mezcla de aire y combustible se realice apenas en el hogar, el flujo térmico va a ser mayor y mucho más uniforme en la altura del hogar. Algunos gases naturales combustibles presentan el fenómeno de inestabilidad térmica debido al contenido elevado de metano, que se descompone a  $600^{\circ}\text{K}$ , y a  $1200^{\circ}\text{K}$  aparece completamente descompuesto en carbono atómico e hidrógeno; de esta forma los hogares se dimensionan para una radiación fuerte y se obtiene un grado de emisividad de la flama creando un núcleo de flama con una cantidad mayor de carbono sólido resultado de la descomposición. La combustión del carbono en este caso tiene un carácter difusivo porque las partículas siendo muy pequeñas, la velocidad relativa en el medio gaseoso, es prácticamente nula.

La duración del proceso de combustión en el hogar con radiación intensa se encuentra en el proceso que necesita tiempos más largos y en consecuencia la longitud del hogar se dimensiona para el tiempo de combustión del carbono que teniendo en cuenta la velocidad de reacción a temperaturas elevadas representan el tiempo de difusión en el oxígeno de las partes de carbono y de reabsorción de los productos de la reacción en el medio gaseoso circundante.

Para hogares en que el proceso de combustión tiene un carácter transitorio cinético-difusivo, las dimensiones deben hacerse para el tiempo del proceso difusivo con la naturaleza fluctuante de combustión, resultando un régimen de trabajo en que no aparezca un % importante de pérdidas por combustión química incompleta.

En el caso de hogares para combustibles líquidos y gaseosos, deben poder funcionar con ambos combustibles y el régimen de funcionamiento debe ser satisfactorio desde el punto de vista de la combustión. En general, el cambio de combustible líquido a gaseoso disminuye la radiación directa de 1.10 a 1.15 veces y la temperatura de los gases a la salida del hogar aumenta, en consecuencia de  $20$  a  $30^{\circ}\text{C}$ . El efecto del cambio del combustible puede ser anulado prácticamente, debido a que, como se ha indicado, en el caso de combustible de gas natural se puede obtener una gama más larga de emisividad de flama por el grado de descomposición de los hidrocarburos antes del proceso de combustión.

La colocación de quemadores en el hogar y la geometría de éste y el tipo cámara, son semejantes a las analizadas para combustibles sólido en suspensión y la diferencia consiste en la supresión del embudo en la parte inferior para recoger la escoria.

### b.- Carbon pulverizado en suspensión

El polvo de carbón preparado en pulverizadores para inyectarlo al hogar con quemadores, se hace mezclado con una cantidad de aire primario que lo transporta en suspensión y en el hogar se mezcla con el aire secundario para completar el aire necesario para combustión. Prácticamente en todos los casos de combustible pulverizado se utiliza aire precalentado para facilitar las condiciones de encendido del polvo de carbón en el hogar y para elevar la temperatura teórica de combustión. El encendido se hace como resultado de la radiación de la flama sobre el combustible introducido y de la radiación de las paredes del hogar, así como por la recirculación de gases.

El tiempo de recorrido en el trayecto del hogar de la masa de polvo de carbón debe ser aproximadamente igual al tiempo necesario de combustión; como las dimensiones de las partículas resultado de la pulverización varían de acuerdo con una curva estadística entre 0 y una dimensión máxima, no se elige la dimensión del hogar para el tiempo de combustión de las partículas mayores, debido a que estas sólo son una fracción del % del total. La dimensión de la cámara del hogar se establece con un criterio económico admitiéndose que una pequeña fracción de combustible arde incompleta, en cambio reduciéndose las dimensiones del hogar a la necesaria para el quemado de la mayoría de las partículas que componen la masa del polvo de carbón.

Analizando los diferentes sistemas constructivos de hogares se observa que la diferencia en general es por la forma de la sección del hogar y por el lugar de la colocación de quemadores.

La elección del lugar de colocación de los quemadores considera en primer lugar la utilización máxima del volumen del hogar y una trayectoria suficientemente larga para las partículas.

En algunos casos se usa la colocación de quemadores en las esquinas con la dirección del eje tangente a un círculo en el centro del hogar, tal como se muestra en la Fig. IV-8; la existencia de una velocidad tangencial en la sección del hogar hace que la flama y la masa de gases giren en forma tanto más intensa cuanto se acerquen a la tangente del diámetro del círculo. Esta rotación hace que se tenga una mejor homogenización entre el combustible y el aire, que la transmisión sea más intensa y que la separación entre la escoria y las paredes se mejore.

En el caso de la colocación de quemadores en las esquinas debe observarse durante la operación que la carga sea uniforme en todos los quemadores, debido a que una simetría dispereja de flama y no uniforme produce sollicitaciones térmicas peligrosas en las paredes.



FIG. V-8.- COLOCACION DE QUEMADORES EN LAS ESQUINAS

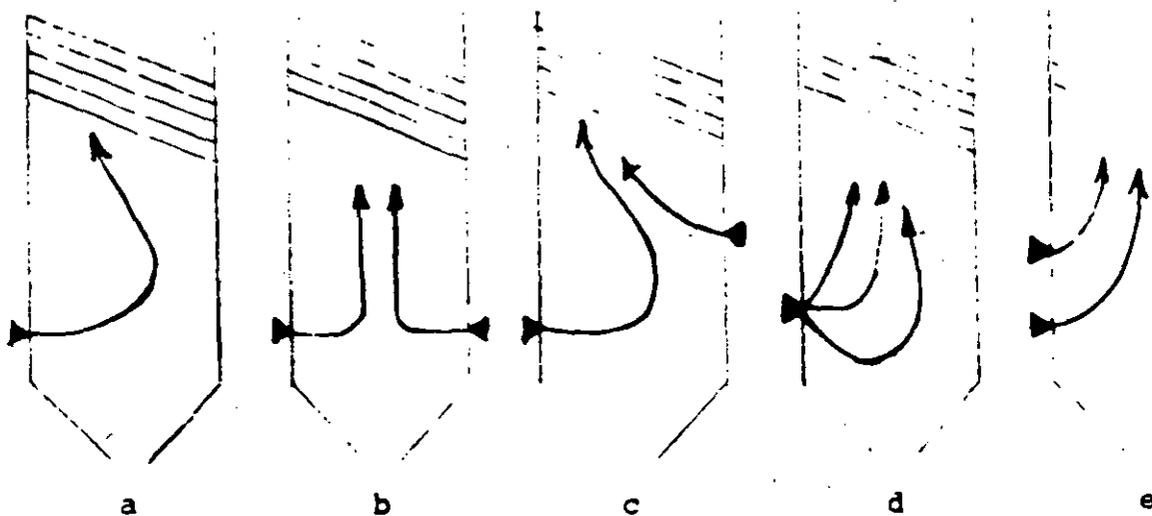


FIG. V-9.- ESQUEMAS DE COLOCACION DE QUEMADORES

- a.- frontal
- b.- frontal y posterior
- c.- con flama en S
- d.- de inclinación variable
- e.- en niveles diferentes

Otra forma de colocación de quemadores es el de localizar éstos en la pared de la caldera lo que permite realizar una sección rectangular del hogar; la profundidad queda limitada a la profundidad de penetración de la flama, pero el ancho del hogar puede elegirse de una dimensión mayor de acuerdo con el flujo de la caldera. En el caso, cuando la profundidad del hogar sea suficiente se pueden colocar quemadores frente a frente, uno en la pared frontal y otro en la pared posterior; cuando la profundidad del hogar es menor, se puede emplear una flama en forma de S colocando los quemadores en dos paredes y a dos niveles diferentes, *Fig. 11-2*

En el caso de calderas con sobrecalentadores, la modificación del grado de flama en el hogar representa una posibilidad importante de regular la temperatura de vapor sobrecalentado. La modificación de la flama en el hogar puede hacerse empleando quemadores de inclinación variable o quemadores a diferentes niveles en el hogar. En el caso de quemadores de inclinación variable cuando la inclinación es hacia abajo, la temperatura de salida de los gases del hogar es más baja que en el caso cuando la inclinación es hacia arriba. En la Fig. No. 11-3 se muestran esquemas con diferentes colocaciones de quemadores en donde puede observarse que en la parte inferior se tiene una forma de cono o embudo cuyo objetivo es el de recoger la escoria que se precipita, correspondiendo cerca del 15% de la ceniza total y el resto sale en los gases de combustión y se recogen en los filtros.

## 7.- PAREDES

### 3.- REGIMENES DE LIBERACION DE CALOR

El régimen de liberación de calor volumétrico en el hogar  $Cl_v$  de las calderas, en  $\text{kcal/m}^3\text{h}$ , de acuerdo con el tipo de combustible y método de quemado así como con el tipo de pared de agua es el siguiente:

combustible y método de quemado	paredes sólidas refractarias ( $\text{kcal/m}^3\text{h}$ )	paredes metálicas enfriadas con agua ( $\text{kcal/m}^3\text{h}$ )
carbón en parrillas	200 000	250 000
carbón pulverizado	150 000	200 000
aceite	200 000	300 000
gas	200 000	300 000

El volumen  $V$  del hogar, puede calcularse en la siguiente forma :

$$V = w_c \frac{PCS}{Cl_v} \text{ en m}^3$$

en donde :

$w_c$  = cantidad de combustible necesario para la capacidad de la caldera, en  $\text{kg/h}$

$PCS$  = poder calorífico superior del combustible, en  $\text{kcal/kg}$

$Cl_v$  = régimen de calor liberado volumétrico, en  $\text{kcal/m}^3\text{h}$  (tabla anterior)

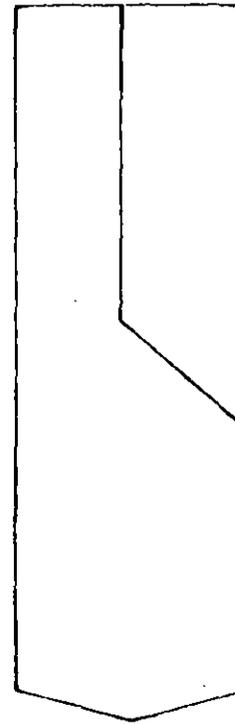
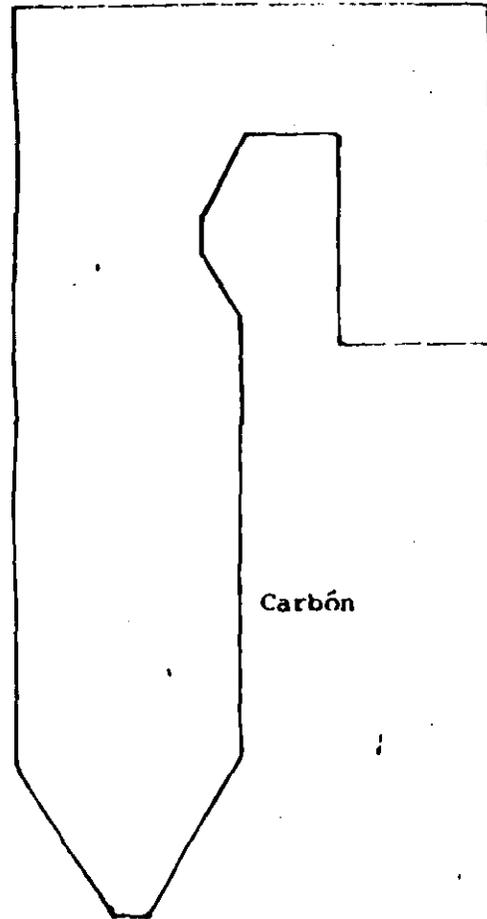
El régimen de liberación de calor superficial  $Cl_s$ , varía entre 210 000 y 250 000  $\text{kcal/m}^2\text{h}$ , con el cual se puede calcular la superficie del hogar  $S_h$ , de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_h = w_c \frac{PCS}{Cl_s} \text{ , en m}^2$$

#### Temperatura de salida de gases.

La temperatura de salida del hogar de los gases de combustión tiene mucha influencia sobre la seguridad y economía de operación de las calderas, pues si es muy alta las cenizas fundidas son arrastradas y se depositan en las superficies de convección, pero si es muy baja entonces se tienen problemas por combustión incompleta o inquemados; para combustibles normales esta temperatura varía entre  $950^\circ$  y  $1150^\circ$ , recomendándose en general que sea de  $50^\circ$  a  $100^\circ\text{C}$  inferior a la temperatura de fusión de las cenizas.

Con objeto de poder hacer una estimación apropiada de la temperatura del hogar, enseguida se da la correlación que existe con el color de los fuegos en el interior del hogar:



Régimen de liberación de calor en el hogar:  
120000 a 150000 kcal/m<sup>2</sup>h

2500000 a 300000 kcal/m<sup>3</sup>h

Fig. IV. 7.-COMPARACION DE TAMAÑOS DE CALDERAS DE ACUERDO CON EL COMBUSTIBLE USADO

rojo visible solamente en la obscuridad	500° C
rojo oscuro	700° C
rojo cereza obscuro	800° C
rojo cereza	900° C
rojo cereza claro	1000° C
naranja obscuro	1100° C
incandecente claro	1150° C
naranja claro	1200° C
blanco incandecente	1300° C
blanco deslumbrante	1400° C

*En la Fig. 4-5 se muestra la correlación de la temperatura de salida del hogar con la temperatura teórica de combustión, la transferencia de calor en kcal/m<sup>2</sup>h y el grado de integración del hogar*

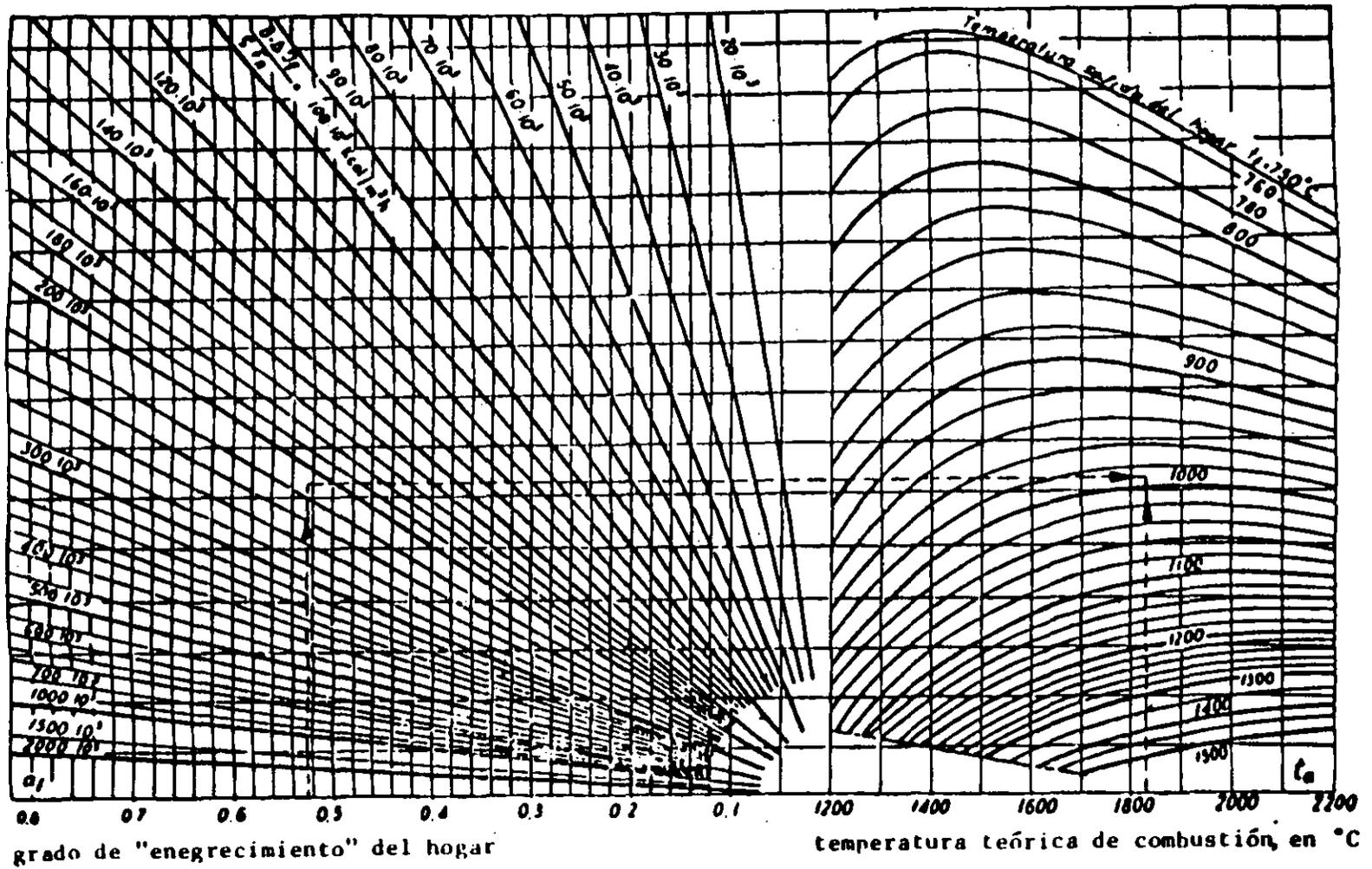
### LOS PROBLEMAS DE LAS CENIZAS

Los principales problemas que causan las cenizas son el desgaste de los tubos o superficies metálicas, corrosión y depósitos - que disminuyen la transferencia de calor y obstruyen el paso de gases. El término ceniza se aplica a los residuos que quedan - después de quemar combustible sólido como carbón, coque, madera, etc. y pueden ser: clinker, escoria o ceniza volante. El clinker es ceniza parcialmente fundida y después solidificada, la escoria es un material duro parecido al vidrio y las cenizas volantes son partículas de ceniza muy finas.

La temperatura a la cual las cenizas empiezan a fundirse y se hacen blandas, se conoce con el nombre de temperatura de fusión, transformándose en una sustancia parecida al alquitrán que se adhiere a cualquier cosa, siendo muy difícil de manejar; en términos generales, las temperaturas de fusión de las cenizas son las siguientes :

- de 980° a 1370° C si el % de hierro y cal ó calizas en las cenizas es alto
- de 1370° C a 1650° C si las cenizas contienen un % importante de alúmina y sílice.

La temperatura a la cual la ceniza está completamente fundida y fluye como un líquido, se conoce como temperatura fluida y entonces a la ceniza se le llama escoria fundida; en estas condiciones la ceniza fluye a la parte más baja del hogar en donde debe haber provisiones para removerla. Existen dos tipos de diseños básicos de fondos de hogares para remover las cenizas de acuerdo con su temperatura de fusión :



775 CALCULO DE LA TRANSMISION DE CALOR EN EL HOGAR



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

GENERADORES DE

VAPOR

TEMA 1

INSTRUMENTACION , CONTROL O REGULARIZACION Y

PROTECCION

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

CONDICION DE ALARMA O PELIGRO.	TIPO DE CALDERA.	S E N S O R	A C C I O N
Bajo suministro de agua.	Circ. Controlada  Circ. forzada	Switch presión dif. Switch de alto nivel o bajo nivel del domo. Switch baja temp. sobre calentado.	Disparo sumin. comb. Disparo o alarma  Disparo sumin. comb.
Alta temp. vapor	todos	Termocoples en líneas so-calent. y recalentado.	Alarma
Alta presión vapor	Todos	Valvs. de seguridad Switch alta presión	Relievar presión Disparo combustible
Pérdidas de aire	Tiro balanceado o forzado.	Switch aux. int. vent. Switch bajo flujo aire	Disparo sum. comb. Alarma o disparo sum. comb.
Condiciones suministro comb.	Gas  Aceite  Carbón	Baja o alta presión  Baja presión Baja temperatura Pérdida medio de atomización.  Detector flujo carbón	Disparo sum. comb.  Disparo sum. comb. Alarma Disparo sum. comb.  Alarma
Presión hogar	Todos	Switch de presión	Disparo sum. comb.
Pérdida estabil. flama.	Gas o aceite  Carbón	Detector de flama, espejos o TV caldera. Detector de flama, espejos o TV caldera.	Disparo sum. comb.  Disparo sum. comb.
Combustibles muy altos.	Gas, aceite o carbón.	Combustible y/o analizador O <sub>2</sub> (opcional) TV Chimenea (opcional) Detector de humos	Alarma  Alarma
Pérdida sum. energía control combustión.	Gas, aceite o carbón.	Relé bajo voltaje o baja presión aire.	Alarma
Calidad agua alimentación	Todos	Conductividad	Alarma
Combinación de los anteriores.	todos	Observación del operador	Disparo sum. comb.

TABLA XIII-1.- RESUMEN DE PROTECCIONES DE LA CALDERA

## X .- INSTRUMENTACION, CONTROL O REGULACION Y PROTECCION

Con objeto de efectuar un control y seguridad en el funcionamiento de Generador de Vapor o caldera, así como asegurar los parámetros del agente térmico (vapor o agua caliente) al usuario, se requiere incorporar a la caldera varios equipos o sistemas para apoyar al operador o efectuar por si mismos, control, disparos o ajustes automáticos de operación.

El presente capítulo será dividido en las siguientes partes:

- . Instrumentación
- . Control o Regulación
- . Protección

El equipo que comprende los sistemas anteriores puede ser clasificado en los siguientes grupos principales.

- . Indicadores, registradores (presión, temperatura, nivel, flujo, peraje).
- . Controladores (flujo, presión, temperatura, nivel, etc).
- . Sensores (temperatura, ambiente, calidad de gas, etc.)
- . Actuadores (varios tipos)
- . Alarmas (alta prioridad-emergencia, información)
- . Interbloqueos (permisivos)
- . Dispositivos de medición de flujo (combustóleo, agua, vapor, aire, gases de combustión).
- . Dispositivos de medición de calidad (gases de combustión, agua, vapor)

Los equipos anteriores, pueden tener en donde es aplicable, algunos auxiliares como switchs límite, switchs de flujo, elementos primarios, contactos múltiples, etc.

## 1.- INSTRUMENTACION

La instrumentación básica y más importante y sus funciones, son las siguientes:

### A.- Domo

- . Registradores de calidad del agua (pH, sílice, conductividad)
- . Indicador de nivel - 2 x remoto (opcional para bajo nivel).
- . Alarmas de nivel (bajo + disparo, alto + disparo)
- . Indicador de nivel (local)
- . Indicador de temperatura
- . Indicador de presión

### B.- Alimentación

- . Indicador de presión - 2 (uno antes del dispositivo de medición de flujo y otro después).
- . Indicador de temperatura - 2 (uno en el dispositivo de medición de flujo y otro antes de la entrada al economizador).
- . Registrador de flujo
- . Indicador de flujo
- . Indicador de posición de las válvulas en la línea de recirculación al economizador.
- . Indicador de temperatura en el cabezal de vapor saturado
- . Indicador de temperatura entre etapas de sobrecalentado - 2 (uno antes del atemperador y otro después).

