

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
 CURSOS ABIERTOS
 GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS
 Del 31 de Enero al 4 de Febrero de 1994.

FECHA	HORARIO	TEMA	PROFESOR
Lunes 31	9.00 - 12.00	Introducción	M. Aguilar
	12.00 - 14.00	Sist. de Aliment. de Combustibles	
	16.00 - 17.00	Hogar (Hornos)	
	17.00 - 19.00	Quemadores	
Martes 1o.	9.00 - 11.00	Combustibles	M. Castillo
	11.00 - 14.00	Combustión	
	16.00 - 17.00	Combustión	
	17.00 - 19.00	Tratamiento químico y muestreos	
Miércoles 2	9.00 - 11.00	Circulación del Agua	A. Planchú
	11.00 - 14.00	Instrum. Control o Reg. y Prot.	
	16.00 - 19.00	Control de la Efic. de Comb. y Calderas	
Jueves 3	9.00 - 11.00	Operación	A. Planchú
	11.00 - 14.00	Mantenimiento, causas de fallas	
	16.00 - 19.00	Tratamiento químico y muestreos	M. Castillo
Viernes 4	9.00 - 12.00	Control de contaminación en calderas	M. Castillo
	12.00 - 13.00	Ventiladores (y bombas)	
	13.00 - 14.00	Otros equipos, partes, aux. y acc.	M. Aguilar
	16.00 - 19.00	Otros equipos, partes, aux. y acc.	

EVALUACION DEL PERSONAL DOCENTE

CURSO: GENERADORES DE VAPOR
O CALDERAS

FECHA: 31 de Enero al 4 de Febrero'94

		DOMINIO DEL TEMA	EFICIENCIA EN EL USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	MANTENIMIENTO DEL INTERES (COMUNICACION CON LOS - ASISTENTES, AMENIDAD, FA- CILIDAD DE EXPRESION)	PUNTUALIDAD	
CONFERENCISTA						
1	M. AGUILAR					
2	M. CASTILLO					
3	A. PLANCHU					
ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10						

EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

SU EVALUACION SINCERA NOS AYUDARA A MEJORAR LOS PROGRAMAS POSTERIORES QUE DISEÑAREMOS PARA USTED:

CURSO: GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

Del 31 de Enero al 4 de Febrero de 1994.

T E M A		ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL TEMA	GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL TEMA	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO EN EL TEMA	UTILIDAD PRACTICA DEL TEMA
1	Introducción				
2	Sist. de Aliment. de Combustibles				
3	Hogar (Hornos)				
4	Quemadores				
5	Combustibles				
6	Combustión				
7	Tratamiento químico y muestreos				
8	Circulación del Agua				
9	Instrum. Control o Reg. y Prot.				
10	Control de la Efic. de Comb. y Calderas.				
ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10					

EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

SU EVALUACION SINCERA NOS AYUDARA A MEJORAR LOS PROGRAMAS POSTERIORES QUE DISEÑAREMOS PARA USTED.

CURSO: GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

Del 31 de Enero al 4 de Febrero del 94.

T E M A		ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL TEMA	GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL TEMA	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO EN EL TEMA	UTILIDAD PRÁCTICA DEL TEMA	
11	Operación					
12	Mantenimiento, causas de fallas...					
13	Tratamiento químico y muestreos					
14	Control de Contaminacion en calderas					
15	Ventiladores (y Bombas)					
16	Otros equipos, partes, aux. y acc.					
ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10						

EVALUACION DEL CURSO

3

C O N C E P T O		
1.	APLICACION INMEDIATA DE LOS CONCEPTOS EXPUESTOS	
2.	CLARIDAD CON QUE SE EXPUSIERON LOS TEMAS	
3.	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO EN EL CURSO	
4.	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
5.	CONTINUIDAD EN LOS TEMAS DEL CURSO	
6.	CALIDAD DE LAS NOTAS DEL CURSO	
7.	GRADO DE MOTIVACION LOGRADO EN EL CURSO	
EVALUACION TOTAL		

ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10

1.- ¿Qué le pareció el ambiente en la División de Educación Continua?

MUY AGRADABLE

AGRADABLE

DESAGRADABLE

2.- Medio de comunicación por el que se enteró del curso:

PERIODICO EXCELSIOR
ANUNCIO TITULADO DE
VISION DE EDUCACION
CONTINUA

PERIODICO NOVEDADES
ANUNCIO TITULADO DE
VISION DE EDUCACION
CONTINUA

FOLLETO DEL CURSO

CARTEL MENSUAL

RADIO UNIVERSIDAD

COMUNICACION CARTA,
TELEFONO, VERBAL, ETC.