### C.- Salida Principal de Vapor

- . Alarma de temperatura
- . Indicador de temperatura
- . Indicador de presión
- . Registrador de temperatura

- . Indicador de diferencial de presión opcional (del cabezal principal de vapor al cabezal de entrada).

#### D.- Vapor Recalentado

- . Recalentado frío
  - alarma de temperatura
  - indicador de temperatura
  - registrador de temperatura (con rociador de atemperador se requieren 2).
- . Recalentado caliente
  - alarma de temperatura
  - registrador de temperatura
  - indicador de presión

#### E.- Paso de Gases de Hogar a Economizador

- . Indicador de presión de hogar (arriba de quemadores)
- . Alarma de presión de hogar
- . Indicador de presión de gas a la entrada del economizador
- . Indicador de presión de gas a la salida del economizador
- . Alarma por bajo flujo de gas en el hogar, por ejemplo: menos de 30 ó 35% del nominal (o alarma por aire total a la caldera al mínimo).
- . Indicador de temperatura de gases a la salida del economizador
- . Registrador y analizador de calidad de gas a la salida del economizador (analizador de  $O_2$ ).

#### F.- Precalentador de Aire (regenerativo y de vapor)

- . Indicador de temperatura de salida de aire
- . . . . . Indicador de presión de salida de aire

- . Diferencial de presión (aire a lado de gases), diferencial total de presión o diferencial del lado de aire (salida de aire).
- . Indicador de temperatura (combinado con alarma contra incendio) de la salida de gases.
- . Registrador de calidad de gases (analizador de  $O_2$ ) de la salida de gases.

#### G.- Cajas de Aire

- . Indicador de presión
- . Indicador de temperatura
- . Indicador de flujo
- . Dispositivo de medición de flujo
- . Indicadores de posición de componentes o registros de aire

#### H.- Sistema de Carbón Pulverizado

- . Alarma de nivel de silo principal
- . Indicador de velocidad de alimentación de carbón
- . Indicador de flujo de carbón (en el alimentador)
- . Registrador de flujo de carbón en el alimentador (velocidad de flujo + paro total).
- . Amperaje del motor del alimentador de carbón
- . Indicador de temperatura de aire (PA) a la entrada del pulverizador
- . Indicador de presión de aire (PA) a la entrada del pulverizador
- . Indicador de diferencial de presión a través del molino
- . Indicador de temperatura del aire (PF) a la salida del pulverizador
- . Alarma de temperatura del aire (PF) a la salida del pulverizador
- . Amperaje del motor del pulverizador
- . Indicador de temperatura del cojinete del motor del pulverizador
- . Alarma del cojinete del motor del pulverizador
- . Indicador de la posición de las compuertas de la entrada de aire y frío y caliente al pulverizador.

- . Alarma opcional de las compuertas de entrada de aire frfo y caliente al pulverizador.
- . Indicador de posición de las compuertas de cierre del pulveriz
- . Indicador de presión del sistema de carga de gas y/o aire del pulverizador.
- . Alarma de presión del sistema de carga de gas y/o aire del pulverizador.
- . Indicador de presión de aceite lubricante del pulverizador
- . Alarma de baja presión de aceite lubricante del pulverizador
- . Alarma de alta temperatura de aceite lubricante del pulverizador.
- . Indicador de presión de aire de sellos del pulverizador
- . Alarma de presión de aire de sellos del pulverizador
- . Indicador de presión diferencial aire al pulverizador/aire de sellos
- . Indicador de posición de válvulas PF
- . Indicador de flujo de agua de enfriamiento de aceite lubricante del pulverizador (local).

1.- Ventiladores Principales (recirculación de gas, pulverizador, tiro forzado y tiro inducido).

- . Amperaje de los motores de ventiladores
- . Indicadores de temperatura de los cojinetes de motores y ventiladores.
- . Alarmas de temperatura de cojinetes de motores y ventiladores
- . Indicadores de posición de componentes o persianas de entrada y salida de ventiladores.
- . Indicador de temperatura de entrada al ventilador de tiro forzado
- . Indicador de temperatura de entrada de aire al ventilador del pulverizador.
- . Indicador de temperatura de entrada al ventilador de tiro inducido
- . Indicador de presión de entrada al ventilador de tiro inducido
- . Indicador de presión de salida del ventilador de tiro forzado
- . Indicador de temperatura de salida del ventilador de tiro forzado
- . Indicador de presión de salida del ventilador del pulverizador

## J.- Precipitador Electrostático

- . Indicador de presión de entrada de gases
- . Amperaje (intensidad de campo) del transformador del rectificador
- . Indicador de presión diferencial a través del precipitador
- . Alarma de nivel de las tolvas de cenizas

## K.- Chimenea

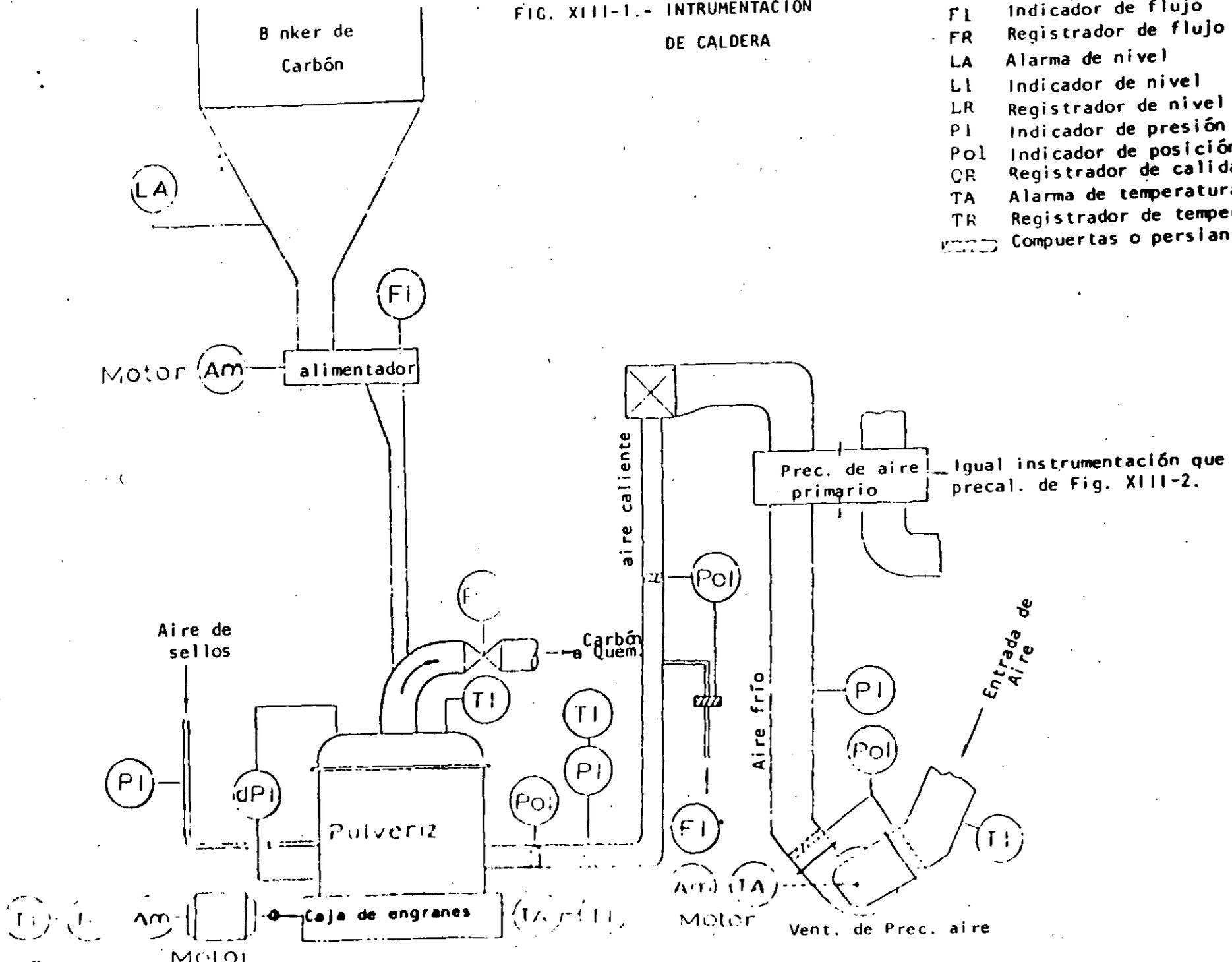
- . Registrador de la calidad de la densidad del humo
- . Registrador de la calidad de la densidad del polvo

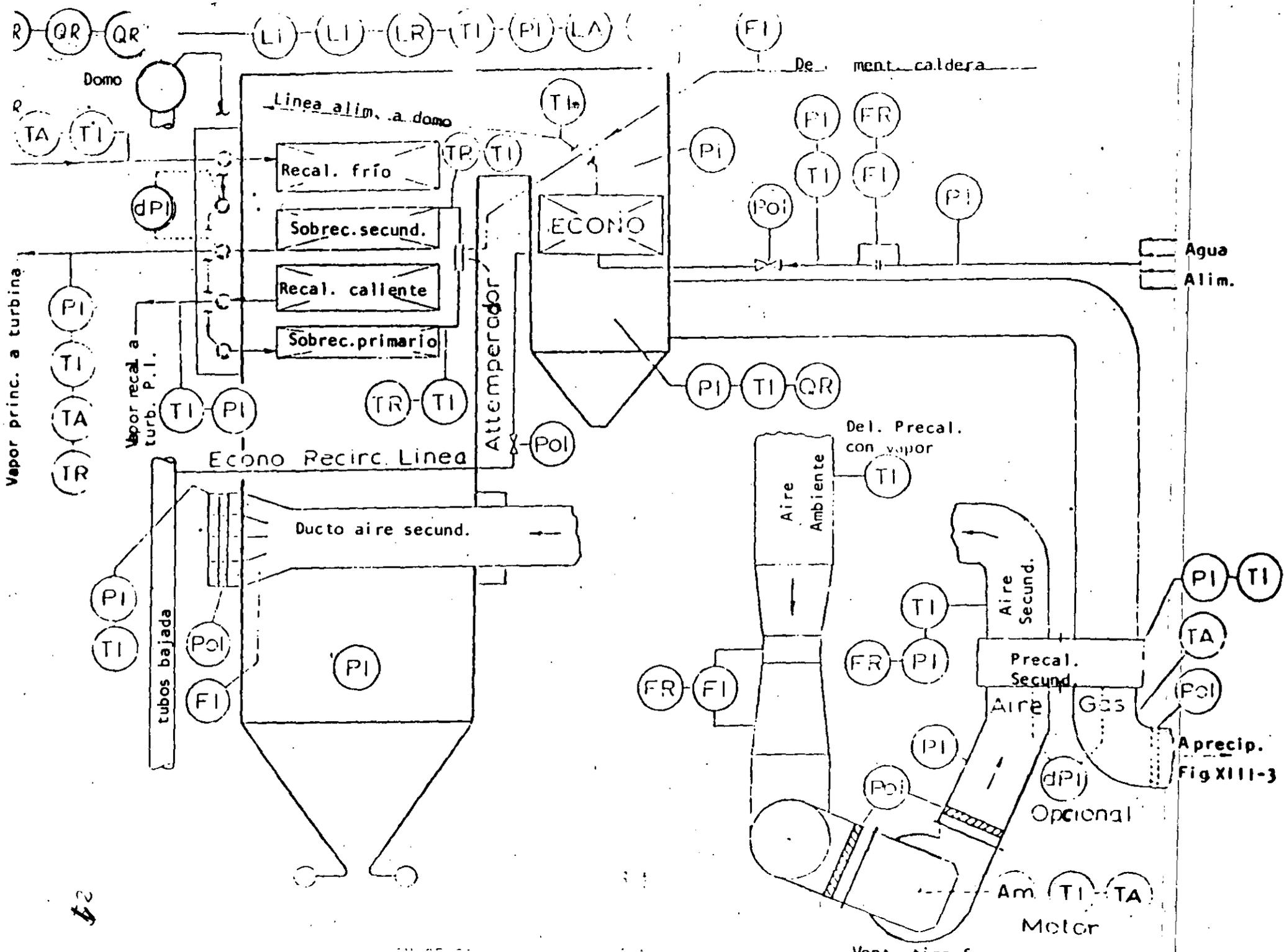
En las figuras XIII-1, 2 y 3 se muestra la localización de algunos de los anteriores instrumentos. Las señales de las mediciones y las alarmas pueden ir a la sala de control central, a tableros locales o bien indicar la medición directamente en el equipo; en un Generador de Vapor de 300 a 500 MW se emplean más de 600 canales de señales, distribuidas aproximadamente como sigue:

	SALA CONTROL	LOCAL
Temperatura	150	70
Presión	12	12
Tiro	40	6
Flujo	12	6
Nivel	2	6
Velocidad	14	-
Control de Quemadores	24 a 40	24 a 40
Ampermetros y Voltmetros	60	4
Posición de Compuertas y Válvulas	80	-
	SALA CONTROL	LOCAL
Analizadores	5	-
TV	3	-
Estaciones de control autom.	hasta 60	-
	<u>542</u>	<u>128 a 140</u>

FIG. XIII-1.- INSTRUMENTACION DE CALDERA

- Am Ampermetro
- dPI Indic. presión diferenc.
- FI Indicador de flujo
- FR Registrador de flujo
- LA Alarma de nivel
- Ll Indicador de nivel
- LR Registrador de nivel
- PI Indicador de presión
- Pol Indicador de posición
- CR Registrador de calidad
- TA Alarma de temperatura
- TR Registrador de temperatura
- Compuertas o persianas





Aprecip. Fig XIII-3

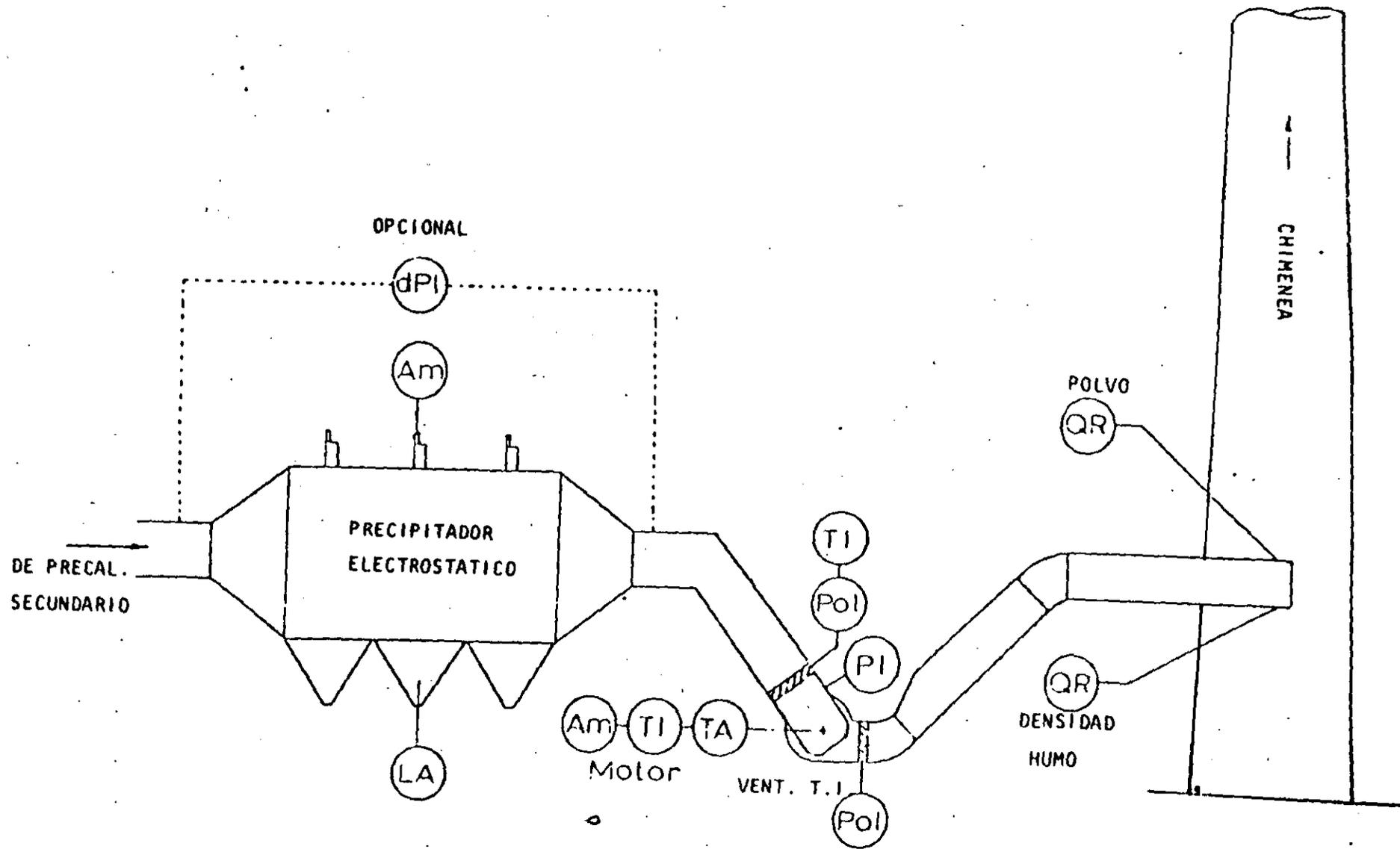


FIG. XIII-3.- INSTRUMENTACION CALDERA

La selección y localización apropiada de la instrumentación es un problema de especialistas en este campo.

## 2.- CONTROL O REGULACION (AUTOMATIZACION)

La instalación de automatización, tiene el objeto de efectuar la regulación sobre un cierto número de medidas regulables de la caldera:

- . Flujo de combustible
- . Flujo de aire
- . Flujo de gases de combustión evacuados
- . Flujo de agua
- . Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado en su caso)

De éstas medidas regulables, tienen una correlación directa las siguientes:

- . Flujo de combustible
- . Flujo de aire
- . Flujo de gases de combustión

Las medidas regulables independientes son:

- . Flujo de agua (con relación al nivel de agua establecido en el domo,
- . Temperatura de vapor sobrecalentado (y recalentado)

### REGULACION DEL FLUJO DE AGUA

La regulación del flujo de agua se efectúa por una instalación de automatización de accionamiento mecánico cuando es de un solo elemento, y con energía auxiliar cuando es de dos o tres elementos.

La instalación más simple de regulación es la instalación de flotador mostrada en la Fig. XIII- , que está compuesta de un flotador (1) que acciona un brazo curvo (2) destinado a transformar el movimiento de traslación en movimiento de rotación alrededor de un eje; la transformación en movimiento de rotación es necesaria debido a que un eje que gira puede ser sellado más fácilmente que un eje con movimiento de traslación. A continuación, un brazo exterior (3) transmite el impulso por una banda metálica (4) a la válvula principal de regulación del flujo de agua que alimenta al domo; la elevación del flotador hace que la válvula de agua cierre, disminuyendo el flujo y el nivel en el domo baja.

En calderas más grandes con menor reserva de agua, en que el retraso en la ejecución de la regulación de nivel puede producir fluctuaciones mayores de nivel con la acción de un solo elemento, se utilizan sistemas de automatización de dos o tres elementos.

Si la automatización es de dos elementos, entonces uno de los impulsos es del nivel de agua en el domo, y el segundo impulso auxiliar está dado por el flujo medido de vapor sobrecalentado; así, una variación en el flujo de vapor antes de que se produzca una caída de nivel de agua en el domo, aparece como un impulso de modificación del flujo de agua de alimentación, impulso corregido permanentemente por la señal del nivel de agua en el domo. (Fig. XIII-5)

En el caso de calderas con muy poca reserva de agua, se utiliza un esquema de automatización del nivel de agua en el domo de tres elementos o impulsos; en este caso, el tercer impulso suplementario está dado por el propio flujo de agua de alimentación y constituye la señal de corrección a los otros dos impulsos para reducir el retraso de accionamiento y estabilizar el sistema. (Fig. XIII-7)

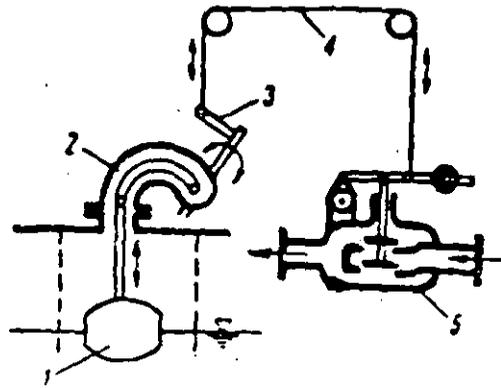


FIG. XIII-4.- CONTROL DE NIVEL SIMPLE

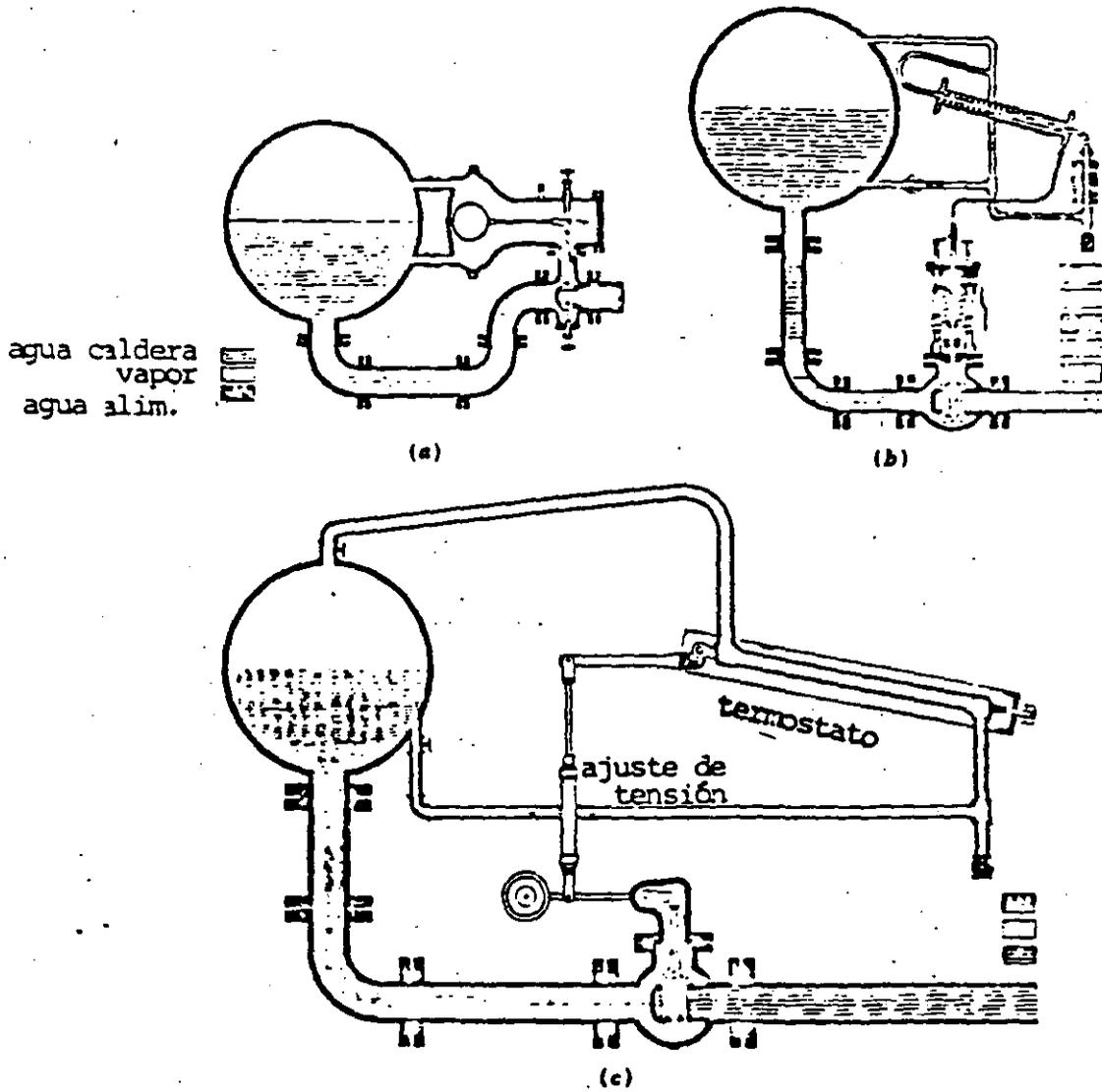


FIG. XIII-5\_ TIPOS DE CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACION DE UN ELECTROVALVULA

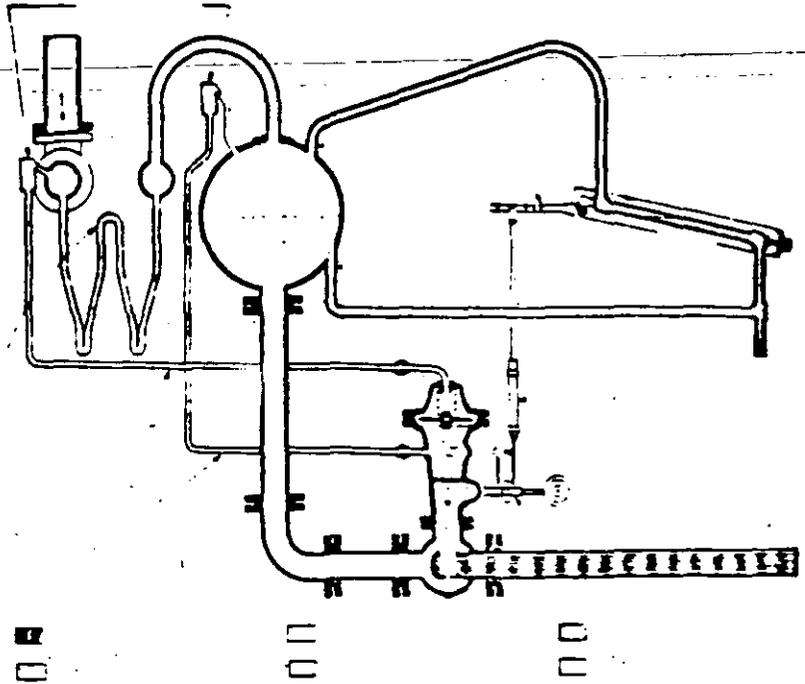


FIG. XIII-6.- CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACION DE DOS ELEMENTOS

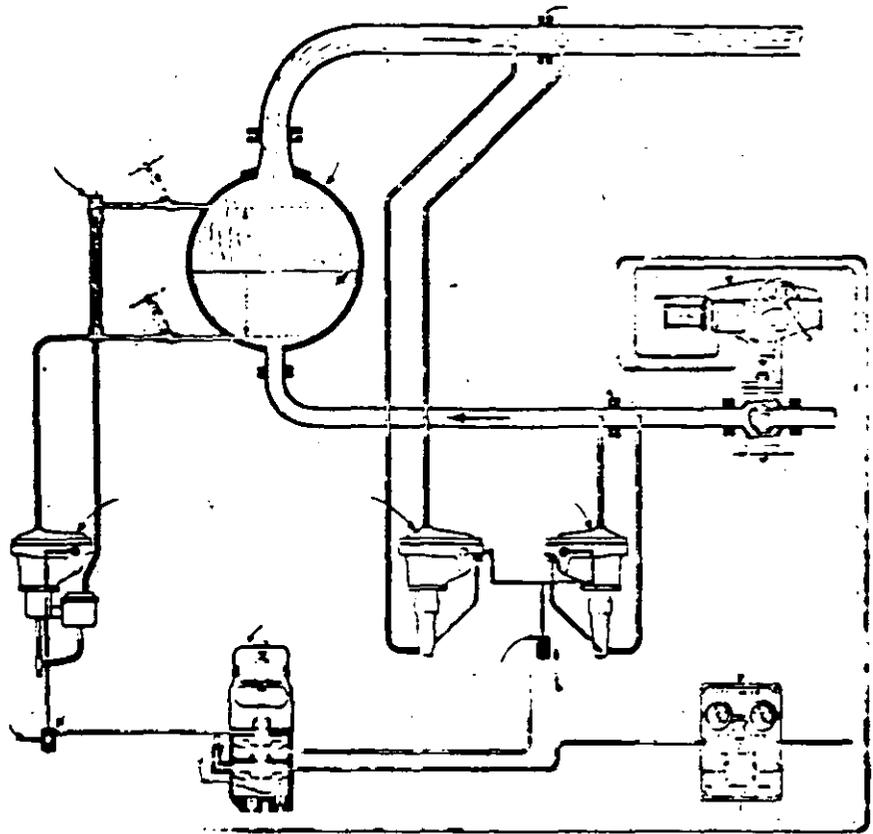


FIG. XIII-7.- diagrama de control de nivel de tres elementos

## REGULACION DE COMBUSTION

La regulación de combustión comprende la regulación de alimentación combustible, alimentación de aire y la evacuación de gases de combustión (en calderas de tiro balanceado) para mantener una depresión normal en el hogar; éstas tres medidas regulables se correlacionan entre ellas y en forma conjunta determinan la carga de funcionamiento de la caldera. La regulación de éstas tres medidas se hace con un bloque de automatización, que en cada sistema de regulación (hidráulico, neumático, eléctrico o electrónico), está formado por los siguientes elementos principales:

- . Un captador o sensor que es un transductor del impulso sobre la dimensión medida.
- . Un relevador que recibe el comando del sensor y produce una variación de cierto sentido de energía de accionamiento.
- . Un servomotor que recibe energía dentro de un cierto sentido del relevador, transformándolo en energía mecánica (trabajo mecánico de comando).
- . Un órgano o elemento de comando que acciona directamente sobre el flujo de alimentación.

En ciertos bloques de automatización, puede ser necesario un órgano suplementario llamado relevador de correlación; éste relevador es comandado simultáneamente por dos medidas, de dos captadores o sensores, asegurando la correlación entre ellos. Los relevadores de correlación se emplean cuando entre dos medidas regulables debe existir una cierta relación permanente; éste es el caso del flujo de aire y el flujo de combustible, que deben estar siempre dentro de una relación fija para mantener el exceso de aire prescrito.

Otro órgano que puede intervenir en los componentes del bloque de automatización es el relevador de reajuste; este relevador es necesario -

cuando el tiempo de respuesta al equipo frente al impulso recibido tiene un cierto valor relativamente grande. En éste caso, la acción hecha se percibe en la variación del parámetro regulable con un retraso relativamente grande, y en consecuencia es necesario efectuar una primera acción con un relevador de reajuste en posición inicial de relevador de comando, antes de que se produzca la respuesta con retraso del parámetro regulable.

En la figura XIII-8 se muestra un esquema de automatización de combustión de una caldera, observándose los tres bloques de regulación de combustión:

- . Combustible
- . Aire
- . Tiro

Debido a que entre todos estos elementos debe existir una cierta proporcionalidad, el impulso principal es recibido del regulador principal de la caldera; el regulador principal, es un transductor de presión montado en el conducto que conduce el vapor al usuario. Siendo el flujo de vapor suministrado al usuario el elemento final regulado, es evidente que la presión del vapor debe mantenerse constante; por lo demás la presión del vapor suministrado es un parámetro que responde primero en el caso de la existencia de una no-concordancia entre el flujo de la caldera y el flujo suministrado al usuario.

El regulador principal transmite un impulso al bloque de combustible; este impulso es recibido por el sensor o captador y transmitido al relevador que acciona el servomotor. El servomotor acciona directamente, por un sistema mecánico, sobre el dispositivo de alimentación.

La modificación de la alimentación de combustible no puede percibirse inmediatamente en la forma de aumento de presión en la tubería de vapor, sin embargo para que el comando de aumento a la alimentación no pueda tener una duración larga y en consecuencia el sistema de automatización entre en penduleo no-amortiguado, un relevador de reajuste - da el comando de paro a una acción del relevador cuando el flujo de combustible aumenta. El relevador de reajuste está comandado por el mismo valor del flujo de combustible por medio de un captador o sensor en el medidor de flujo.

Al mismo tiempo, el regulador principal comanda al bloque de alimentación de aire; el bloque de aire recibe el impulso en el sensor o captador y lo transmite al relevador que acciona el servomotor. El servomotor cierra o abre las persianas o compuertas de entrada de aire, modificando la cantidad de flujo de aire inyectado, pero como en esta automatización se tiene un retraso en la respuesta relativamente grande, se necesita un relevador de reajuste; este relevador está comandado por una medición del flujo de aire suministrado por el ventilador, acostubrándose medir el flujo de aire por la caída de presión través del precalentador de aire ( $p_{pa}$ ). Una vez que por la variación del flujo de aire el relevador de reajuste para la acción del servomotor, se suspende de este modo el impulso.

Existe la posibilidad que entre el bloque de combustible y el bloque de aire se tenga un enlace directo por medio de un relevador de correlación; este es un tercer impulso utilizado para mantener la proporcionalidad entre el flujo de combustible y aire. Este impulso suplementario de correlación puede obtenerse por la medición automática de un parámetro de composición de los gases de combustión ( $CO_2$  o también  $O_2$ ); éste parámetro puede dar el comando suplementario al bloque de aire para realizar la proporcionalidad aire - combustible.

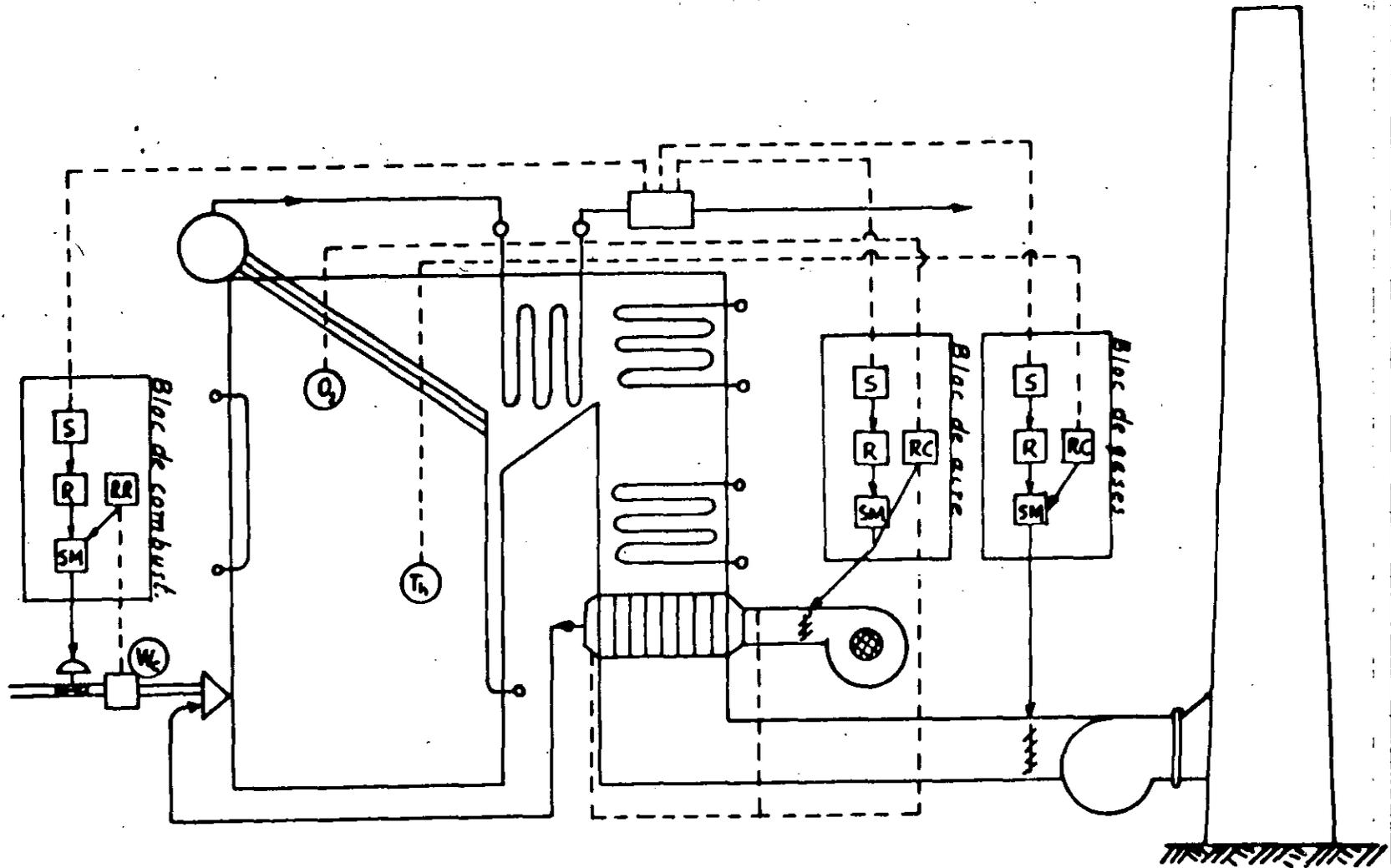


FIG. XIII-8.- ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTION DE UNA CALDERA

por sobrecalentado, este intervalo de tiempo debe ser igual con el retraso realizado por el relevador de retraso, respecto al tiempo de diferente calentamiento del termopar aislado y el no aislado de este relevador.

En la Fig. XIII-9 se muestran las características de las temperaturas de vapor en un Generador de Vapor.

El regulador principal acciona un tercer bloque; el bloque de regulación de depresión en el hogar. Por medio de un sensor, un relevador y un servomotor, se comanda a las persianas o compuertas de regulación instaladas en la sección del ventilador de tiro inducido; ésta variable, es la depresión en el hogar debida a la variación del flujo de gases evacuados de la instalación. El bloque de tiro, tiene una respuesta rápida y en consecuencia no es necesario un impulso de corrección que se tome del elemento regulado, la medición de la depresión en el hogar; de ésta medida, un sensor o captador introduce el impulso tomado. Cada desajuste en la depresión normal en el hogar, comanda al flujo de gases evacuados de la instalación, aunque el regulador principal no entre en acción.

#### REGULACION DE TEMPERATURA DE VAPOR

Un bloque de regulación separado es el bloque de regulación de temperatura de vapor sobrecalentado; la temperatura de vapor se regula por un sistema de impulsos múltiples. El impulso principal está tomado de la misma temperatura final del vapor.

Como en algunos casos la acción del regulador es demasiado lenta y aparecen algunas crestas en la temperatura de vapor sobrecalentado, se puede tomar un impulso anticipado, por ejemplo, entre la primera y la segunda etapa del sobrecalentador. El segundo impulso está dado por el flujo de la caldera, existiendo una cierta correlación con la corrección de temperatura que debe hacerse a la temperatura final y el flujo de la caldera. Finalmente, un tercer elemento de impulso es un relevador con retraso, formado por la tensión de desequilibrio que se genera entre un termopar aislado y otro sin aislar térmicamente, introducido en la corriente de vapor. El servomotor en este bloque, comanda el flujo de agua o vapor saturado inyectado en el vapor sobrecalentado para mantener constante la temperatura; si existe retraso entre el momento de inyección del fluido de enfriamiento y la respuesta de temperatura de va-

#### 4.- PROTECCION DE LA CALDERA

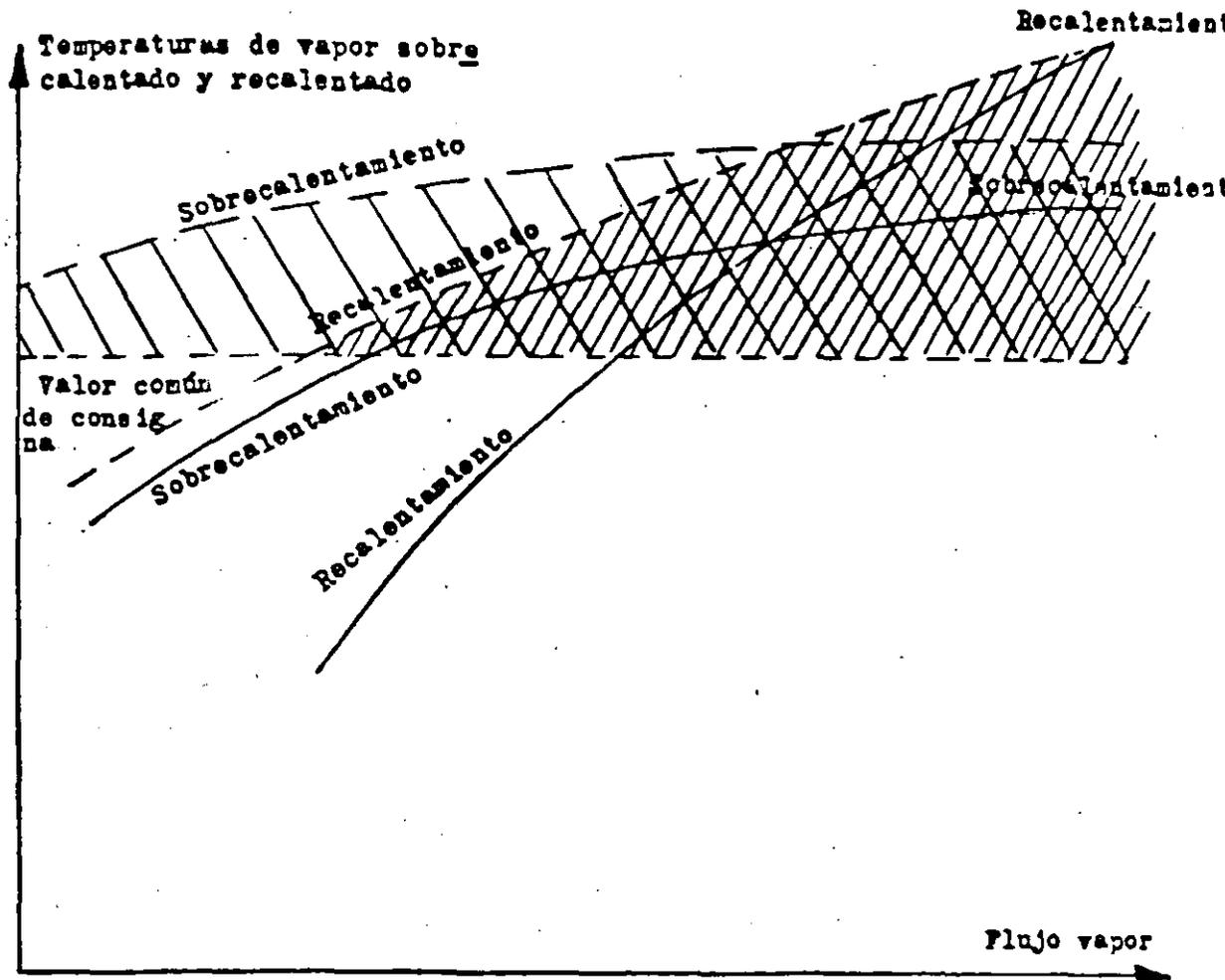
Hay muchos criterios para integrar un sistema de protección, con excepción de los casos de plantas paquetes en los que un diseño se aplica a varias unidades idénticas, cada caldera es un problema particular; debido a esto y a las limitaciones impuestas para el presente trabajo, no se discutirán dichos criterios y solamente se concentrará a exponer los sistemas adoptados, para calderas de fuerza.

Cualquiera que sea el arreglo del sistema de protección, la acción final de éste será impedir que abran las válvulas de suministro de combustible a la caldera durante la fase de arranque o cerrarlas cuando la unidad está en operación al detectar una condición anormal tal como: secuencia inadecuada del sistema, mala relación o mezcla de aire combustible, falla de equipo auxiliar relacionado, condiciones desfavorables en el circuito combustible, aire, gases de combustión, etc.

COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE PROTECCION. - Para efectuar lo anterior el sistema de protección incluye básicamente: Bloqueos, elementos detectores de condiciones anormales y elementos finales.

BLOQUEOS. - (Interlocks); su función es evitar maniobras equivocadas, que pueden conducir a una condición peligrosa, y establecer una secuencia lógica de operación. Entre otros, un sistema de protección incluye los siguientes:

- a.- Interruptor de flujo de aire y relevador de tiempo para computar el flujo de aire y evitar que el encendido se inicie antes de establecer el mínimo requerido para el barrido.
- b.- Interruptores límite, que verifican la posición (abierta o cerrada) de las válvulas que manejan el combustible, las compuertas de ventiladores y registros de quemadores.
- c.- Un relevador para verificar el voltaje de corriente directa al sistema o alterna en el circuito de detección de flama.