REVISTAS TECNICAS

FOLLETO ANUAL

CARTELERA UNAM "LOS
UNIVERSITARIOS HOY"

GACETA
UNAM

3.- Medio de transporte utilizado para venir al Palacio de Minería

AUTOMOVIL
PARTICULAR

OTRO MEDIO

4.- ¿Qué cambios haría en el programa para tratar de perfeccionar el curso?

5.- ¿Recomendaría el curso a otras personas?

SI

NO

6.- ¿Qué periódico lee con mayor frecuencia?

7.- ¿Qué cursos le gustaría que ofreciera la División de Educación Continua?

8.- La coordinación académica fué:

EXCELENTE

BUENA

REGULAR

MALA

9.- Si está interesado en tomar algún curso INTENSIVO ¿Cuál es el horario más conveniente para usted?

LUNES A VIERNES
DE 9 a 13 H. Y
DE 14 a 18 H.
(CON COMIDA)

LUNES A VIERNES
DE 17 a 21 H.

LUNES A MIERCOLES
Y VIERNES DE
18 a 21 H.

MARTES Y JUEVES
DE 18 A 21 H.

VIERNES DE 17 a 21 H.
SABADOS DE 9 a 14 H.

VIERNES DE 17 A 21 H.
SABADOS DE 9 a 13 H.
DE 14 a 18 H.

OTRO

10.- ¿Qué servicios adicionales desearía que tuviere la División de Educación Continua, para los asistentes?

11.- Otras sugerencias:



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

NOCIONES GENERALES

ING. M. AGUILAR R.

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

I. NOCIONES GENERALES

1. 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, directamente en procesos, o bien, para propósitos de calentamiento.

El diseño de los generadores de vapor o calderas considera 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 únicamente al recipiente contenedor de agua y a las superficies 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 siguientes partes principales, algunas de las cuales se muestran 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 aislamiento, 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.

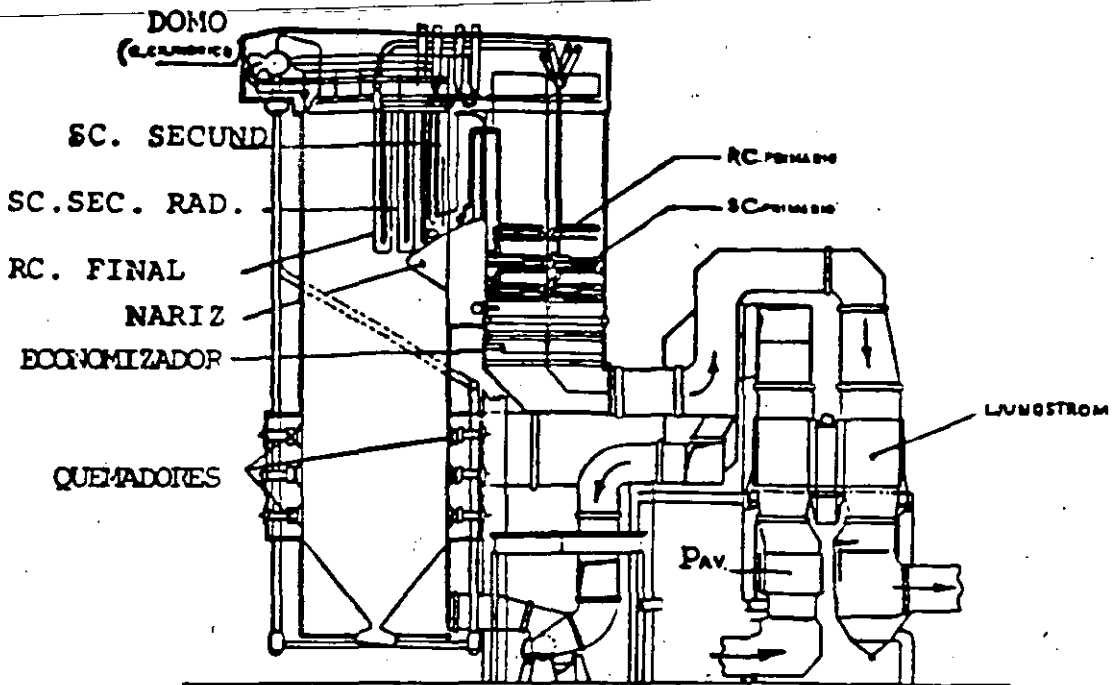


FIG. I-1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UN GENERADOR DE VAPOR

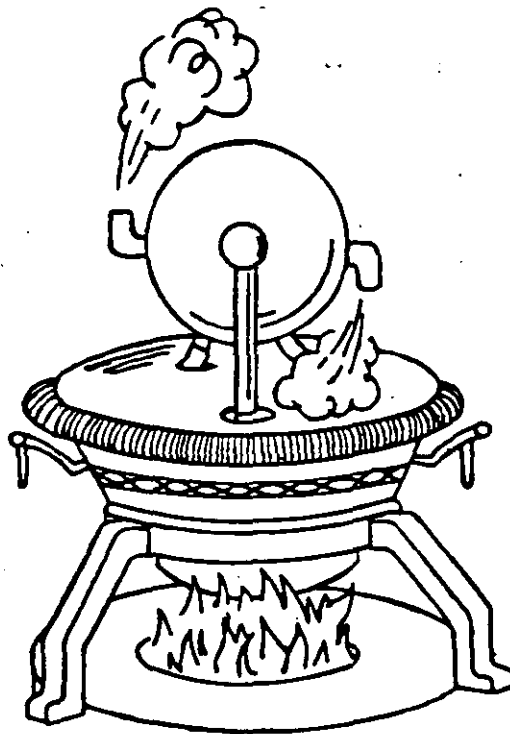


Fig. I-2 - Esquema de la máquina de Hero de Alejandria

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.