- Característica natural de la caldera (depende de la disposición de los haces)
- Característica obtenida por recirculación de los gases
- //// Acción del desobrecalentamiento del sobrecalentado
- //// Acción del desobrecalentamiento del recalentado

FIG. XIII-9.- CARACTERÍSTICAS DE LAS TEMPERATURAS DE VAPOR

OTROS FACTORES A CONSIDERAR.- Es obvio que aún cuando se planee e Int correctamente un sistema de protección, no es aconsejable confiar completa mente la seguridad de una caldera a los dispositivos que lo integran; par te de esa seguridad está condicionada a los siguientes factores, necesari os en una planta:

UN MEDIO AMBIENTE ADECUADO QUE PERMITA TOMAR DECISIONES Y ACCIONES CORREC TIVAS.- Esto se refiere a que el personal tenga la suficiente comprensión acerca de los procedimientos seguros de operación. Que no esté sujeto a esfuerzos psicológicos o sobre cargas irrazonables, ocasionados por facto res inherentes en la configuración del diseño de la planta. Falta de coor dinación funcional de los varios componentes del sistema generador de va por y sus auxiliares, etc.

UN ALTO NIVEL DE COMPETENCIA TECNICA Y DE OPERACION EN EL PERSONAL Y ORGA NIZACION DE LA PLANTA.- Con la creciente complejidad de las unidades gene radoras de vapor, no puede suponerse que equipo correctamente diseñado y con sistema de seguridad modernos, sean suficientes para garantizar la operación segura de una caldera, es necesario además un alto nivel de com petencia técnica en la operación de la planta.

SISTEMAS MODERNOS DE CONTROL DE COMBUSTION.- A los que pueda darse mante nimiento estando en servicio y efectuándose revisiones sin que disminuya su confiabilidad. Es de fundamental importancia valuar y planear adecuada mente la integración óptima de los equipos manuales o automáticos.

UN SISTEMA MODERNO DE ALARMAS.- Para dar información adelantada sobre se terminadas situaciones de operación antes de que se origine una función automática de disparo.

ASEGURAR LA CONTINUIDAD DE OPERACION DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COM BUSTIBLE.- Puesto que las interrupciones en la alimentación de combusti ble, han contribuido a un buen número de explosiones, en el diseño del sistema de combustible se tendrán en consideración para evitarlas y en el sistema de protección se tomarán las provisiones necesarias para que se actúe correctamente en caso de ocurrencia.

d.- ~~Interruptores de presión, para verificar que las presiones en el sistema de tuberías de combustible y vapor a quemadores, sea normal.~~

DISPOSITIVOS DETECTORES.- Que sean sensibles a condiciones anormales durante la operación. (Disparos).

a.- Interruptores de presión, en los sistemas de combustible y vapor a quemadores, suministro de aire a instrumentos, y presión en el horno de la caldera.

b.- Analizadores de oxígeno y combustible no quemado.

c.- Contactos auxiliares que indiquen la posición (arranque o paro) de los interruptores de los ventiladores, de tiro forzado y tiro inducido.

d.- Dispositivos que indiquen si la turbina está girando en vacío o con carga. (Si al girar en vacío la caldera no se encuentra operando a fuego mínimo, se tendrá una señal de "disparo").

e.- Celdas detectoras de flama.

f.- Una medición e interruptor de flujo de aire que operará al tenerse un valor de flujo inferior al mínimo establecido (durante el arranque o en cargas bajas).

ELEMENTOS FINALES.- Que interrumpen el suministro de combustible a quemadores para prevenir o en ciertos casos limitar las explosiones en los hornos.

a.- Válvulas de cierre rápido, individuales para cada quemador, y en los cabezales de combustible a quemadores y pilotos y como respaldo a válvulas de venteo en los mismos cabezales.

b.- Servo motores, para actuar las compuertas de ventiladores y registros de quemadores.

c.- Válvulas selenoides, individuales para cada quemador y en los cabezales de combustible a quemadores.

SISTEMAS DE ENCENDIDO. - Bien diseñado incluyendo pilotos de operación, pacidad y localización correctas, programador y dispositivo para limitar el tipo de prueba de encendido, etc.

En la tabla XIII-1 se muestra un resumen de las protecciones de una caldera.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA

GENERADORES DE

VAPOR

TEMA 2

TRATAMIENTO QUIMICO Y MUESTREO

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

DOSIFICACION QUIMICA PARA CONTROL DEL CICLO AGUA-VAPOR

Para evitar que se presenten los daños por impurezas

es necesario llevar un control del ciclo a base de dosificación química y análisis, para mantener las concentraciones de las impurezas mencionadas, dentro de los límites de control requeridos para cada unidad dependiendo de sus condiciones de operación.

El tratamiento químico del ciclo se puede dividir en dos:

- A) TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE CALDERA Y
- B) TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION

A).- TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE CALDERA.

Existen varios tipos de tratamiento para el agua de caldera.

1.- CONTROL POR FOSFATOS:

Para evitar que las sales de calcio y magnesio formen una incrustación en la caldera, el tratamiento interno, deberá precipitarlos como lodos, manteniéndose este lodo en forma fluida para eliminarlos mediante purgas. La eliminación del calcio se considera más problemática que la del magnesio ya que este es rápidamente precipitado por la alcalinidad del agua de caldera formando hidróxido de magnesio. La sustancia química más comúnmente usada para la precipitación de las sales solubles de calcio son, los fosfatos, éstos reaccionan con el calcio para formar fosfato tricálcico que es un lodo no adherente. Para que ésta reacción tenga lugar, deberá existir suficiente alcalinidad en el agua de caldera para mantener un P.H. superior a 9.5 y asegurar la precipitación del fosfato tricálcico, los fosfatos mono y dicálcico son precipitados adherentes difíciles de eliminar por la purga.

La dosificación del fosfato, se debe efectuar directamente al domo superior, ya que por la rápida reacción con el calcio, si se dosifica en la línea de agua de alimentación, pueden ocasionar precipitados y depósitos en tuberías y válvulas, que puedan obstruir el flujo o la operación de los equipos de control.

La dosificación de fosfatos no es continua, sino que se dosifican de manera tal, que siempre se mantenga un residual de  $PO_4$  dentro de ciertos límites.

a).- Tratamiento Caústico:

Se controla el PH para prevenir la formación de incrustación mediante la inyección de sosa caústica y fosfato trisódico. Este tratamiento generalmente se utiliza en calderas de baja presión ya que el NaOH puede causar severos problemas de corrosión caústica en calderas de alta presión.

b).- Control Coordinado P.H.-fosfatos.

Utilizado en unidades operando a una presión de 600 psig. en adelante. con el objeto de reducir al mínimo la corrosión caústica.

Se ajustan las características del agua de caldera de tal manera que se tenga una relación fosfato-álcali aproximado a la hidrólisis estequiométrica del fosfato trisódico. Se selecciona el fosfato a dosificar de tal manera que al adicionar el fosfato el P.H. se mantenga abajo de la curva en la gráfica P.H.- $PO_4$  (ver figura N°. II-1). De esta manera no existirá hidróxido de sodio libre, entendiéndose por hidróxido de sodio libre la cantidad de NaOH en solución en exceso derivada de la hidrólisis del fosfato trisódico de acuerdo con la siguiente ecuación:

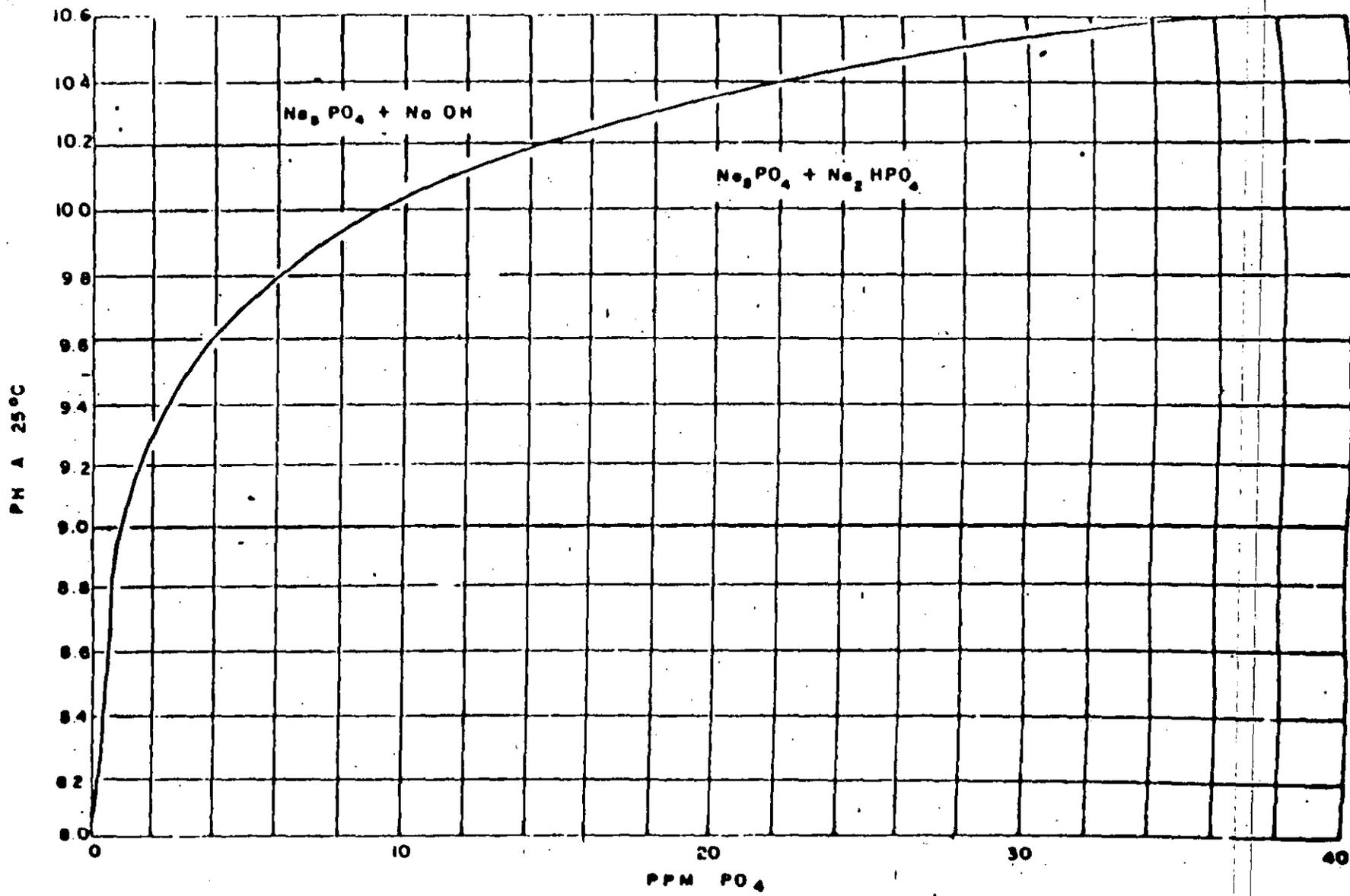


FIG. No. II - 1  
 CURVA PARA EL CONTROL COORDINADO DE FOSFATOS - PH, NIVEL BAJO PARA USO EN CALDERAS DE ALTA PRESION

21 5



c).- Control Congruente: La corrosión caústica se ha llegado a presentar aún cuando se observe estrictamente el control coordinado de PH-fosfatos.

Se han propuesto varias explicaciones a ello y la más aceptable establece que al precipitar el fosfato de una solución sobresaturada, no lo hace exclusivamente como fosfato trisódico sino como fosfato trisódico y disódico con el resultado de que el agua de caldera contendrá un exceso de hidróxido de sodio libre.

Las composiciones congruentes, aquellas en las cuales la fase sólida es igual a la fase líquida, corresponden a las relaciones molares de sodio fosfatos de 2.65 a 688°F y de 2.85 a 572°F. Se prefiere mantener la relación Na a  $\text{P}_2\text{O}_5$  debajo de 2.6.

Dependiendo de los contaminantes que entren a la caldera se puede mantener el control entre estos límites por adición adecuada de los diferentes tipos de fosfatos.

La relación entre la razón de mezcla de fosfato disódico y fosfato trisódico y la razón molar Na  $\text{P}_2\text{O}_5$  se muestra en la siguiente tabla.

No.	RAZON DE MEZCLA		RAZON MOLAR Na/ $\text{P}_2\text{O}_5$
	$\text{Na}_3\text{PO}_4$	$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	
1	1.0	0	3/1
2	0.9	0.1	2.9/1
3	0.8	0.2	2.8/1
4	0.7	0.3	2.7/1
5	0.6	0.4	2.6/1
6	0.5	0.5	2.5/1
7	0.4	0.6	2.4/1

FIG II-2

La Fig. N° II-3 muestra la curva de control congruente  $\text{PH-PO}_4 \text{ Na/PO}_4$ . En ella se tienen los valores de P.H. en función de la concentración de fosfato para diferentes relaciones molares de  $\text{Na/PO}_4$ .

Este tipo de control es utilizado en calderas que operan a presiones superiores a 1500 psig.

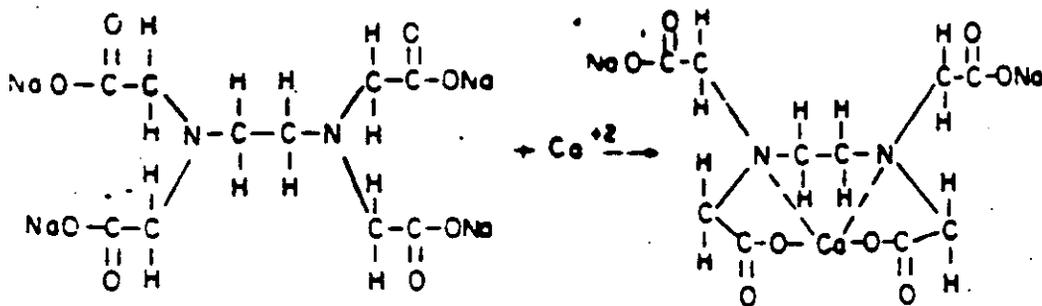
2.- Tratamiento Volátil: Es el control de P.H. del agua de caldera mediante productos volátiles tales como la hidrazina, amoniaco, morfolina y ciclohexilamina).

Este tipo de tratamientos son recomendados para calderas que operan a presiones hasta de 2400 psig. donde el fenómeno de hide-out (enmascaramiento) de fosfatos ocurre algunas veces.

Sin embargo el control congruente de fosfatos debe ser usado en el caso de posibles incrementos de dureza del agua de alimentación por fugas del condensador.

### 3.- CONTROL POR QUELATOS:

Los quelatos reaccionan con los cationes divalentes y trivalentes para formar compuestos solubles complejos que son estables térmicamente. los quelatos más comúnmente utilizados con este fin, son sales del ácido etilendiaminotetracético (EDTA) y del ácido nitrilotriacético (NTA). Su reacción con el calcio se muestra a continuación.



REACCION DEL EDTA CON EL CALCIO

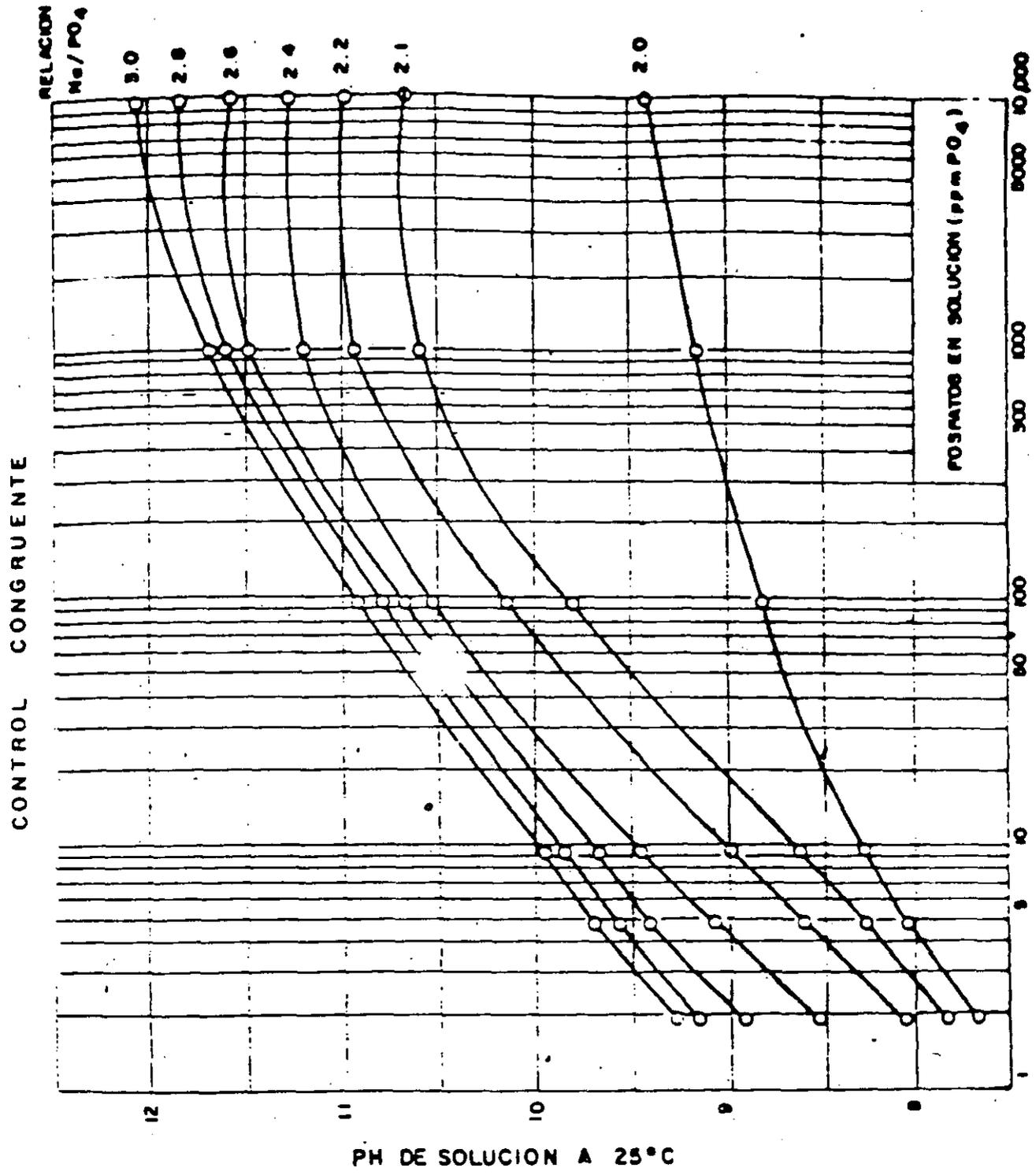
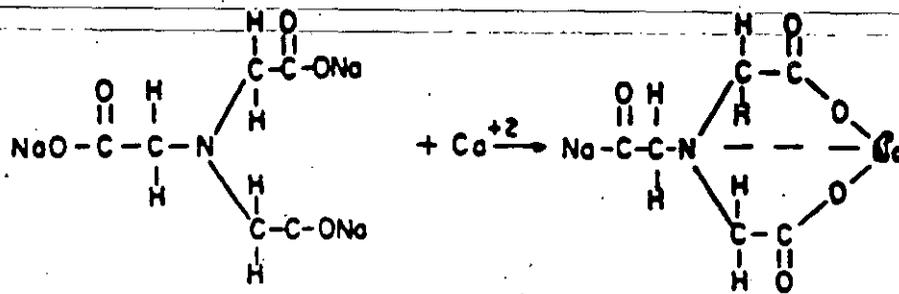


FIG. II-3



#### REACCION DEL NTA CON EL CALCIO

Ambos quelatos se descomponen a temperaturas altas. Generalmente el NTA se emplea en calderas con presiones inferiores a 900 psig. mientras que el EDTA se emplea hasta 1200 psig. Los fosfatos constituyen un tratamiento por precipitación, mientras que los quelatos lo constituyen por solubilización.

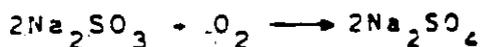
#### B).- TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION.

Este se efectúa con la finalidad de eliminar principalmente el oxígeno que trae consigo. La presencia de este oxígeno ya en la caldera, ocasionará la corrosión por picaduras. Aparte este oxígeno puede favorecer otros tipos de corrosión como la corrosión de cobre por amoníaco. Es esencial la eliminación del oxígeno para evitar la corrosión del generador de vapor. Inicialmente se acostumbra su eliminación mecánica mediante desaeradores los cuales se describirán más adelante. Esta dea-

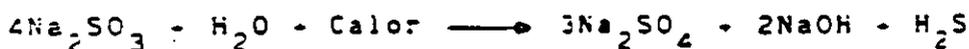
reacción mecánica se aplica no únicamente al agua de re-  
puesto, sino a toda el agua de alimentación. Bajo con-  
diciones óptimas es posible reducir el oxígeno disuelto  
en el agua hasta concentraciones tan bajas como 0.007  
ppm.

El ramanente de oxígeno después de esta deareación  
mecánica, será eliminado mediante medios químicos utili-  
zando las siguientes sustancias químicas:

- 1.- SULFITO DE SODIO: El sulfito de sodio se ha utilizado  
desde hace mucho tiempo como un eliminador de oxígeno  
en aguas de calderas. Reacciona rápidamente particular-  
mente a elevadas temperaturas formando sulfato de sodio  
de acuerdo a la siguiente reacción:



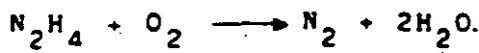
Actualmente es utilizado en plantas con baja y moderada  
presión, siendo prohibitivo su uso en calderas de alta  
presión debido a una potencial descomposición térmica  
como sigue:



La reacción anterior se inicia a presiones de 600 psig.  
aún cuando usualmente no crea problemas sino hasta pre-  
siones mayores de 900 psig. El principal problema aso-  
ciado con la descomposición del sulfito de sodio es  
la formación de gases corrosivos como el bióxido de  
azufre y el ácido sulfhídrico. Otra desventaja es el au-  
mento del contenido de sólidos disueltos por presencia  
del sulfato de sodio, lo que propicia el arrastre y la  
necesidad de purgas.

En calderas que utilizan el control coordinado P.H.-PO<sub>4</sub> el uso de sulfito de sodio no es deseable ya que la introducción de iones sodio altera el balance entre Na y PO<sub>4</sub>.