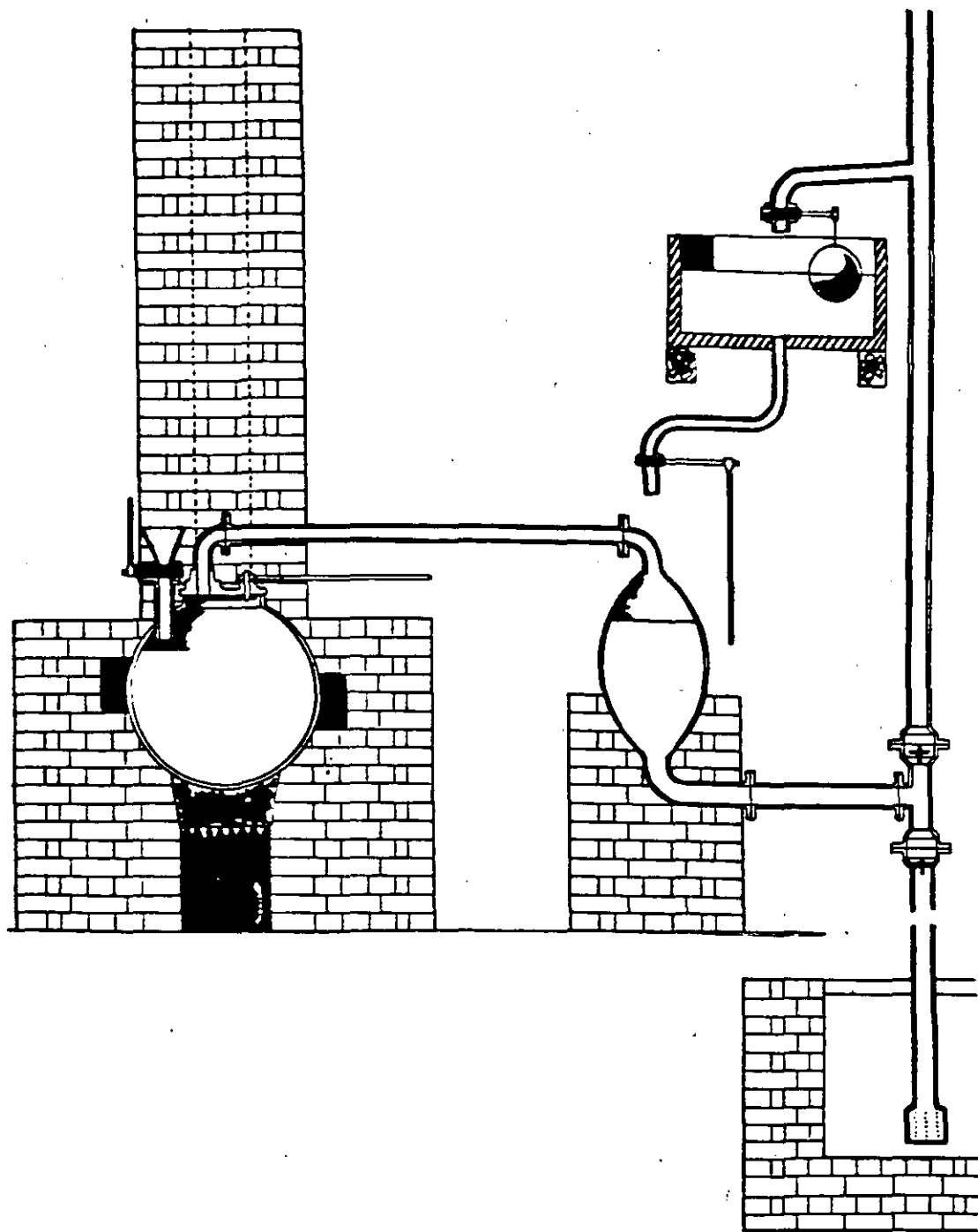
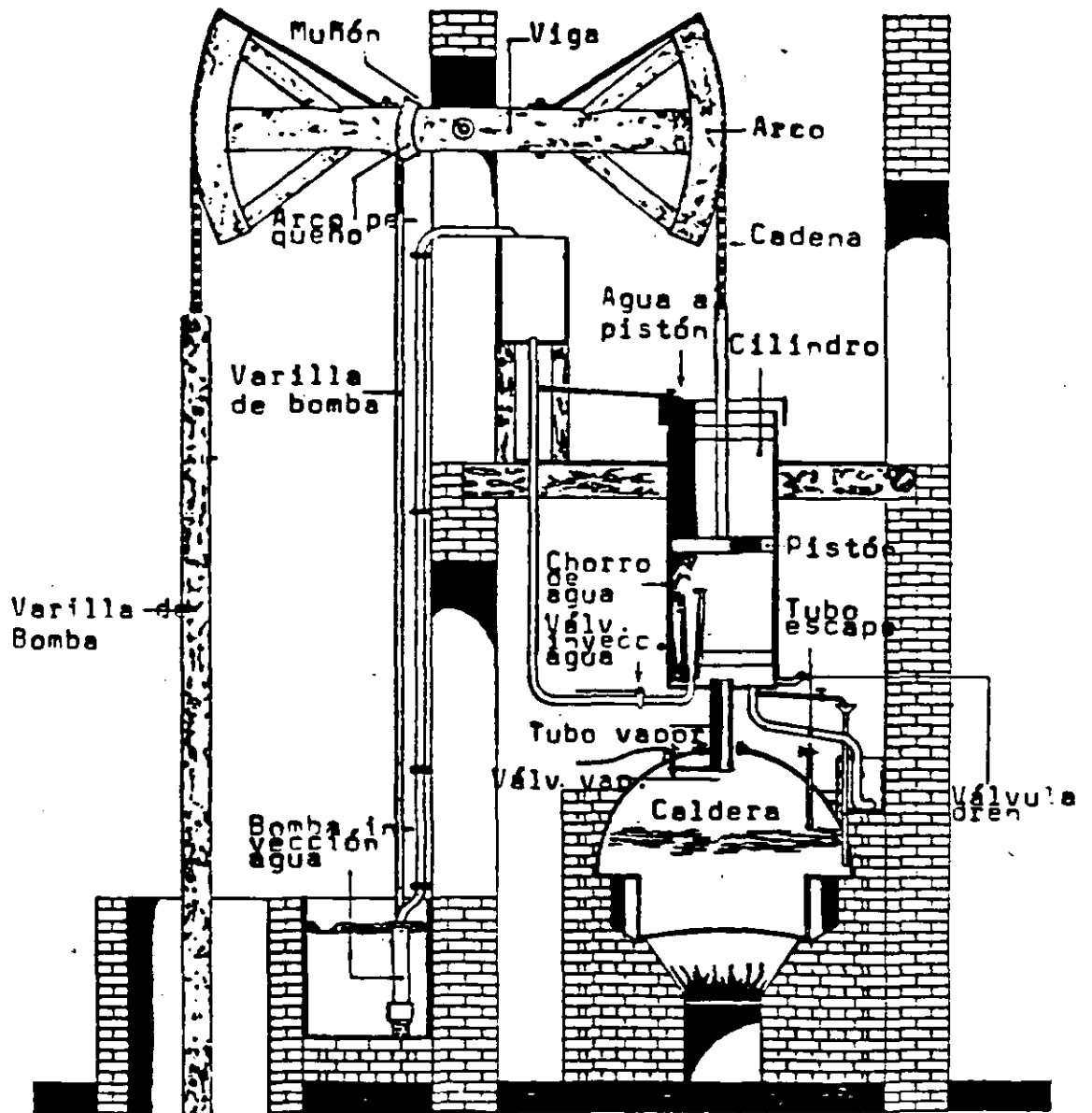


Fig-3 Máquina de T. Savery para Bombeo de Agua (1699)



FIGHA 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 Fig1-5 para convertir el movimiento rotativo.

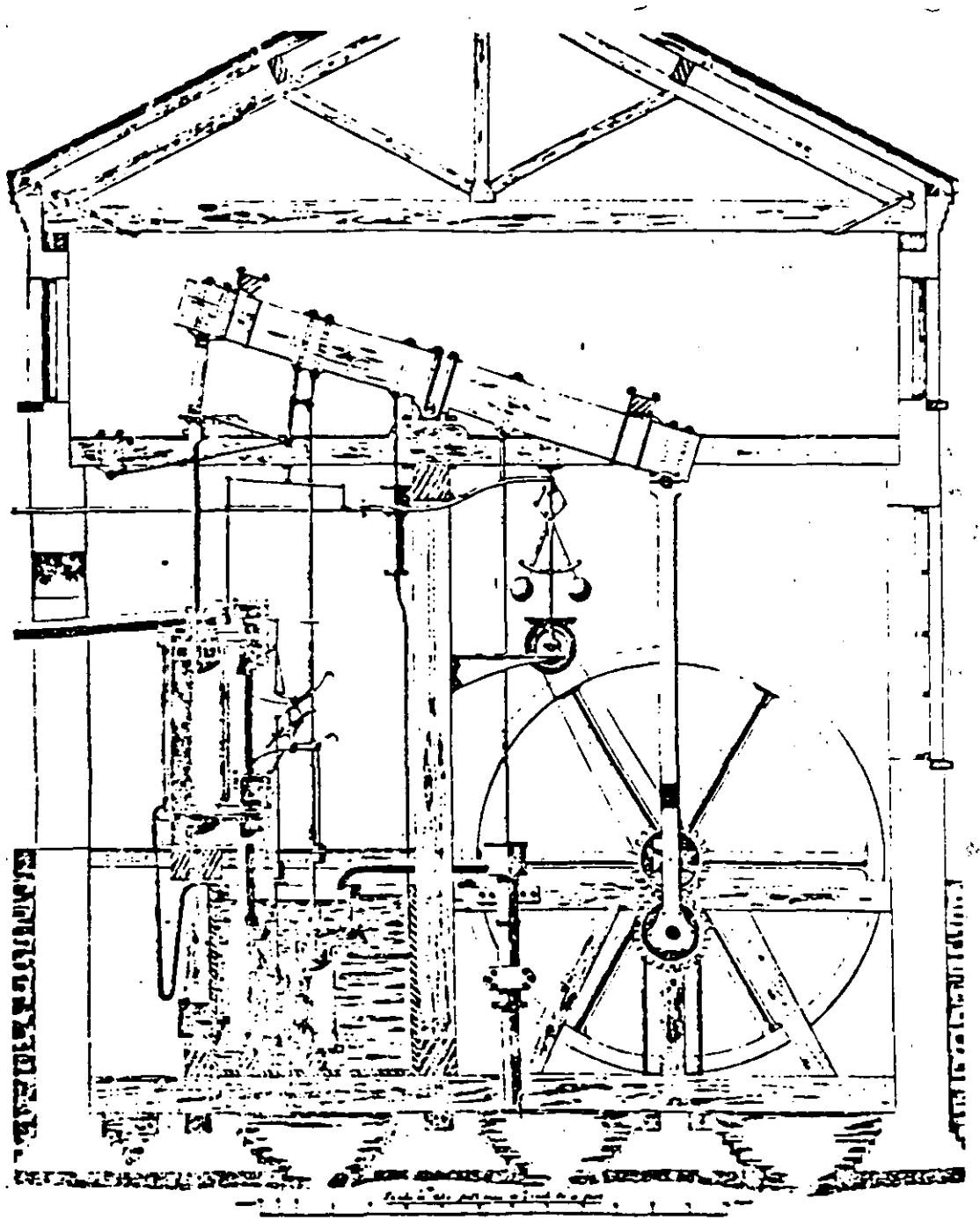


FIG. 15 Máquina de James Watt de Doble Acción, Rotativa (1788)

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 esta 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 expuesta 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 mitad del de la cubierta y la "lancashire", Fig1-7, 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.