2.- HIDRAZINA.— Para calderas de alta presión se emplea como agente reductor la hidrazina (N<sub>2</sub> H<sub>4</sub>). Reacciona con el oxígeno disuelto del agua de acuerdo a la siguiente reacción:



Es importante hacer notar que los productos de la reacción de la hidrazina a diferencia de los del sulfito de sodio, no añaden sólidos disueltos al agua de caldera y además son inertes. Aparte de lo anterior, formará magnetita y óxido cuproso que son los óxidos estables del hierro y del cobre haciendo a estos materiales y a sus aleaciones menos susceptibles a la corrosión.

La hidrazina se alimenta en forma continua después del condensador o a la salida del deareador en cantidad suficiente para mantener un residual en caldera entre 0.002 y 0.020 ppm. como N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

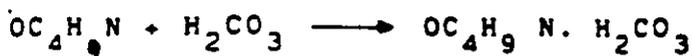
Entre 231 y 518°F la hidrazina aumenta su volatilización con lo cual protegerá el sistema post caldera al elevar el P.H. y pasivar las superficies del metal. a 518°F y arriba de esta temperatura la hidrazina se descompone conforme a la siguiente reacción:



Esta reacción ocurre relativamente despacio, pero se acelera conforme aumenta el nivel de hidrazina. Un inconveniente de esta reacción, es la creación de amoníaco, el cual puede atacar al cobre y sus aleaciones

en presencia de oxígeno.

- 3.- **AMINAS NEUTRALIZANTES:** Normalmente se denominan aminas neutralizantes o volátiles y actúan neutralizando el ácido carbónico, elevando el P.H. La morfolina y la ciclohexilamina, son las aminas neutralizantes más comúnmente usadas. La reacción para la morfolina es la siguiente:



Las aminas difieren en costo, reacción y relación de distribución vapor-líquido. Una utilidad muy interesante de las aminas neutralizantes es la prevención de la corrosión en el extremo húmedo de las turbinas. En esta sección la humedad condensada y la alta velocidad, tienden a eliminar la película protectora de óxidos, siendo necesario mantener un P.H. alto en esta zona. La morfolina es particularmente útil con este propósito porque es menos volátil que la ciclohexilamina.

- 4.- **AMINAS FILMICAS:** Las aminas filmicas funcionan de manera distinta a las neutralizantes, en vez de neutralizar el bióxido de carbono, forman sobre la superficie metálica una película que actúa como barrera entre el metal y el condensado, protegiendo al primero del ataque del oxígeno y el bióxido de carbono.

Su dosificación deberá ser continua y una vez formada la película, ésta es durable y no se elimina en períodos cortos de suspensión del tratamiento.

Las aminas filmicas de valor en la prevención de corrosión, son aminas de alto peso molecular con cadenas rectas conteniendo de 10 a 18 átomos de carbón tales como la octadecilamina ( $\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{NH}_2$ ) y la hexadecilamina

(G6 H33 NH2).

La película de las aminas filmicas, por ser muy delgada impide la transmisión de calor y aparte de lo anterior, tiene la habilidad de remover depósitos antiguos productos de la corrosión.

## MUESTREO Y ANALISIS

Para llevar un adecuado control de la concentración de impurezas en el ciclo agua-vapor, así como de las especies químicas inyectadas para evitar problemas de corrosión e incrustación, es imprescindible la toma de muestras en distintos puntos del ciclo para su análisis.

El control satisfactorio de la calidad del agua en una planta de vapor depende de numerosos factores, entre los cuales, las pruebas frecuentes de control y su interpretación son de importancia fundamental.

La magnitud del trabajo analítico variará con el diseño de la planta, las facilidades suministradas para el tratamiento de agua y los controles químicos requeridos.

El programa de frecuencia de análisis de agua, y la selección de los métodos a seguir, requiere de un estudio adecuado para cada planta en particular.

Deberán proporcionarse facilidades para muestrear el agua a través de todo el ciclo: agua de alimentación, agua de caldera, vapor saturado y sobrecalentado, condensado del vapor de turbina, agua deareada y calentadores de agua de alimentación.

Debido a los problemas presentados en las unidades que operan a alta presión, en las nuevas plantas generadoras, se han instalado tableros de análisis continuos para tener medición todo el tiempo, de los parámetros más importantes a controlar. Así, en las nuevas centrales generadoras se tienen los siguientes análisis continuos:

P.H.- Condensado, Agua de alimentación, agua de caldera, deareador, vapor principal, vapor saturado.

Conductividad específica- en los mismos puntos que el anterior.

~~Conductividad catiónica - en los mismos puntos que el anterior.~~

Oxígeno disuelto - en salida del deareador.

Hidrazina - en agua de alimentación.

Sodio - en condensado y vapor principal.

Sílice - en agua de caldera

Fosfatos - en agua de caldera

A lo anterior es necesario adicionar, que se pueden ajustar puntos de alarma de acuerdo a los límites de control alto y bajo, de tal manera que se pueda detectar oportunamente cualquier problema de contaminación.

De esta manera en las plantas modernas, además de contar con el sistema de análisis continuos, se efectúan análisis de rutina cuya frecuencia recomendada, se puede apreciar en la tabla de la Fig. N°. IV-1.

COLECCION DE MUESTRAS: Una parte importante del trabajo analítico, es la colección de muestras representativas, las cuales deben ser preservadas en su estado original hasta que pueda hacerse el análisis. Una muestra exactamente representativa es aquella que representa realmente al agua o al vapor en la parte del ciclo en que se ha tomado. No siempre es posible la perfección a este respecto, pero hasta donde sea posible, las muestras se deberán tomar con este objeto en mente.

Las condiciones del agua y del vapor cambian de vez en cuando, y, en ocasiones, momentáneamente. Por lo tanto, es necesario no sólo tomar las muestras cuidadosamente, sino considerar también la influencia de las condiciones de operación en dicho momento, de modo que los resultados analíticos se puedan evaluar apropiadamente, o, en algunos casos, deberán tomarse muestras individuales durante dos períodos de carga promedio o bajo condiciones de carga en especial.

En la mayor parte de los casos, las muestras de agua deberán tomarse en recipientes de 500 a 1000 ml de agua manteniendo

1	DESCARGAS BOMBAS DE CONDENSADO		⊗	⊗	△	○	⊗				○	○
2	DEAREACION	ENTRADA	△	△	⊗							
		SALIDA	⊗	⊗	⊗							○
3	SALIDA DE CALENTAMIENTOS		⊗	⊗			⊗	⊗				
4	AGUA DE CALDERA		⊗	⊗		○	⊗		○	○	○	○
5	VAPOR SATURADO		△	△		△						
6	VAPOR PRINCIPAL		⊗	⊗		○						
7	AGUA DE ALIMENTACION		⊗	⊗		○	⊗					○



INSTRUMENTO DE MEDICION CONTINUA



2 VECES A LA SEMANA



3 VECES AL DIA



EN MOMENTOS NECESARIOS

FIG. IV - 1

el tapón en su lugar cuando no se retire la parte requerida de la muestra. Para determinaciones muy exactas de sílice, se recomiendan recipientes de hule o plástico. Independiente del tipo de recipientes, se deberá establecer la regla general, de hacer los análisis tan pronto como sea posible después del muestreo.

Antes de tomar muestras de una línea de la que no se toman muestras con frecuencia, la línea de muestreo debe purgarse no solamente para eliminar toda el agua estancada sino también para dar un lavado adicional que remueva cualquier sedimento u otra impureza que esté presente.

Las muestras deberán tomarse en lugares tan cercanos al punto de muestreo como sea posible y sus líneas y enfriadores no deberán tener trampas que puedan almacenar materia en suspensión antes de llegar a la botella de muestreo.

REGULACION DE LA TEMPERATURA: La regulación de la temperatura de muestras de agua para equipos indicadores o registradores de conductividad y P.H. es un punto de atención especial para obtener resultados comparables. La temperatura ideal es 25°C, pero si ésta no se logra, debe hacerse lo posible para mantener la muestra de agua al valor más cercano posible a 25°C.

Las nuevas centrales, que utilizan sistema de análisis continuo, están equipadas con sistema adicional al sistema de enfriamiento de muestras denominado sistema de agua helada.

IDAD DEL AGUA DE ALIMENTACION A CALDERAS Y AGUA DE CA TAS. (TODOS LOS VALORES MEDIDOS A LA ENTRADA DEL ECONOMIZADOR EXCEPTO EL ORIGENO DISUELTO QUE SE MIDE A LA SALIDA DEL DEAREADOR)

CLASIFICACION	TIPO DE CALDERA	CALDERA CILINDRICA		CALDERA DE TUBOS DE AGUA																
	PRECION (kg/cm <sup>2</sup> G)	-		< 10		10-20	20-30	30-50	50-75	75-100	100-125	125-150	> 150							
AGUA DE ALIMENTACION	RELACION DE EVAPORACION POR SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	< 30	> 30	< 50	> 50															
	pH A 25°C	> 7	> 7	> 7	> 7	> 7	> 7	8.0-9.0	8.0-9.0	8.0-9.0 (10)	8.5-9.0 (10)	8.5-9.0 (10)	8.5-9.0 (10)							
	DUREZA (ppm CaCO <sub>3</sub> )	< 60	< 40	< 40	< 2	< 2	0	0	0	0	0	0	0							
	CLORURO DISUELTO (ppm Cl <sub>2</sub> )	LO MAS BAJO		POSIBLE		< 0.3	< 0.1	< 0.03	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007							
	PLATINO TOTAL (ppm Pt) (2)	-	-	-	-	-	-	-	< 0.05	< 0.03	< 0.03	< 0.02	< 0.02 (4-0.01)							
	CADAVRE TOTAL (ppm Cu)	-	-	-	-	-	-	-	LO MAS BAJO POSIBLE	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.028 (10 003)							
	AMONIACO (ppm N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (3)	-	-	-	-	-	-	0.01-0.05	0.01-0.03	0.01-0.03	0.01-0.03	0.01	0.01							
	SILICE (ppm SiO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0.02							
	ACEITE (ppm)	-	-	-	LO MAS	CERCANO	A	CERO	-	-	-	-	-							
	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA A 25°C (µmhos/cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0.3	< 0.3						
AGUA DE CALDERA	TIPO DE TRATAMIENTO	TRATAMIENTO CAUSTICO				TRATAMIENTO CAUSTICO				TRATAMIENTO CAUSTICO	TRATAMIENTO BAJO pH	TRATAMIENTO VOLATIL	TRATAMIENTO BAJO pH	TRATAMIENTO VOLATIL						
	pH A 25°C	11.0-11.8	11.0-11.5	11.0-11.8	11.0-11.5	10.8-11.3	10.5-11.0	10.5-11.0	10.8-11.0	10.0-10.5	10.5-11.0	9.8-10.3	10.5-10.8	9.6-10.3	9.0-10.0	8.5-9.0	9.0-9.5	8.5-9.0	9.0-9.5	8.5-9.0
	DUREZA "M" (ppm CaCO <sub>3</sub> ) (5)	300-1000	500-800	500-1000	500-800	< 600	< 150	< 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DUREZA "P" (ppm CaCO <sub>3</sub> ) (6)	300-800	300-800	300-800	300-800	< 400	< 120	< 70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SOLIDOS TOTALES (ppm CaCO <sub>3</sub> ) (7)	< 4000	< 3000	< 3000	< 2500	< 2000	< 700	< 500	< 400	< 300	< 100	< 50	2	< 70	< 2					
	CLORURO (ppm)	< 800	< 500	< 500	< 400	< 300	< 100	-	-	-	-	-	-	-						
	FOSFATOS (ppm PO <sub>4</sub> )	20-40	20-40	20-40	20-40	20-40	20-40	10-20	5-15	3-10	3-10	0.5-5	-	0.3-3	-					
	SULFATOS (ppm SO <sub>4</sub> )	-	-	-	10-20	10-20	10-20	10-20	5-10	1-3	0.5-2.0	-	-	-						
SILICE (ppm SiO <sub>2</sub> )	-	-	-	-	-	< 50	< 40	< 10	< 5	< 2	< 0.3	0.3	< 0.2	< 0.2						



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

C U R S O S   A B I E R T O S

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

ENERO 30   A   FEBRERO   3

TEMA: O P E R A C I O N .

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ

- Servicios de rutina llevados a cabo, indicando la fecha.
- Número de defectos reportados, que puede ser un simple sistema de señalización.
- Frecuencia del mantenimiento rutinario y breve descripción de la rutina.

#### MANTENIMIENTO PREVENTIVO PLANEADO CON LA CALDERA PARADA

Debido a los altos gastos en que se incurren con las unidades fuera de servicio para mantenimiento, es necesario elaborar cuidadosamente un plan de trabajo, para que la duración del paro se reduzca al mínimo. El proceso de planeación debe empezar varias semanas o meses, antes de que el paro tenga lugar.

Las estimaciones de tiempo no deben sólo considerar los registros pasados que puedan estar distorsionados por dificultades específicas, como falta de mano de obra o equipo, etc., que se haya tenido en ese tiempo y las estimaciones deben hacerse sobre bases realistas actualizadas.

Todos los trabajos a ser realizados pueden ser agrupados en la siguiente forma:

- Trabajos preparatorios
- Trabajo esencial mínimo
- Trabajo que debe hacerse preferiblemente durante el paro
- Otros trabajos

cióna el equipo, se miden claros, se hacen exámenes no destructivos, etc., para determinar el origen o la raíz de la causa y tomar acciones correctivas.

- Evaluación de los programas de mantenimiento preventivo y predictivo. Se hacen en equipos individuales basados en consideraciones de operación existentes.
- Evaluación de problemas inesperados encontrados durante la revisión del equipo.
- Preparación de especificaciones para la sustitución de equipos.
- Ingeniería de modificaciones pequeñas de la caldera.

f) Entrenamiento del Personal.- Deben hacerse esfuerzos adicionales para formalizar y proporcionar una forma estructurada de entrenamiento basado en la valoración de necesidades, determinando los conocimientos - - esenciales, las habilidades necesarias y la actitud más positiva, para todos los niveles de personal.

#### MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Para estos trabajos se requiere contar con un medio para reportar los defectos y solicitar los servicios de mantenimiento. Este medio debe tener las siguientes características:

- Proporcionar un registro escrito de lo ocurrido
- Asegurar que el defecto se notifica rápidamente a la superintendencia de mantenimiento.
- Ayudar a la superintendencia de mantenimiento a determinar prioridades cuando compile los programas de trabajo.

- Proporcionar un medio para verificar que el defecto ha sido corregido a satisfacción, a la Superintendencia de Operación.
- Proporcionar un registro del trabajo hecho para el historial de la planta y para el sistema del archivo central.

#### MANTENIMIENTO PREVENTIVO PLANEADO CON LA UNIDAD EN FUNCIONAMIENTO

Este es un sistema de mantenimiento rutinario, que ayuda a prevenir defectos y roturas, debiéndose tener una cuidadosa consideración para lograr el óptimo nivel de mantenimiento.

La naturaleza y frecuencia de este mantenimiento, pueden ser mejorados progresivamente por medio de lo siguiente:

- Monitoreo del comportamiento de la caldera.
- Tendencia del comportamiento.
- Modificación de programas.

Los objetivos de este sistema de mantenimiento preventivo planeados, son los siguientes:

- Determinar los requerimientos de mantenimiento rutinario de cada equipo es decir, definir qué trabajo debe ser hecho y su frecuencia.
- Asegurarse que el mantenimiento rutinario se llevó a cabo.
- Proveer un registro de que el mantenimiento rutinario se ha llevado a cabo y la naturaleza de cada trabajo adicional que pueda encontrarse necesario.

Es necesario auxiliarse de hojas de registro en donde se incluya:

- Número de código e información de la caldera, como plano de referencia etc.

## FACTORES MAS IMPORTANTES DEL MANTENIMIENTO

La función del mantenimiento es la de proporcionar un servicio para manter el equipo en condiciones operables y seguras, debiendo cumplir con lo siguiente:

- . Rápida respuesta a las necesidades de operación
- . Accesible a operación
- . Productiva en la relación del trabajo
- . Innovativa en la forma de hacer el mantenimiento
- . Disciplina para el control de trabajo

Para que la gestión de mantenimiento sea efectiva, es necesario que se construya sobre objetivos realistas que proporcionen políticas positivas para las operaciones de mantenimiento y pueda tenerse un control positivo sobre las circunstancias que lo afectan.

Normalmente el área en la cual falla la gestión de mantenimiento es, la de implementar una política para lograr los objetivos, debido principalmente a la forma de manejo simple a través del cual se intenta implantar políticas sin la valoración plena de los factores externos que tienen influencia sobre esas políticas y prácticas.

Para evaluar un programa de gestión de mantenimiento es esencial que los conceptos del mantenimiento se definan en términos comunes, debiendo responderse a las preguntas fundamentales de cuales son los objetivos, como se alcanzarán y como se medirán los logros.

Típicamente los seis factores que tienen mayor influencia sobre la gestión de mantenimiento, son los siguientes:

- a) Organización.- La estructura de la organización es la cimentación de un mantenimiento efectivo. La mejor forma de establecer una organización es la de evaluar las secuencias de un trabajo típico que debe acompañarse para completar una tarea o proceso de mantenimiento.

- b) **Técnicas de Planeación.**- En esta área se pueden implementar actividades para minimizar las influencias externas. La planeación es el acto de organizar los recursos para asegurar su uso efectivo, programando el trabajo en una secuencia lógica y ejecutando el plan de acuerdo con el programa.
- c) **Sistemas Administrativos.**- Son los ingredientes que mantienen unido al programa de mantenimiento, siendo la base para implementar acciones que aseguren el logro de las metas que pueden ser para la determinación de qué, cómo y cuando debe hacerse, así como la configuración y medición de los efectos de lo que se ha hecho. Son las herramientas para convertir las políticas y procedimientos en acciones específicas.
- d) **Métodos y Estándares de Trabajos.**- Deben producirse estándares de calidad o métodos de trabajo para ayudar a los técnicos en su trabajo, debiendo incluir prerequisites, limitaciones y medidas de criterios de aceptación. Son documentos de ingeniería, que en caso de no aplicar los requerimientos del procedimiento, pueden alterar el comportamiento equipo; para iniciar la institución de los métodos y estándares de trabajo, se deberá contar con lo siguiente:
- Una política con relación a su uso.
  - Actividades estándar en donde se use.
  - Procedimientos para controlar el uso y revisión del estándar.
  - Un programa para medición del comportamiento contra el estándar.
- e) **Ingeniería de Mantenimiento.**- Proporciona la capacidad analítica para mejorar la confiabilidad de los equipos y para reducir la demanda del trabajo de mantenimiento. Las funciones principales de la ingeniería de mantenimiento son:
- Análisis predictivo de fallas. Incluye la evaluación de todas las posibles fuentes de datos para identificar el deterioro e impedir fallas en los equipos.
  - Análisis de fallas inesperadas. Se evalúa el mismo tipo de datos del análisis predictivo de fallas y adicionalmente se desensambla e inspec

### 3.- LA GESTION DEL MANTENIMIENTO

Los objetivos del mantenimiento son los siguientes:

- Aumentar el tiempo medio entre reparaciones (TMER)
- Disminuir el tiempo medio de reparaciones (TMR)
- Controlar y optimizar los gastos de mantenimiento

La necesidad de resolver los problemas de mantenimiento es por lo siguiente:

Elevado costo inicial de la instalación y por lo tanto, la necesidad de una utilización completa y racional de la misma, en condiciones de máximo rendimiento.

Repercusión de los paros sobre producción.

Elevado nivel de mecanización, crecimiento y complejidad de la maquinaria.

Las acciones que deben llevarse a cabo para lograr los objetivos, son las siguientes:

- . Definición y creación de una estructura de organización adecuada para la preparación de trabajos, plazos, programas y aprovechamiento de materiales.
- . Realizar intervenciones especializadas, tanto preventivas como correctivas y predictivas.
- . Definir y negociar los trabajos que deben realizarse por compañías externas.
- . Mejorar técnicamente los medios de que el mantenimiento dispone.
- . Vigilar que se lleve a cabo capacitación y entrenamiento del personal obrero y de supervisión.

- . Colaborar en la puesta en servicio, para adquirir conocimientos de reacción en futuros mantenimientos.
- . Difundir el conocimiento de la maquinaria y las instalaciones.
- . Colaborar con la experiencia para retroalimentar futuros proyectos.
- . Definir y participar en la gestión de refacciones y materiales.
- . Participar en la búsqueda de nuevas técnicas organizativas.
- . Llevar el historial del mantenimiento en registros simples pero significativos.

De lo anterior expuesto, resulta que para lograr los objetivos señalados, los responsables de la gestión del servicio de mantenimiento deben resolver los siguientes problemas.

- . Dimensionar adecuadamente los medios técnicos y humanos de mantenimiento.
- . Determinar los tipos de mantenimiento a efectuar.
- . Decidir los trabajos que van a subcontratarse.
- . Determinar la calidad y cantidad de refacciones y de materiales.
- . Establecer cuanto mantenimiento preventivo debe efectuarse.

Adicionalmente, el mantenimiento debe vigilar la eficiencia de la caldera, el costo en tiempo y dinero para la renovación de partes desgastadas y las fallas de diseño de equipos.

Por lo anteriormente señalado, puede comprenderse que el mantenimiento pasa de ser una actividad auxiliar, a ser una función que contribuye a nivel de productividad.

## XII.— INSTRUMENTACION Y CONTROL.—

Actualmente se usa una gran variedad de instrumentación para la supervisión y control de plantas modernas, incluyendo esta instrumentación físicos, electrónicas, nucleónicas, neumáticos, ópticos, análisis de gases y químicos, datos de procesos, computadoras y secuencias lógicas, para obtener el mejor comportamiento y control de una planta es esencial que la instrumentación sea mantenida con un alto grado de confiabilidad y disponibilidad.

La dependencia de la operación del control e instrumentación ha sido aumentado particularmente en los controles centralizados; los servomotores, compuertas, válvulas, requieren un mantenimiento mecánico así como el equipo neumático de control.

Los instrumentos registradores e indicadores de temperatura requieren una calibración regular con objeto de comprobar su exactitud, los termocoples y sus registros o indicadores asociados deben comprobarse periódicamente por medio de un potenciómetro y una cámara de referencia del punto de hielo.

En los arranques de caldera es necesario asegurarse que las temperaturas de los metales de los tubos de sobrecalentadores, recalentadores y del domo no se someten a sobreesfuerzos, controlándose esta temperatura por medio de termopares de Níquel-Cromo/Níquel-Aluminio aislados y encamisados en acero inoxidable.

Los termómetros de resistencia son elementos confiables y normalmente no se tienen conexiones flojas; la exactitud de este tipo de termómetros normalmente se comprueba conectándolos a resistencias standard en circuitos con elementos sensibles a la temperatura.

Los instrumentos para medir la presión requieren calibración periódica con respecto a un probador de pesos muertos; el desajuste de los manómetros de presión se debe principalmente al desgaste de sus mecanismos lo que a su vez depende normalmente de la presencia de fluctuaciones de vapor de alta frecuencia.

Los instrumentos medidores de flujo de vapor de la caldera se basan en la presión diferencial a través de un ventury u orificio, el mantenimiento de estos equipos consiste principalmente en una calibración periódica comprobando que no haya fugas y sopleteando todas las tuberías para remover cualquier acumulación que pueda reducir el tiempo de respuesta del instrumento. En donde las fluctuaciones de presión diferencial son altas debidas a variaciones de flujo las lecturas no serán exactas, -- aún cuando se instalen amortiguadores; los instrumentos con amortiguador miden los valores medios de las variaciones diferenciales de presión y -- lecturas altas mientras que el flujo medio se mide por medio de la raíz cuadrada de la presión diferencial.

Los instrumentos para mediciones de tiros son normalmente del tipo de diafragma y se requiere un mantenimiento y calibración periódica referidos a un manómetro de columna de agua, consistiendo el mantenimiento en la eliminación de fugas o limpieza de taponeamientos en las tuberías que conectan a los instrumentos

## XI.- BOMBAS DE AGUA ALIMENTACION.-

El mantenimiento de las bombas de agua de alimentación es bastante especializado debido a las presiones, temperaturas y flujos grandes que manejan estas bombas.

Durante el mantenimiento normal es necesario revisar el sello de los impulsores en los anillos de desgaste por el contacto con sus respectivos bugs ; desgaste en el dispositivo de balance causado durante los arranques antes de que se alcance el balance hidráulico; y la atención a los estoperos o empaques.

El reacondicionamiento de la caldera de un impulsos en los anillos de sello requieren el completo desmantelamiento de la bomba y al hacer esto normalmente se encuentran otros defectos como erosión en los difusores y fugas entre los pasos atrás de los asientos de los anillos de sello; estas fallas pueden normalmente ser detectadas por una gradual disminución en la presión durante un periodo prolongado y el desmantelamiento, por lo tanto puede programarse y planearse de acuerdo con estas experiencias de operación.

El desgaste en el dispositivo de balance normalmente puede impedirse ya sea electronicamente o por métodos directos; el desgaste permisible varía de una bomba a otra pero en general se recomienda inspeccionar el dispositivo de balance antes de que la flecha tenga un movimiento de 1.6mm. (1/16 pulgada) de su posición original hacia el extremo de la succión. Las grutas o ranuras por erosión del agua en - 5

los asientos de las válvulas de balance pueden no ocasionar un daño de interferencia mecánica, pero puede ser el principio de una avería completa del balance hidráulico.

Las fugas en los estoperos dependen principalmente de la velocidad de la flecha y de la temperatura del agua, recomendándose - emplear empaques de asbestos lubricados con grafito que dan un razonable servicio cuando se enfrían adecuadamente y con un ajuste rutinario de la caja de empaques o el reempaque cuando este se necesite; el desgaste de los manguitos son causados fácilmente por apretar demasiado el empaque cuando se trabaja un sello recién empacado o por atrapamiento del empaque -- entre la flecha y el prensa-estopas. Debe tenerse cuidado de ver que sale suficiente flujo de agua del estopero para una lubricación efectiva y enfriamiento del empaque.

## IX.- VALVULAS DE SEGURIDAD.-

Las válvulas de seguridad normalmente se inspeccionan y reacondicionan como parte de un programa de mantenimiento general de la caldera siendo necesario su ajuste y calibración después de un mantenimiento completo.

En el mantenimiento de las válvulas de seguridad debe considerarse que durante la prueba hidrostática de la caldera deben removerse las válvulas de seguridad y emplear bridas ciegas para sellar estas partes ; también es importante que cuando se ajusten partes nuevas a una válvula o se ajusta una válvula nueva completa se conserva y registra la exacta localización de la válvula en la caldera para propósitos de repuesto puesto que las válvulas del sobrecalentador son de diferente material debido a que las partes el cuerpo, tuercas, etc., trabajan a más alta temperatura; adicionalmente la elevación de una válvula del sobrecalentador es ligeramente menor que una válvula del domo.

Las válvulas de seguridad del sobrecalentador son las que operan más frecuentemente debido a que tienen la presión de ajuste más baja para protección del sobrecalentador, y con objeto de dar una protección a estas válvulas de seguridad se ha establecido el uso de una válvula adicional eléctrica (electromática) que puede ser operada manualmente y darle mantenimiento sin sacar la caldera de servicio debido a que tiene su válvula de aislamiento.

## X.- SOPLADORES.-

En calderas grandes se emplea una gran cantidad de tiempo para el mantenimiento mecánico y eléctrico de los sopladores de hollín; el trabajo eléctrico comprende principalmente la localización y corrección de las fallas en el sistema de control de secuencia y daños incidentales debidos a fugas de vapor, y el trabajo mecánico consiste normalmente en prevenir o reparar fugas de vapor y toberas y lanzas dañadas. Normalmente los sopladores se fabrican con una caja de vapor standar y después se adaptan para las paredes del hogar, sobrecalentador, economizador y limpieza de los precalentadores de aire.

El mantenimiento normal comprende también el reempacado de estoperas y el reasentamiento de los asientos de válvulas. La eficiencia del drenaje de los sistemas de tuberías de sopladores debe ser vigilado perfectamente puesto que cualquier desviación en el comportamiento de las trampas de drenes resultarán en daños de los asientos de las válvulas siendo este daño causado por choques térmicos debidos a la presencia de gotas de condensado en el suministro de vapor lo cual causa también erosión en los tubos que se limpian.

## VII.- VENTILADORES.-

Los impulsores de los grandes ventiladores de alta velocidad están sometidos a grandes esfuerzos por lo que requieren una inspección cuidadosa para detectar grietas; erosión y depósitos ocurren normalmente en los ventiladores de tiro inducido.

Después de una reparación que afecte el balance puede ser necesario un balanceo dinámico porque las vibraciones fuera de tolerancia incrementan grandemente los esfuerzos y son las causas que anteceden a fallas.

Debido a las condiciones de polvo y suciedad en que trabajan muchos ventiladores debe tenerse mucho cuidado para asegurar la limpieza del sistema de lubricación y cojinetes porque muchos paros causados por fallas de cojinetes resultan de la introducción de suciedad a través de los sellos de la flecha o los ajustes de los cojinetes.

## VIII.- NIVELES.-

Los defectos mecánicos durante el servicio en los cristales de nivel son principalmente fugas de vapor debidos a fallas de los empaques, falla de la mica que deja que el agua entre en contacto con el cristal; - falla del cristal y obscurecimiento de la mica; en donde se usa un cristal de nivel para irradiaación remota por medio de televisión - deberá conservarse la mica perfectamente limpia para que permita que - pase suficiente luz haciéndose necesario reemplazar las micas cuando -- éstas empiezan a obscurecer.

La localización de los cabezales de nivel en las calderas se hace normalmente cerca de la bomba y esta es una zona donde la -- temperatura ambiente es normalmente alta por lo que la productividad - del trabajo no es muy buena para el mantenimiento de los cristales de - nivel; en este caso es recomendable tener un cristal de nivel de repuesto completo para cambiar el defectuoso y reparar este en el taller con lo - cual se disminuye el tiempo en que está la caldera sin nivel.

La eliminación del cristal requiere periódica limpieza y - cambio de las lámparas pero esto no representa un problema mayor de -- mantenimiento.

## VI.- PRECALENTADORES DE AIRE.-

Una revisión cuidadosa antes y después de la limpieza es la clave para reducir los mantenimientos en todas las secciones del lado de gases - porque el precalentador de aire proporciona mucha información útil para - que el personal de operación y mantenimiento obtenga los mejores resultados de acuerdo con la formación y tipo de depósitos y corrosión que se - observan con relación a cambios en procedimientos, patrones de carga, -- combustibles, etc. y en donde se tiene corrosión. La rapidez de ésta puede ayudarnos a predecir el tiempo de vida y planear adecuadamente los mantenimientos. Una limpieza completa es una operación esencial en un mantenimiento anual y prácticamente todos los tipos modernos de precalentadores se diseñan para efectuar un lavado con agua.

La condición de los sellos normalmente se evalúa en forma regular y más especialmente antes de un mantenimiento por medio de la medición de la caída del contenido de  $\text{CO}_2$  en los gases de combustión a través -- del precalentador siendo esto una indicación directa de la cantidad de fugas; la caída de  $\text{CO}_2$  a través de un precalentador rotatorio en instalaciones - normales no deberá exceder de .7% inmediatamente después de un mantenimiento, aumentado alrededor de 1% después de 12 meses de servicio.

El diseño de sellos en algunos precalentadores regenerativos requieren que giren en la dirección correcta por lo que después de un mantenimiento en caso de haber desconectado eléctricamente el motor, deberá comprobarse la rotación del motor antes de acoplar la transmisión.

A pesar de los mantenimientos regulares las fugas en los precalentadores de aire pueden variar eventualmente por lo que no es aconsejable el análisis de gases para la eficiencia de combustión en la salida del precalentador, siendo esta la razón por la cual los controles de aire de combustión únicamente pueden ajustarse con los análisis de gases de  $O_2$  y  $CO_2$  antes de los precalentadores de aire.

## XIV - MANTENIMIENTO

### PRINCIPIOS GENERALES DE MANTENIMIENTO

#### 1.- CALDERA.-

Cuando una caldera se somete a una inspección completa, las partes internas del domo deberán quitarse y sujetarse a una revisión cuidadosa por grietas o picaduras: las superficies del domo, los aparatos soldados, las boquillas, etc.; en algunas ocasiones es necesario revisar los cabezales cortando los extremos de éstos. También debe efectuarse una inspección de los tubos de los sobrecalentadores y economizadores para ver si no presentan signos de sobrecalentamientos, erosión, corrosión, etc.; aún cuando en algunas ocasiones no es necesaria una limpieza interior se recomienda efectuar un lavado sobre todo en los cabezales y domos inferiores donde se colectan los lodos, aunque en algunas ocasiones es recomendable la limpieza ácida del lado de agua de la caldera.

La mayoría de las fugas de agua y vapor ocurren en aditamentos más que en la caldera propiamente, recalentadores o sobrecalentadores; las fugas de los tubos se deben a varias causas, como sobrecalentamiento, erosión de los sopladores o partículas de cenizas o bien por la corrosión en el lado de vapor o agua; el sobrecalentamiento puede ser causado por el bloqueo de tubos (a pesar que esto es más común en las calderas recién puestas en servicio), o puede también ser causado por estratificación en el flujo de gases, fuegos excesivos en elevación de presión o por distribución desigual en los cabezales de sobrecalentador y tubos. La estratificación de los gases puede corregirse rearreglando la posición de los pasos de gases, la distribución de vapor por el ajuste con bridas en ciertos extremos de los tubos del sobrecalentador o por la colocación de

desviadores internos en los cabezales del sobrecalentador. La erosión de los sopladors por sopladors debe corregirse ajustando la posición de los sopladors.

Existen problemas adicionales de mantenimiento en las partes de alta presión debido a malas calidades de soldaduras y a tratamientos térmicos de éstas.

Las válvulas defectuosas soldadas a las tuberías es recomendable removerlas para su reparación fuera del sitio.

Además de los métodos de inspección tradicionales se han desarrollado técnicas más sofisticadas como puntos de referencia para comprobar mediciones que pueden ocasionarse por trabajar los materiales arriba del punto plástico, inspección ultrasónica que puede usarse para medir los espesores de partes e investigar defectos de picaduras por corrosión o agrietamientos, la radiografía que se puede usar para propósitos similares pero que tienen más desventaja por las precauciones de seguridad y pequeñas cámaras de televisión y fotográficas que pueden bajarse a lo largo de los tubos de agua para investigar ataques por corrosión.

Adicionalmente durante los mantenimientos anuales es costumbre inspeccionar y limpiar todos los aditamentos como alarmas por valores altos y bajos, cristales de nivel, equipo de muestreo, equipo de dosificación de químicos, atemperadores, filtros de vapor, etc.

Las válvulas principales de caldera de agua y de alimentación se revisan rutinariamente y con base en esto debe efectuarse el mantenimiento, esto también es aplicable a las válvulas de purgas y en las de no-retorno.

---

En general el mantenimiento puede dividirse en 2 categorías: el que puede efectuarse con la caldera en operación y el que es necesario efectuar cuando ésta está fuera de servicio.

El mantenimiento se completa por una serie de comprobaciones operacionales, prueba hidrostática y ajuste de válvulas de seguridad.

## II.- HOGAR.-

Una inspección rutinaria del hogar se necesita para detectar señales de daños en sus primeras etapas para corregir fallas en el encendido, combustión, circulación, sopladores, etc., antes de que los daños resulten serios; el procedimiento durante los mantenimientos anuales variará de acuerdo con el diseño y el historial de operación de cada caldera pero es necesario una vigilancia cuidadosa durante toda la vida de la caldera - particularmente donde se efectúen cambios en los patrones de operación.

La primera etapa después de sacar una caldera para mantenimiento o después de una falla, es revisar cuidadosamente el hogar antes de efectuar cualquier limpieza porque puede obtenerse valiosa información de los depósitos en las paredes y tubos como son los siguientes puntos vitales: condición y alineamiento de quemadores, distribución y ataques sobre paredes de la flama, efecto de los diferentes combustibles, métodos correctivos necesarios en operación y el método más adecuado de limpieza.

La segunda etapa después de la inspección es la limpieza completa de toda la superficie y efectuar otra inspección en este caso sobre el deterioro de quemadores, paredes de tubos, cabezales, refractarios, sellos de -- expansión, sopladores, etc. Cualquier signo superficial de daños debe analizarse por un químico o metalurgista para determinar la causa del daño y - las medidas correctivas necesarias.

Las reparaciones en el hogar deben llevarse a cabo con suficiente seguridad porque cualquier trabajo deberá ser sacado de servicio - la caldera con los siguientes inconvenientes económicos y de servicio; las paredes de los tubos causan muy pocos problemas si la circulación y el tratamiento del agua de la caldera son adecuados y no existe sobrecalentamiento debido a ataque de la flama, pero en caso de daños severos que requieren la reposición de tubos las soldaduras en secciones nuevas es un proceso totalmente adecuado.

Las reparaciones en las paredes con refractarios y garganta de quemadores son los trabajos que con más frecuencia se requieren y el uso de materiales refractarios plásticos es recomendable en las reparaciones.

Un importante punto de mantenimiento es el registro de las condiciones encontradas durante la inspección y los trabajos efectuados, conjuntamente con los detalles de cualquier modificación hecha durante los períodos de mantenimiento, este historial es una referencia vital para determinar las causas de los daños y evaluar los factores responsables.

### III.- SUMINISTRO ACEITE COMBUSTIBLE.-

El sistema de suministro de aceite combustible normalmente tiene duplicados sus principales auxiliares por lo que su mantenimiento puede efectuarse - bajo las bases preventivas; las unidades de bombeo y calentamiento deben inspeccionarse y darles mantenimiento anualmente, los tanques de almacenamiento deben revisarse cada tres años o cuando es conveniente, debiendo limpiarse - de todos sus accesorios como válvulas, flotadores y calentadores; las calderas auxiliares o evaporadores para el suministro de vapor de calentamiento - deben dárseles mantenimiento anualmente y deberá dársele una atención especial a cualquier fuga de combustible corrigiéndola de inmediato, todas las -- bombas deberán recibir una atención rutinaria y comprobar que su comporta - miento es el correcto, el sistema de vapor auxiliar para calentamiento debe mantenerse en buenas condiciones dándosele particularmente atención a las - ~~trampas~~ trampas de vapor, ~~termos~~ termostatos de control y sistema de recuperación de condensado; periódicamente deben examinarse y mantenerse en buenas condiciones todos los instrumentos, calentamiento eléctrico, tableros de control, motores eléc - tricos, etc.

#### IV.- ACEITE COMBUSTIBLE A QUEMADORES.-

Uno de los factores más importantes en la operación de quemadores de aceite es asegurarse que se obtiene la temperatura correcta en el quemador de acuerdo con el combustible usado.

Un punto de control rutinario es la limpieza de las fichas de los quemadores, particularmente en donde los quemadores entran y salen de servicio; los filtros también necesitan una atención periódica y frecuentemente estos son del tipo duplex con lo que puede sacarse y revisarse uno sin que afecte la operación de la planta.

Considerando que la posición de las boquillas de los quemadores ha sido seleccionada correctamente para evitar el ataque de la flama y que se ha usado el material refractario correcto, las gargantas de los quemadores normalmente necesitarán un mantenimiento anual.

Los aceites combustibles residuales tienen a la formación de lodos en los calentadores después de un período de tiempo por lo que un calentador para este servicio deberá tener conexiones para una limpieza con vapor.

En donde se usan celdas fotoeléctricas para la detección de la falla de flama, se necesita una atención constante para asegurar que la sensibilidad del instrumento no se afecta por los depósitos de carbón o polvo en las mirillas, el uso de este equipo de detección de falla de flama no es completamente satisfactorio debido a que el instrumento no es confiable por la falta de selectividad donde hay un número grande de flamas en el hogar.

## V. \_ ECONOMIZADORES. -

Los economizadores del tipo soldados requieren muy poco - mantenimiento aparte de la limpieza rutinaria..

En la práctica los economizadores están sujetos a choques térmicos muy severos durante la elevación de presión, por lo que es necesario que se cuente con muy buena calidad de soldaduras para evitar fallas, observándose experimentalmente que las soldaduras de campo son muy <sup>s</sup>uceptibles de falla que las soldaduras de fábrica. Debido a esto las soldaduras de campo se planean cuidadosamente en las etapas de - diseño para garantizar el mejor acceso posible a las soldaduras, debiéndose emplear los métodos más confiables de soldar y probarse radiográficamente o ultrasónicamente estas soldaduras.

- . Limitaciones en la operación tanto en el modo manual como en el automático.
- . Interrelaciones con otros componentes asociados.

La alimentación de agua a la caldera debe ser uniforme para mantener el nivel normal en el domo; así mismo debe vigilarse la temperatura del agua y su calidad. Una alimentación uniforme lleva a un funcionamiento correcto del economizador y a estabilizar la temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

El mantenimiento del estado de limpieza de colectores, domo y tubos, se efectúa estableciendo un flujo de pureza continua a los valores prescritos y efectuando periódicamente purgas intermitentes (de fondo).

El mantenimiento del estado de limpieza de los conductos de gases se logra con la elevación a tiempo de las cenizas que se depositan en las tolvas del paso de gases; la evacuación de estos depósitos constituye una medida de seguridad porque las cenizas volantes por el contenido de combustible que tienen pueden encenderse y provocar una avería en la caldera.

El funcionamiento económico de la caldera está muy influenciado por el estado de limpieza de la superficie exterior de calentamiento; los depósitos de ceniza volante y hollín deben eliminarse por el soplado (con vapor u otro medio) de las superficies porque de otra forma los depósitos acumulados aumentan rápidamente la temperatura de los gases en la chimenea y se deteriora el cambio de calor entre gases y superficie.

Una atención permanente en operación, debe darse al desarrollo correcto del proceso de combustión, ya que influye en mayor medida en el consumo específico de combustible. La combustión se vigila por el resultado del análisis de gases de combustión en el sobrecalentador y la chimenea, para mantener el exceso de aire en el valor mínimo prescrito y el contenido de productos de combustión incompleta ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ) lo más reducido posible.

En explotación, los parámetros del vapor suministrado deben mantenerse a los valores nominales con una desviación admisible muy reducida: para presión  $\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$  y para temperatura  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Las calderas con sobrecalentador deben tener atención especial a la regulación de la temperatura de vapor sobrecalentado con la variación de carga; si la regulación se hace modificando la inclinación del quemador, se vigila el mantenimiento de la temperatura prescrita de gases de combustión a la entrada del sobrecalentador. Si la regulación se hace con inyección intermedia de agua o vapor saturado en el vapor sobrecalentado, entonces se vigila también el contenido de sales en el fluido de enfriamiento para evitar el depósito de sales en los tubos del sobrecalentador. En general, para evitar los depósitos o incrustaciones en el sobrecalentador, debe controlarse permanentemente el vapor saturado salido del domo, para que no tenga humedad inadmisibles proveniente del funcionamiento defectuoso de los separadores de humedad, espuma excesiva en el domo por sobrealimentación de agua.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

C U R S O S   A B I E R T O S

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

ENERO 30   A   FEBRERO 3

TEMA: MANTENIMIENTO CAUSAS DE FALLAS.

ING. MARTINIANO AGUILAR RODRIGUEZ.

## VII. - OPERACION

La operación de la caldera es una técnica compleja que debe seguirse con objeto de asegurar en forma continua el flujo del agente térmico necesario al consumidor con los parámetros de trabajo, además de asegurar una alta disponibilidad permanentemente de la caldera para tomar la carga.

La operación o conducción de la caldera comprende cuatro fases importantes:

- . Exámen del estado de la caldera
- . Arranque
- . Funcionamiento en régimen
- . Paro

Tomando en cuenta la complejidad de la operación necesaria en la técnica de conducción de calderas y las averías importantes que pueden aparecer por una conducción defectuosa, la explotación de la caldera debe estar reglamentada por instrucciones técnicas generales elaboradas por oficinas centrales, así como por instrucciones técnicas internas específicas de cada central.

Las instrucciones de explotación se elaboran en el marco de capacitación interna periódica de cada central, insistiendo sobre las prescripciones del fabricante de la caldera y sobre las técnicas de seguridad en el trabajo.

### 1. - INSPECCION DEL ESTADO DE LA CALDERA

La actividad de inspección del estado de la caldera se hace obligatoria antes de cada arranque cuando la caldera esté parada y fría y exista el tiempo necesario para efectuar reparaciones normales; la inspección se entiende a la instalación anexa ligada al funcionamiento de la caldera.

En esta operación, se examinan las paredes del hogar para comprobar que sean estacas, las gargantas de quemadores, la limpieza del paso de gases

los tubos de pantalla o rejilla y los fascículos convectivos para detectar eventuales fisuras o defectos en soldaduras. El examen es tanto más importante como que la mayor parte de defectos que aparecen en la caldera se deben a un proceso de paro incorrecto y aparecen con la salida de carga.

También debe verificarse la instrumentación y accesorios de la caldera; debe ponerse especial atención a los indicadores de nivel y a las válvulas de seguridad, de cuyo funcionamiento correcto depende en mayor medida la seguridad de la caldera en explotación.