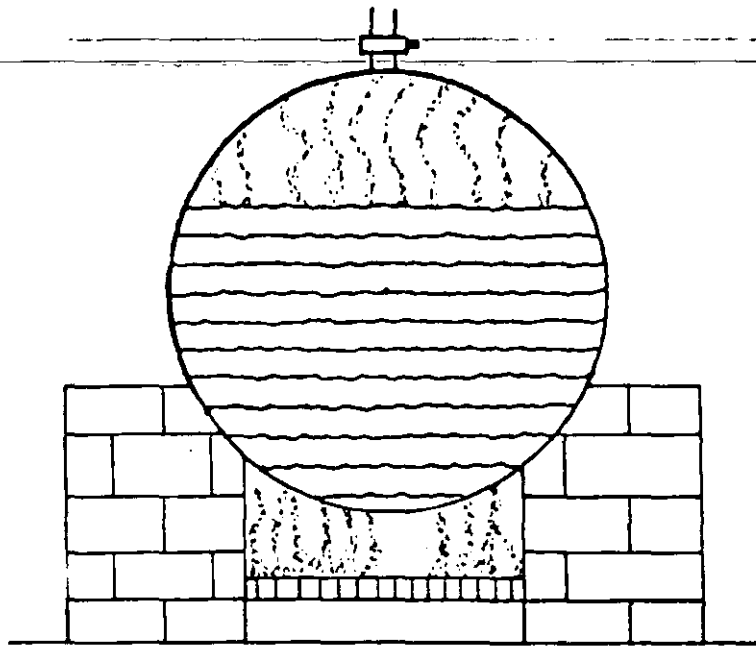
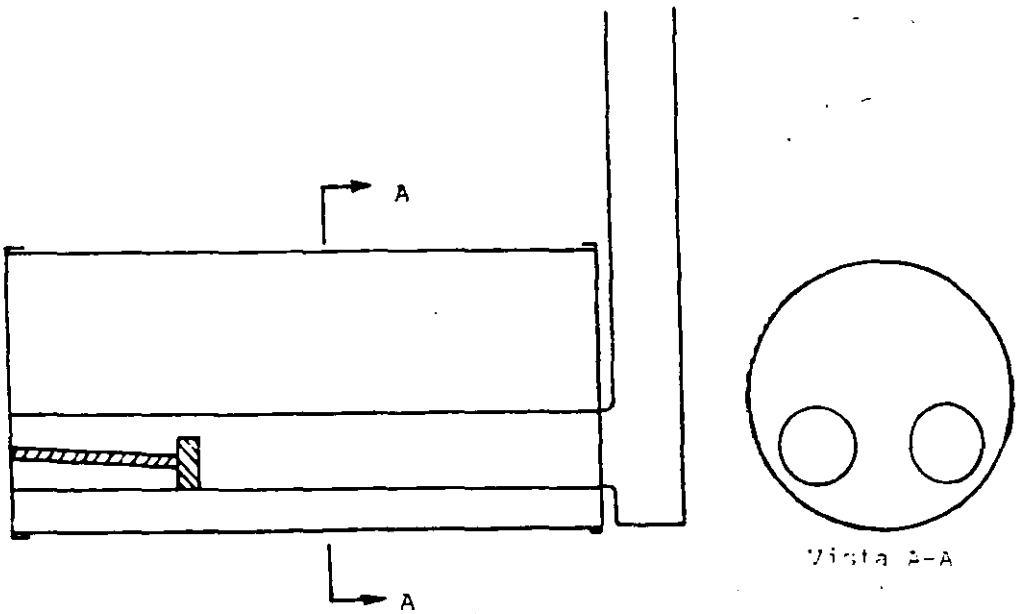


Fig.I-6 PRIMERAS CALDERAS (NEPCOMEN)