La verificación de la instalación de alimentación y anexa, se hace con pruebas de corta duración (10 a 20 min) y durante este lapso se observan los aspectos mecánicos y eléctricos, así como el funcionamiento de la instrumentación y accesorios y los parámetros prescritos. Adicionalmente, en la tabla XVII-1, se indican los requerimientos de inspecciones y condiciones para el encendido de una caldera. También puede utilizarse parcialmente el listado de revisiones para la puesta en servicio del capítulo XVI.

## 2.- ARRANQUE DE LA CALDERA

Si el arranque se va a iniciar con la caldera vacía, el agua de alimentación no debe tener más de 360°K y la duración de la alimentación completa debe ser de 1 a 2 horas para evitar dilataciones no-uniformes en el sistema hervidor; después de terminar la alimentación se cierran las válvulas de venteo y se observa el nivel de agua en el indicador. Si el nivel disminuye, significa que fuga alguna válvula o el sistema hervidor no es estanco, pero si el nivel aumenta, significa que la válvula de alimentación no es hermética.

El arranque de la caldera aumenta la importancia del problema de seguridad de la instalación, como son: el enfriamiento de las superficies sin circulación interna, el encendido de quemadores, el ritmo de calentamiento y la sincronización requieren de una atención especial, debido a que son la fuente de donde pueden surgir las averías más graves de la caldera. Normalmente la caldera se arranca con el control en manual, desconec

REQUERIMIENTOS DE INSPECCIONES Y CONDICIONES PARA EL ENGENDIDO DE LA CALDERA.

NO.	PARTE	OBSERVACIONES CONDICIONES
1	Caldera	<p>Llenar a un nivel que haga innecesarias las p. gas durante la elevación de presión, siendo éste de dos cistales.</p> <p>Comprobar bombas de agua de alimentación.</p>
2	<p>a).- Sistema aceite combustible</p> <p>b).- Sistema gas combustible</p>	<p>En servicio.</p> <p>Circulando aceite combustible a temperatura controlada y a la presión mínima.</p> <p>Atomizadores limpios en su posición.</p> <p>Vapor de atomización disponible a 10.5 Kg/c</p> <p>Las dos trampas de vapor de adelante y de atr en servicio.</p> <p>Cuando los quemadores estén en su posición, abrir la válvula de aislamiento de vapor.</p> <p>Comprobar que todas las válvulas de los quemadores estén cerradas y los venteos estén abiertos.</p> <p>Compruebe la presión usando los venteos.</p> <p>Abra las válvulas de aislamiento en cada nivel de quemadores.</p> <p>La presión del gas controlada a 3 Kg/cm<sup>2</sup>. - adelante de las válvulas principales de aislamiento a quemadores.</p>
3	Sistema aire control	En servicio.
4	Sistema agua alimentación A y BP.	<p>Cargado.</p> <p>Disponible suficiente agua desmineralizada.</p> <p>Tener en cuenta las limitaciones de alimento agua fría al domo caliente.</p>
5	Precalentador de aire	Ver No. 35.
6	Ventiladores T.F.	Ver No. 34.

NO.	PARTES	OBSERVACIONES CONDICIONES.
7	T.V. hogar	Compruebe la operación del compresor y del agua de enfriamiento.
8	Válvulas de seguridad	Revise no estén amordazadas.
9	Internos domo	Revisar su ajuste.
10	Partes a presión	Revisar limpieza o programarla.
11	Venteos	Abiertos todos excepto los del economizador - (2 en el domo, 2 en los atemperadores, 1 en la salida del sobrecalentador, 1 en la entrada de recalentador y 1 en la salida.
12	Drenes paredes	Cerradas.
13	Drenes economizador	Cerrados.
14	Drenes sobrecalentador	Abiertos. - Vapor final con las dos válvulas de cada línea (2) completamente abiertas; la vula al condensador abierta 50% inicialmente. Los drenes intermedios de las dos líneas de la omega y del cabezal de entrada abiertos totalmente al principio (6 válvulas).
15	Drenes rociadores sobrecalentador	Abiertos.
16	Drenes recalentador.	Abiertos. - Compruebe los dos drenes a la entrada.
17	Drenes rociadores sobrecalentador	Abiertos. - Compruebe si no hay fugas en la válvula de rociadores con el dren abierto.
18	Drenes purgas	Cerrados.
19	Termopares	Colóquense en su posición.
20	Valvs. aislamiento princ. aliment.	Abiertas.
21	Valvs. reguladora princ. aliment.	Cerrada.
22	Valvs. aislamiento rocío sobrecalent.	Abiertas.

NO.	PARTE	OBSERVACIONES CONDICIONES
23	Valvs. reguladora rocío sobrecalent.	Cerrada.- Sistema disponible desde el BTG. Bomba de ayuda (Booster) disponible. Válvula manual de aislamiento abierta. Válvula motorizada cerrada.
24	Valvs. aislamiento rocío recalent.	Abiertas.
25	Valvs. reguladora rocío recalent.	Cerrada.- Igual que 23.
26	Instrumentos	Abiertos.- Compresores en servicio.- Soplar px los drenes los tanques de aire para quitar el -- agua. Instrumentos en funcionamiento. Gráficas de registradores en servicio.
27	Muestras	Abiertos.
28	Indicación nivel	Abierto.
29	Sistema de compuertas	Sistema hidráulico en servicio con nivel de -- aceite correcto, ajustando las compuertas. Derivadas (by-passed) ambas precalentadoras. Aire de sello a las compuertas del R.G. normal. Todos los servomecanismos de las compuertas a T.F. y R.G. en automático.
30	Interior de gases	Libre y sin escombros.
31	Exterior paso gases	Libre y sin escombros.
32	Puertas acceso paso gases	Cerradas.
33	Compuertas aislamiento: a.- Salida tiro forzado b.- Entrada Precalentador aire c.- Salida precalentador de aire d.- Recircul. Precalentador aire e.- Cajas de aire f.- Control quemadores	(Ver 29). Cerradas) En automático antes del arranque Cerradas) del T.F. (tiro Forzado). Cerradas) Cerradas. Abiertas. Posición arranque.
34	Tiro forzado (ventilador) Bloqueos (a, b, g, j) a.- Bomba aceite lubricante b.- Bomba aceite lubricante reserva	Debe dar la presión de trabajo antes arranque Debe dar la presión de trabajo antes arranque.

NO.	PARTE	OBSERVACIONES CONDICIONES
	c.- Nivel tanque aceite lub. d.- Nivel aceite lub. cojinetes. e.- Presión aceite después filtro f.- Sistema enfriamiento aceite g.- Compuertas o persianas control h.- Enfriamiento motor i.- Calentadores motor	Normal. Normal. Normal. En servicio. Cerradas (Interbloqueadas con el arrancador) En servicio. f/s Observar localmente el arranque del ventilador revisando que no haya vibraciones o fallas. Vigilar temperaturas de cojinetes de motor y ventilador en la indicación del BTG. Vigilar que el amperaje sea el normal.
35	Precalentador de aire  Inter-Bloqueos  Bombas aceite	Comprobar los niveles en el sistema de lubricación. Comprobar que la presión de las Bombas de aceite sea la normal. Comprobar que el amperaje esté dentro de los valores normales (10 amperes). Interbloqueado con ventiladores que deberán estar trabajando antes de arrancar el Precalentador y actúan como disparo del Precalentador.
36	Quemadores de aceite	Las fichas de los quemadores deberán estar completamente limpias, en perfectas condiciones, libre totalmente de defectos microscópicos y perfectamente ajustados en el dispositivo de sujeción.
37	Presión y temperatura de aceite de combustible.	La presión y la temperatura del aceite combustible deberán estar dentro de los valores de trabajo; la falta de bombas o calentadores es la causa principal que no se obtengan.
38	Aire combustión	La presión y temperatura del aire deberán estar dentro de los valores de trabajo.
39	Efectividad protección quemador por falla de flama	Deberá comprobarse mediante alguna forma apropiada rutinariamente; un método que normalmente se emplea en el de retirar manualmente el detector de falla de flama y observar re automáticamente la protección del quemador (Snuffler). Comprobar el aire de enfriamiento a los monitores de flama.

NO.	PARTE	OBSERVACIONES CONDICIONES
40	Efectividad de Operación de los dispositivos de seguridad.	<p>Comprobar que la indicación de quemadores, etc., en el BTG. no tenga fallas, por ejemplo :</p> <ul style="list-style-type: none"><li>a.- Registros abiertos (algunos pueden no estar disponibles y el sistema continuar funcionando).</li><li>b.- Válvulas de gas principal y de pilotos en frente y atrás cerradas.</li><li>c.- Venteos de gas principal y de pilotos en frente y atrás abiertos.</li></ul>

tándose la automatización.

Durante el arranque, debido a que no se tiene flujo de vapor y tampoco se consume agua, las superficies del sobrecalentador de vapor y del economizador no pueden ser enfriados por la circulación interna normal de fluido; la superficie del economizador se enfría por una recirculación continua de agua o bien por una bomba de un circuito anexo utilizado sólo en el arranque que se purga en el cabezal de salida. Para el sobrecalentador, el medio de enfriamiento puede ser vapor saturado proveniente de otras calderas. Estos sistemas de enfriamiento se ponen en funcionamiento antes del encendido de quemadores.

El encendido de quemadores es específico para cada combustible; antes del encendido, debe ventilarse (purgarse) totalmente el hogar y los conductos de gases durante un tiempo de 10 min. con la ayuda del ventilador de tiro forzado y del ventilador de tiro inducido en su caso.

El arranque de una caldera con quemadores de combustible gaseoso no es muy recomendable cuando se dispone de combustible líquido, debido a que el peligro de explosión es mayor con combustible gaseoso. El arranque con quemadores de polvo de carbón sólo puede hacerse con la ayuda de quemadores de combustible líquido.

Una vez encendido el quemador, se debe regular su flujo para asegurar un cierto ritmo de calentamiento del sistema hervidor; en consecuencia, durante el calentamiento debe limitarse la capacidad del quemador para evitar dilataciones diferentes que pueden averiar el sistema hervidor, observándose los indicadores de dilatación de los diferentes elementos.

En el caso de un calentamiento diferente ( y dilatación respectiva) en el sistema hervidor, pueden aparecer en los tubos de las paredes radiantes fisuras anulares características.

El elemento sometido a más esfuerzo durante el arranque es el domo, porque aparecen dilataciones diferentes entre la mitad inferior del domo en contacto con el agua que se calienta rápido y la parte superior que permanece relativamente fría, debido a que el vapor se produce hasta que se el

canza la temperatura de saturación. Así mismo, aparece dilatación diferente entre las zonas del domo con circulación más activa de agua y otras (en los extremos) en donde existe estancamiento de circulación; a veces; los depósitos de sales y/o lodos en los domos favorecen, por el efecto de aislamiento, la aparición de dilataciones diferentes. El seguimiento de la no uniformidad de la dilatación en el domo, se hace con indicadores de dilatación y con termopares para medir las diferentes temperaturas que aparecen en las diversas secciones y su diversa generación.

El diagrama sobre el que se hace el arranque de la caldera está dado por el fabricante en la forma de una gráfica de elevación de temperatura de saturación del agua en los tubos hervidores. La elección de criterios de etapas de arranque con variación de presión no es aconsejable, debido a que en el dominio de presión baja, a una variación pequeña de presión corresponde una variación grande de temperatura. Así mismo, el criterio de temperatura de gases de combustión en el sobrecalentador no ilustra fielmente la variación de temperatura del agua en el sistema hervidor, siendo aquella temperatura (de los gases) una función del estado de limpieza del sobrecalentador y del exceso de aire con que se hace la combustión.

El arranque de la caldera dura de 2 a 4 horas, siendo el tiempo más largo característico de calderas de fabricación más rígida. Durante el tiempo de arranque no se alimenta agua a la caldera, debido a que el nivel del agua en el domo se eleva debido a la dilatación del agua; si el nivel aumenta mucho se debe purgar la caldera. Cuando la presión llega a 1 bar, se purga el indicador de nivel y se verifica su funcionamiento.

Cuando la presión llega de 3 a 5 bar, se pasa el enfriamiento del sobrecalentador con vapor propio y se desconecta el sistema inicial de enfriamiento. Después se comienza a alimentar la caldera por su propio economizador desconectado total o parcialmente la instalación de enfriamiento de arranque, vigilando que la temperatura final del agua permanezca 20°C más baja que el límite de saturación.

Antes de conectar la carga a la caldera, se purga el domo y colector, y después se conecta la purga continua.

En los diagramas siguientes se suministra mayor información sobre la secuencia de estas maniobras como sigue:

Fig. XVII-1.- Diagrama combinado de sistemas

Fig. XVII-2.- Diagrama esquemático del sistema agua-vapor de la caldera.

Fig. XVII-3.- Secuencia de arranque del sistema agua-vapor de la caldera.

Fig. XVII-4.- Secuencia de arranque del sistema aire para combustión.

Fig. XVII-5.- Secuencia de encendido del sistema de gas combustible.

Fig. XVII-6.- Secuencia de encendido de carbón pulverizado.

Fig. XVII-7.- Secuencia de encendido de aceite combustible.

Tabla XVII-2.- Operaciones para elevar presión y cargar una caldera.

### 3.- FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA EN REGIMEN

Durante el tiempo que la caldera suministra vapor al consumidor (turbina), la preocupación básica del personal de la central es la seguridad en el funcionamiento y la economía de la instalación.

Los objetivos de operación son los siguientes:

- a.- Producción de vapor a la presión, temperatura y calidad (continuidad, economía, etc.) requerida.
- b.- Protección de los equipos
  - . Partes a presión contra corrosión, sobrecalentamiento y esfuerzos térmicos anormales.
  - . Prevención de explosivos y accidentes.

El personal de operación debe entrenarse para operar el equipo específico (tal como está instalado) y debe tener un conocimiento completo de los componentes de la planta, que incluye:

- . . . Diseño y arreglo de los componentes
- . Propósito de la instalación

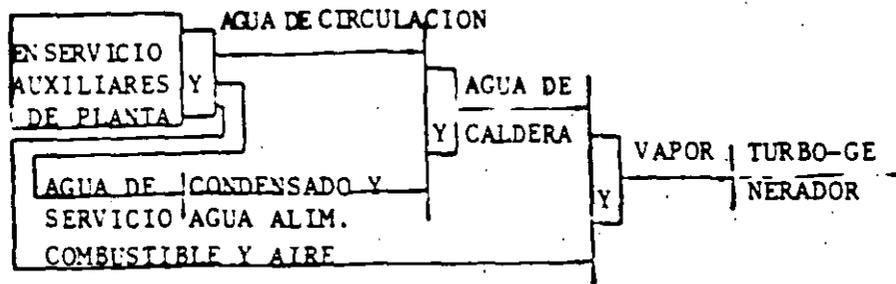


FIG. XVII-1.- DIAGRAMA COMBINADO DE SISTEMAS

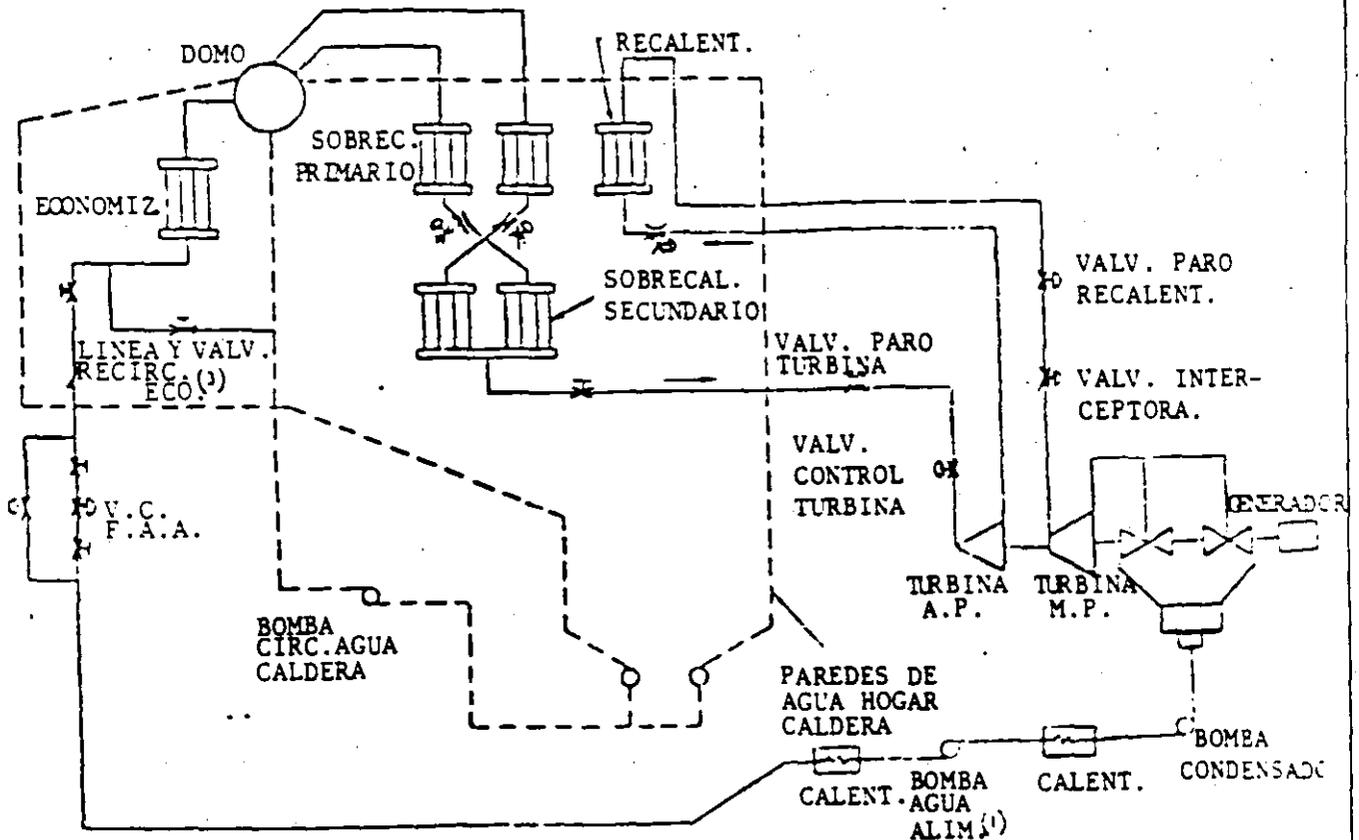


FIG. XVII-2.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL SISTEMA AGUA-VAPOR

VERIFICOS DE  
PRE-ARRANQUE  
ESPECIFICOS -  
PARA CADA -  
CALDERA

DOMOS Y CA-  
BEZALES CE-  
RRADOS.

VALVS. DRENAJE  
CALDERA CERR.

AGUA DE SERVEN  
PUERTAS ENFR.  
CON AGUA

SELO DE AGUA  
ESPESOR CENZ.

TANQUE DE ESCO-  
RIA LLENO

VALVS. CONTROL  
Y PARO  
CALDERA  
CERRADAS

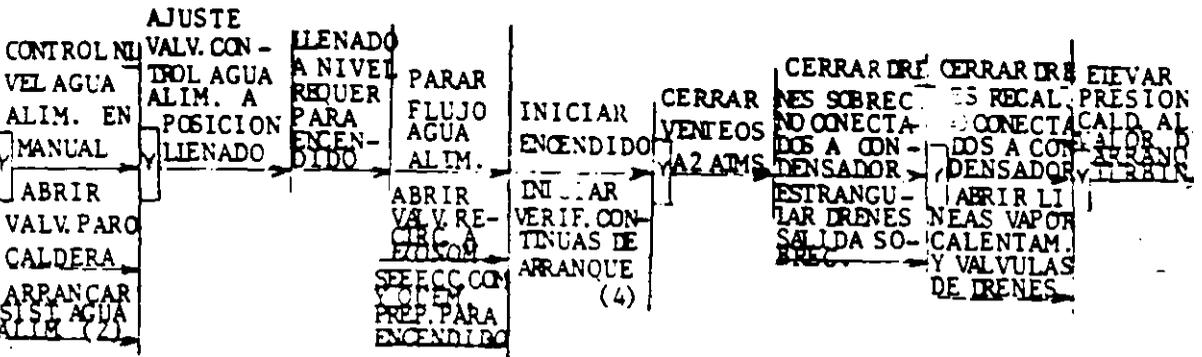
VALVS. DE VEN-  
TEO ABIERTAS

VALV. RECIRCULACION  
ECONOMIZADOR CERR.

DRENES SOBREC  
Y RECALENTA-  
DOR ABIERTOS

VALVS. AGUA  
ATEMPERACION  
A SOBREC Y RE-  
CALENTADOR  
CERRADAS

ALXILIARES  
DE PLANTA EN  
SERVICIO (1)



Continúa en  
parte infer-  
rior.

ABRIR VALV  
DRENES CA-  
BEZAL SO-  
BREC. Y  
ATEMPERA-  
DOR.

ABRIR VALV.  
PARO VA-  
POR CAL-  
DERA

RODAR Y  
SINCRONI-  
ZAR TUR-  
BO-GENE-  
RADOR (5)

CERRAR  
VALVS. DRE-  
NAJE SO-  
BREC. Y  
ROCIADOR

ELEVAR PRE-  
SION Y TEMP.  
VAPOR DE  
CALDERA  
TURBOGENE-  
RADOR AL  
NIVEL REQUERIDO  
PARA ENCENDIDO

RETIRE SON-  
DA TEMP. DE  
GAS Y DES-  
CONTINUE  
VERIFICOS  
DE ARRAN-  
QUE CLAN-  
QUE EL FLUJO  
DE VAPOR  
ADECUADO

AGUA DE  
ALIMENTA-  
CION CONTROL  
DE NIVEL  
AUTOMATICO

CONDICION DE  
AGUA NO SATIS-  
FACTORIA.

AJUSTE CAR-  
GA MANU-  
ALMENTE.

Continúa ..  
de parte superior

CERRAR  
VALVS. LI-  
NEAS DRENES  
Y RECALENTA-  
DOR

CONTROL  
DE COMBUS-  
TION EN  
AUTOMATICO

CONTROL  
DE TEMP. DE  
VAPOR EN  
AUTOMATICO

CONTROL  
DE TEMP. DE  
VAPOR EN  
AUTOMATICO

AJUSTE  
CARGA CO-  
MO PERMI-  
TAN CONDI-  
CIONES  
DE AGUA.

CONDICION DE AGUA  
SATISFACTORIA.

CERRAR  
VALV. RECIR-  
CULACION  
ECONOMIZADOR

CONTROL  
DE TEMP. DE  
VAPOR EN  
AUTOMATICO

ABRIR  
VALV. DE  
PURGA DE  
LINEAS

ABRIR  
VALV. DE  
PURGA DE  
LINEAS

PULSE  
COMO SE  
REQUIERA

PONGA CON-  
TROL DE  
CARGA EN  
AUTOMATICO

CERRAR  
VALVS. DRENES  
RECALENTA-  
DOR Y DRENAJE  
A COND.

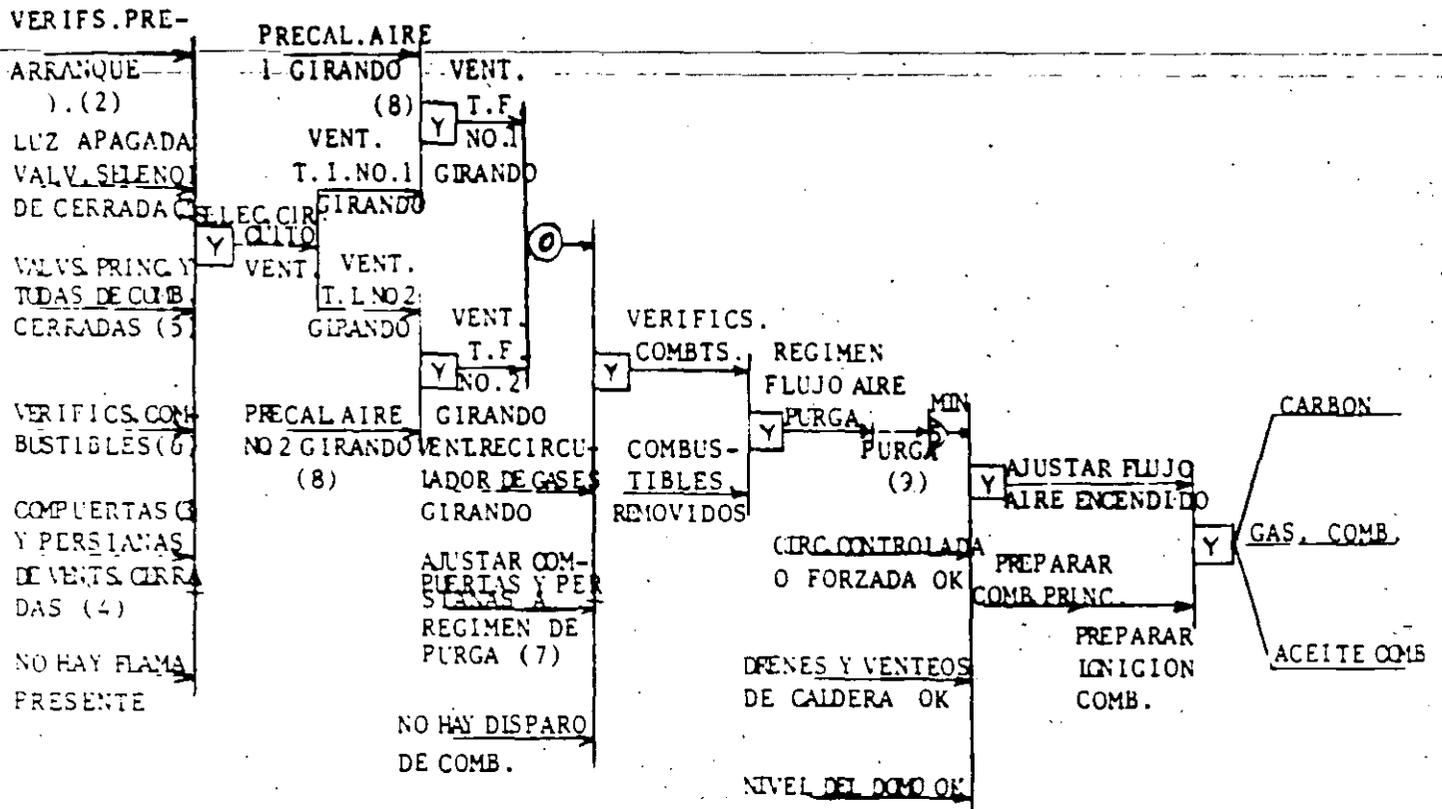
CONTROL  
DE TEMP. DE  
VAPOR EN  
AUTOMATICO

ABRIR  
VALV. DE  
PURGA DE  
LINEAS

ABRIR  
VALV. DE  
PURGA DE  
LINEAS

VERIFIQUE  
CONDICION  
DE AGUA

FIG. XVII-3.- SECUENCIA DE ARRANQUE DEL SISTEMA AGUA-VAPOR DE LA CALDERA



NOTAS:

- (1).- El hogar y paso de gases deben estar bien reparados y libres de material extraño.
- (2).- Evacuado todo el personal y cerradas todas las puertas de acceso e inspección.
- (3).- Todas las compuertas de control de flujo de aire y gases deben operarse a través de su rango completo para verificar su mecanismo de operación y luego ajustarse a una posición en que los ventiladores arranquen con un mínimo de flujo de aire y sin sobrepresionar alguna parte de la caldera.
- (4).- Todas las compuertas o registros normalmente ajustables de quemadores individuales deben operarse a través de todo su rango para verificar su mecanismo de operación y enseguida ajustarse a posición de encendido.
- (5).- Todas las válvulas de corte de combustible deben cerrarse antes de arrancar ventiladores o bombas de combustible para evitar entrada inadvertida de combustible, antes y durante el ciclo de purga.
- (6).- Debe verificarse la presencia de combustible durante el período de purga; si los ventiladores no están en operación, se deben arrancar con las compuertas y persianas cerradas. El flujo de aire, debe incrementarse lentamente hasta el régimen de purga.
- (7).- En disparo de caldera con los ventiladores en operación, debe disminuirse lentamente el flujo de aire hasta el régimen de purga.
- (8).- Si el precalentador de aire se para cuando se dispara la caldera, se debe reestablecer tan pronto como sea posible; para evitar que se "pegue" debido a expansión no mientras está parado. Cuando el flujo de aire se mantiene a más de 25% para el arranque, el precalentador de aire puede arrancarse antes del encendido iniciado en todos los combustibles.
- (9).- Cuando el régimen de flujo de purga se ha mantenido por un mínimo de tiempo de 5 minutos, el disparo maestro de combustible puede restablecerse e iniciar el encendido.

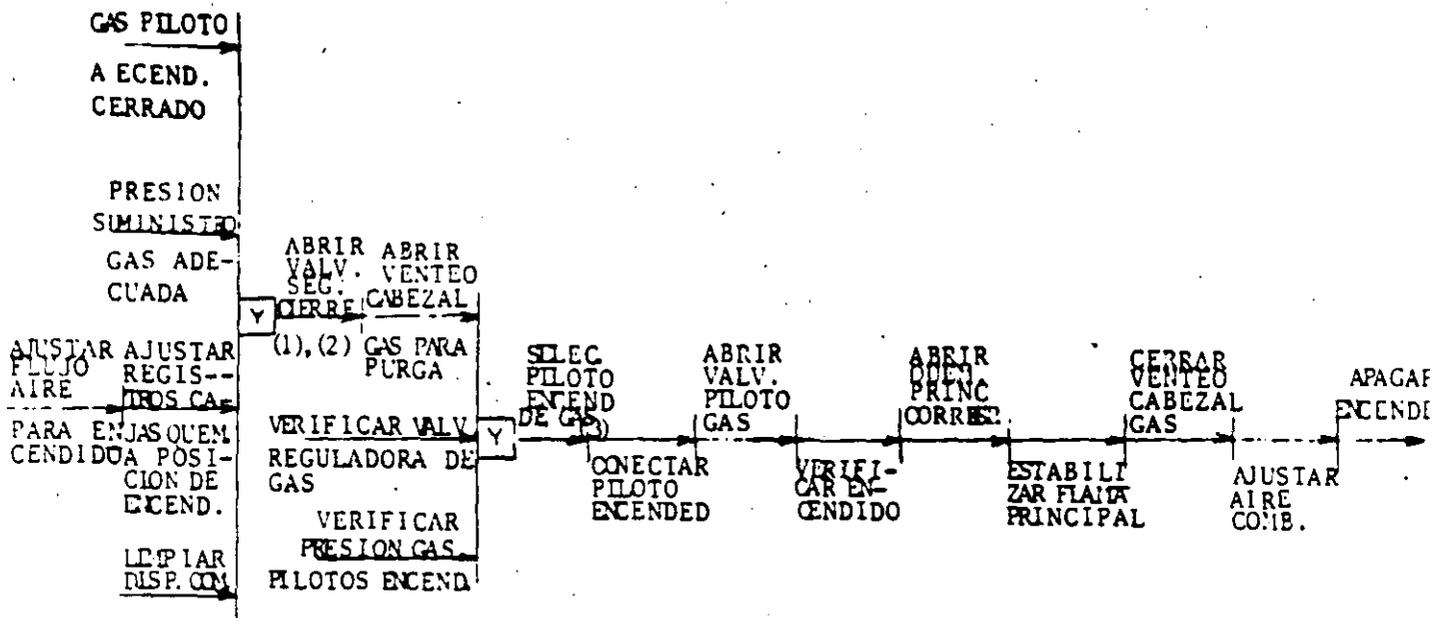


FIG. XVII-5.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DEL SISTEMA GAS COMBUSTIBLE

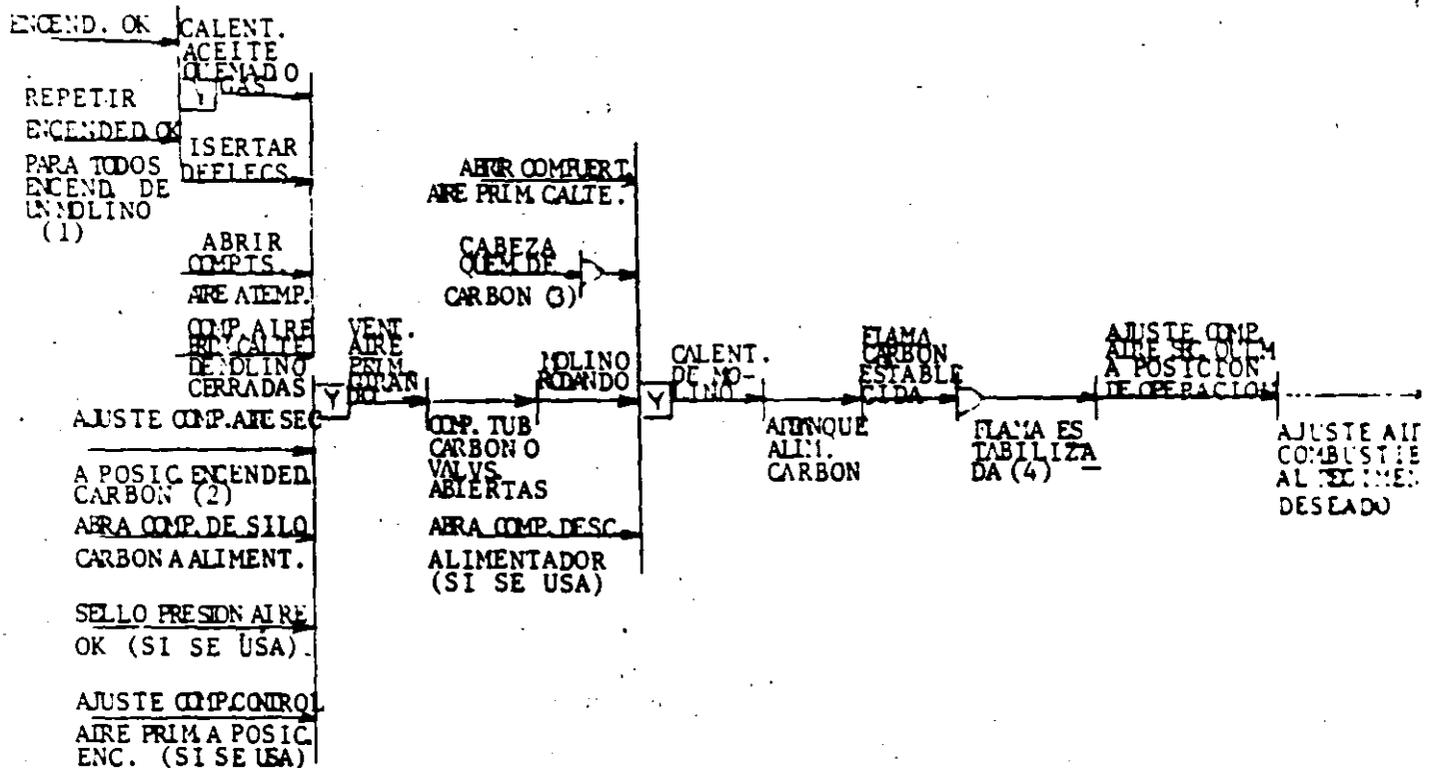


FIG. XVII-6.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DE CARBON PULVERIZADO

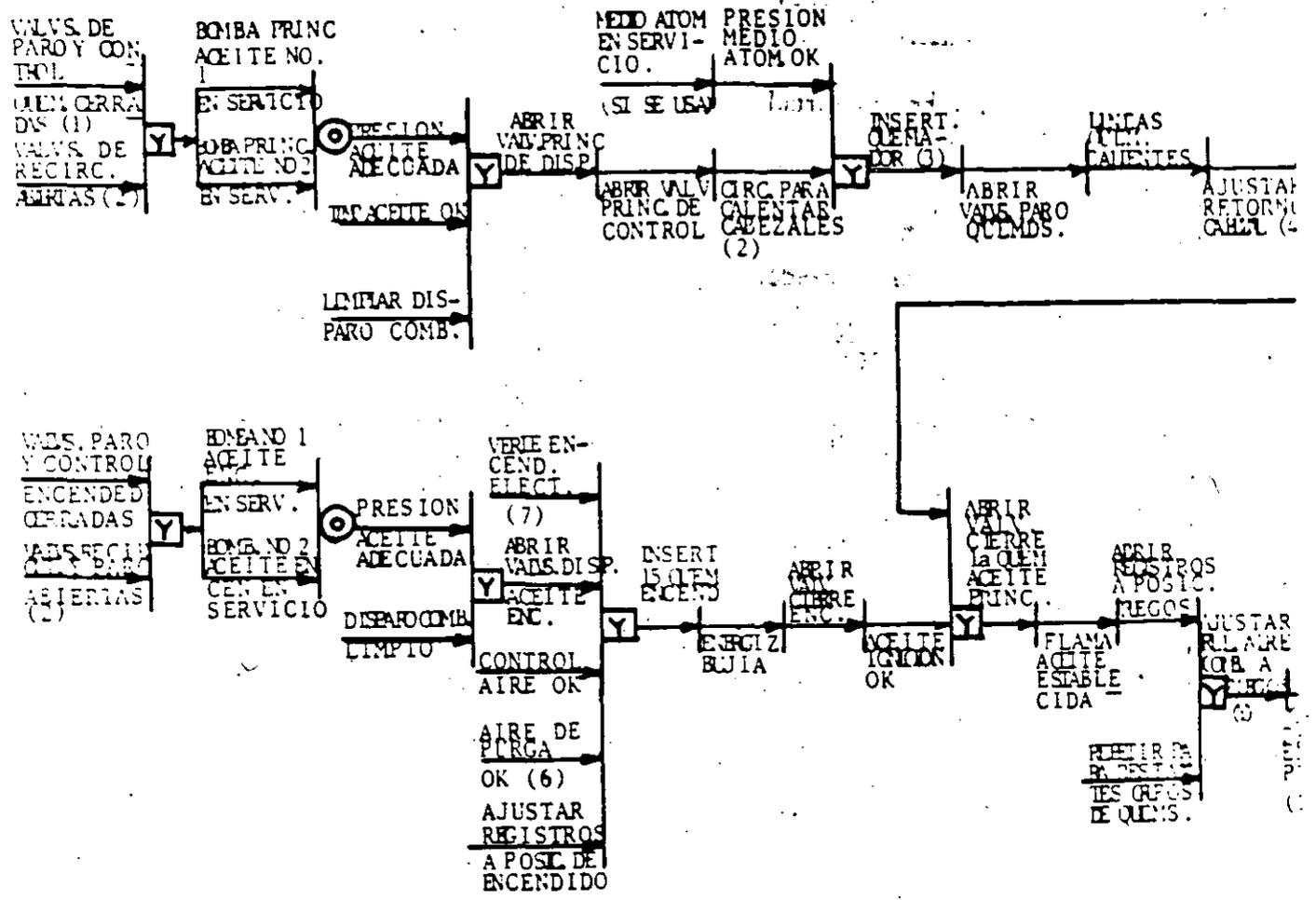


FIG. XVII-7.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DE ACEITE COMBUSTIBLE

## OPERACIONES PARA ELEVAR PRESIÓN Y CARGAR UNA CALDERA

NO.	OPERACION	OBSERVACIONES
1	Arrancar bomba circulación caldera	Ventearla completamente
2	Arrancar bomba aceite lub. Precalentador aire	Comprobar sistema aceite lub.
3	Arrancar Precalentador aire	En caso que sea del tipo rotatorio escuche si no hay rozamientos en los sellos y en caso que roce compruebe el relevador de sobre-carga si no hay peligro de disparo, porque en caso de estar bien alineados los sellos, únicamente se necesitará igualar temperaturas en todo el Precalentador. Si está interbloqueado con el T.I., se cambiará la secuencia.
4	Arranque vent. T.I.	Si hay adecuada interconexión del paso de gases puede elevarse la presión con T. I.
5	Abrir compuertas control T. I. ligeramente	Obréngase la presión en el hogar recomendable (aprox. 0.25 cm H <sub>2</sub> O)
6	Arranque ventilador T.F.	
7	Abrir compuertas control T.F. ligeramente	Obréngase la presión en las cajas de aire recomendada, que deberá estar de acuerdo con la del hogar
8	Abrir compuertas recirc. T. F.	Abranse hasta que el motor del ventilador de T. F. alcance su carga nominal.
9	Comprobar temperatura y presión - aceite combustible	Estos valores deberán estar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante el tipo de combustible y tipo de atomización.

NO.	OPERACION	OBSERVACIONES
10	Purga caldera	Se hará de acuerdo con el sistema automático de bloqueos, o bien aplique la mitad del flujo de aire de máxima carga para asegurarse que no haya vapores, polvo ó gases combustibles.
11	Encender quemadores aceite	Debe cumplirse previamente el programa de ignición de encendedores de acuerdo con el fabricante. Al encender los quemadores compruebe que la flama es limpia y brillante, sin humos ó extremos rasgados.
12	Elevación presión	<p>En general las limitaciones son las siguientes:</p> <p>a. -Menos de <math>7\text{Kg/cm}^2</math> - <math>55^\circ\text{C/hora}</math></p> <p>b. -Arriba de <math>7\text{Kg/cm}^2</math> - <math>55^\circ\text{C/hora}</math></p> <p>c. -Arriba de <math>28\text{Kg/cm}^2</math> - Puede incrementarse la velocidad siendo normalmente la limitación la temp. del metal del sobrecalentador.</p> <p>*Debido a dificultades de circulación ó limitación de esfuerzos en el domo, en algunas ocasiones se requieren menos de <math>55^\circ\text{C/hora}</math>.</p> <p>d. -Temp. diferencial domo-<math>55^\circ\text{C}</math> (mas)</p> <p>e. - " metal tubo -<math>55^\circ\text{C}</math></p> <p>f. -Diferencia max. temp. entre bombas circulación cald. en operación y reserva - <math>50^\circ\text{C}</math></p>
13	Drenes sobrecalentador y recalentador	Cíerrense a $3.5\text{ Kg/cm}^2$

14	Vencos	Círrrense a 5 Kg/cm <sup>2</sup>
15	Valva de recirculación economizador	Círrrense cuando empieza la alimentación a la caldera.
16	Tuberías vapor (a turbina)	Es recomendable elevar la presión y temperatura conjuntamente a la caldera y tener el turbo-generador en tornaflecha en esta etapa, por si existen fugas en la valv. de paro
17	Nivel agua caldera	Normalmente se habrá elevado al principio, debiendo empezar la alimentación cuando empiece a bajar usando la válvula auxiliar de alimentación hasta que la principal quede dentro de la gama de operación.
18	Turbo-generador	En esta etapa puede rodarse y sincronizarse.
19	Drenes tubería vapor	Deben cerrarse cuando el turbo-generador haya tomado carga. Es recomendable medir el flujo de drenes necesario para el enfriamiento del sobrecalentador para no consumir más agua en los arranques.
20	Rociadores atemperador	Arránquese antes de que se necesite el atemperador, porque de otra forma el control de temperatura será errático.
21	Cambio a control automático	Debe hacerse tan pronto como la carga que de entro de los valores de control, iguala de las señales del control manual al control automático para tener una transferencia sin oscilaciones.
22	Soplado	Sóplense los precalentadores de aire tan pr

NO.	OPERACION	OBSERVACIONES
23	Control Flama	<p>to como la carga es suficientemente alta para dar una razonable estabilidad a la flama; el soplado se efectúa para evitar que elementos del Precaalentador se incendien.</p> <p>Esto es necesario durante todas las etapas de elevación de presión y producción de vapor, debiendo evitarse toque partes metálicas ó refractarios controlándose ésto por medio del aire primario y secundario; el aire primario debe tener suficiente velocidad para evitar el apagado del quemador y limpiar las fichas de éstos sin alargar demasiado la flama.</p>
24	Control temperatura	<p>Por razones de seguridad y económicas es muy importante un buen control de temperatura de vapor.</p> <p>Bajas temperaturas pueden ser causadas por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a.-Proporcionado incorrecto de superficies de transferencia de calor.</li> <li>b.-Exceso de aire insuficiente</li> <li>c.-Temp. agua alimentación alta</li> <li>d.-Depósitos lado gases en sobrecalentador</li> <li>e.-Falla sistema control temperatura</li> </ul> <p>Altas temp. pueden ser causadas por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a.-Proporcionado incorrecto de superficie de transferencia de calor</li> <li>b.-Paredes del hogar sucias</li> <li>c.-Exceso de aire excesivo</li> </ul>

NO.	OPERACION	OBSERVACIONES
25	<p>Control temp. recalentador</p>	<p>d. Arranque tarde de atemperador  e. Falla sistema control temperatura.</p> <p>Además del aspecto económico para evitar el uso de rociadores en el recalentador debe considerarse el hecho de que incrementa la carga de empuje de la turbina.</p>