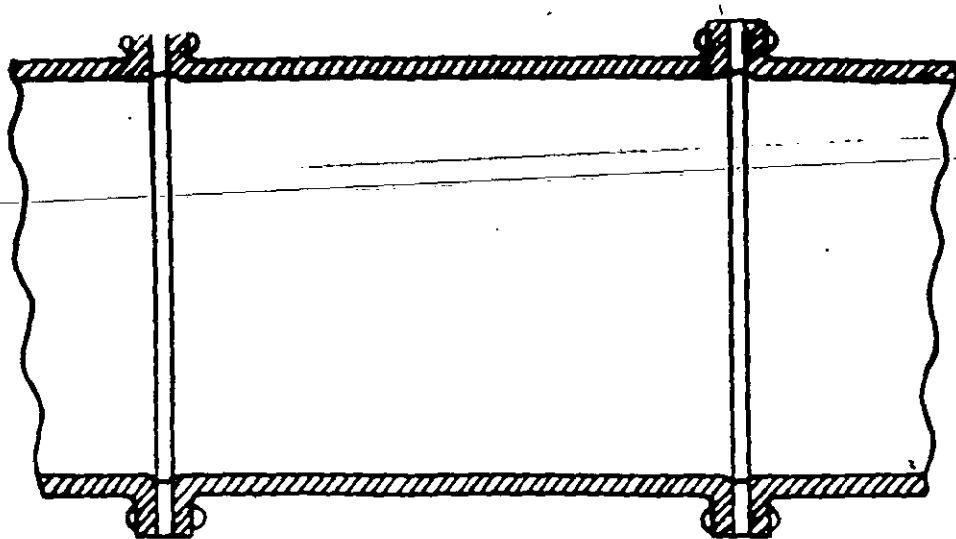
FigI-7 CALDERA DE DOBLE HOGAR (LANCASHIRE)

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

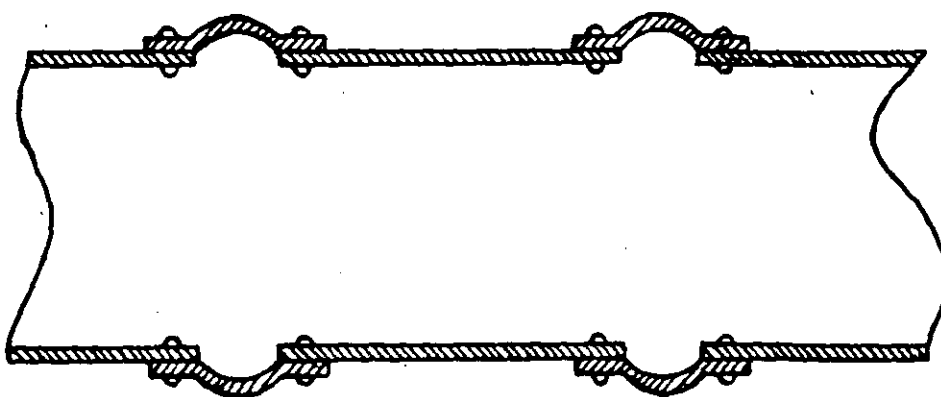
- a.- Dividiendo el hogar plano en secciones con bridas, uniéndolas con remaches y empleando empaques de anillos de hierro suave calafateado
- b.- Empleando también secciones planas, unidas con una sección de convolución de diámetro ligeramente mayor
- c.- Utilización de tubo corrugado para el hogar, 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 (FigI-9) y la siguiente inovación fue la de inclinar los tubos de humo (FigI-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:

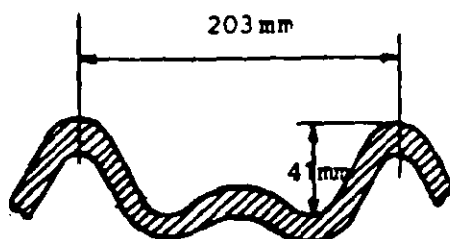
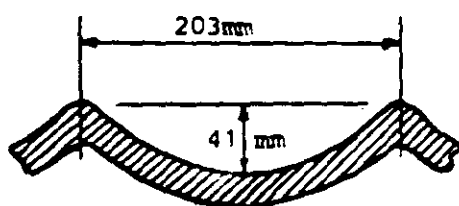
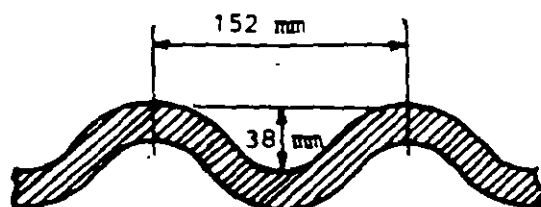
- . Calderas para locomotoras de George Stephenson
- . Calderas de parte posterior seca (dry back), primer ejemplo para el desarrollo del patrón -



a. Adamson

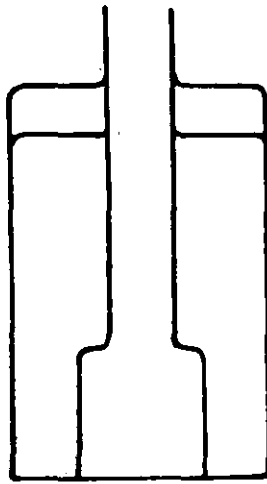


b. Abombado

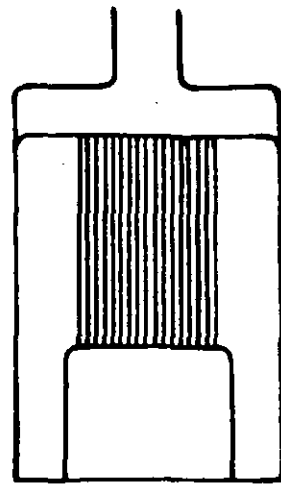


c. Sección corrugada

Fig-8 FORMAS DE TUBOS DE HOGAR



a. tubo central



b. multitubular

Fig 9 CALDERAS VERTICALES

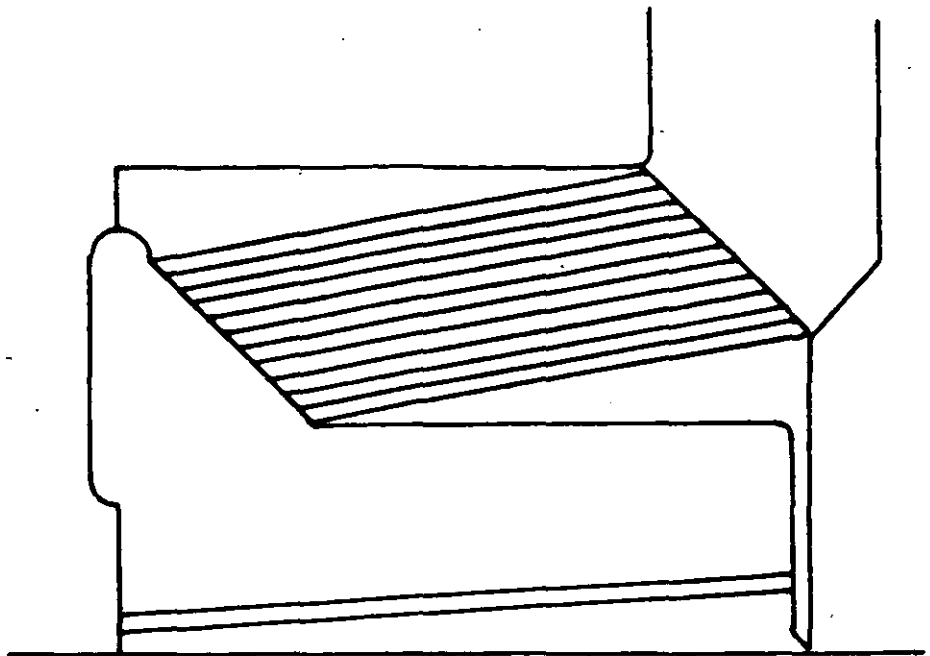


Fig-10 CALDERA VERTICAL CON TUBOS DIAGONALES

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 mas grandes y se enfriaban mas los gases para obtener un mejor rendimiento del combustible, éste se quemó mas 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 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 kg/cm^2 (60 psig) y fue entonces

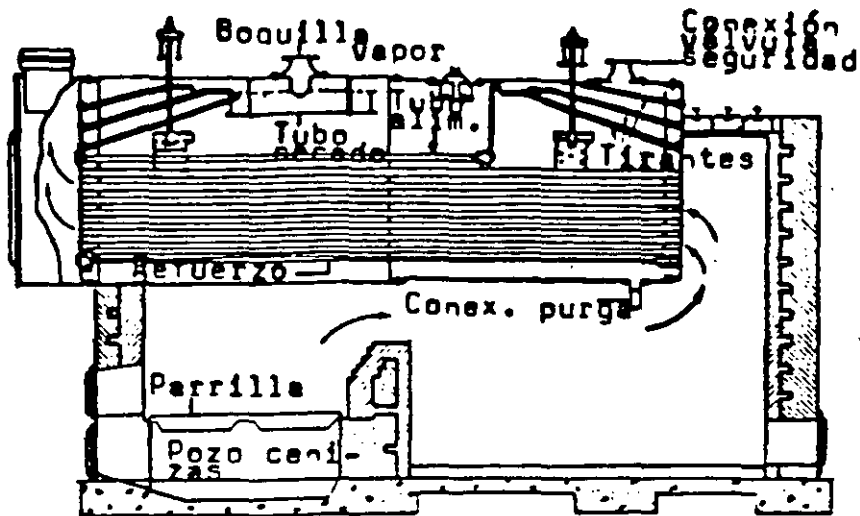


FIG.I-11 Sección de Caldera de Retorno Horizontal Tubular (HRT)

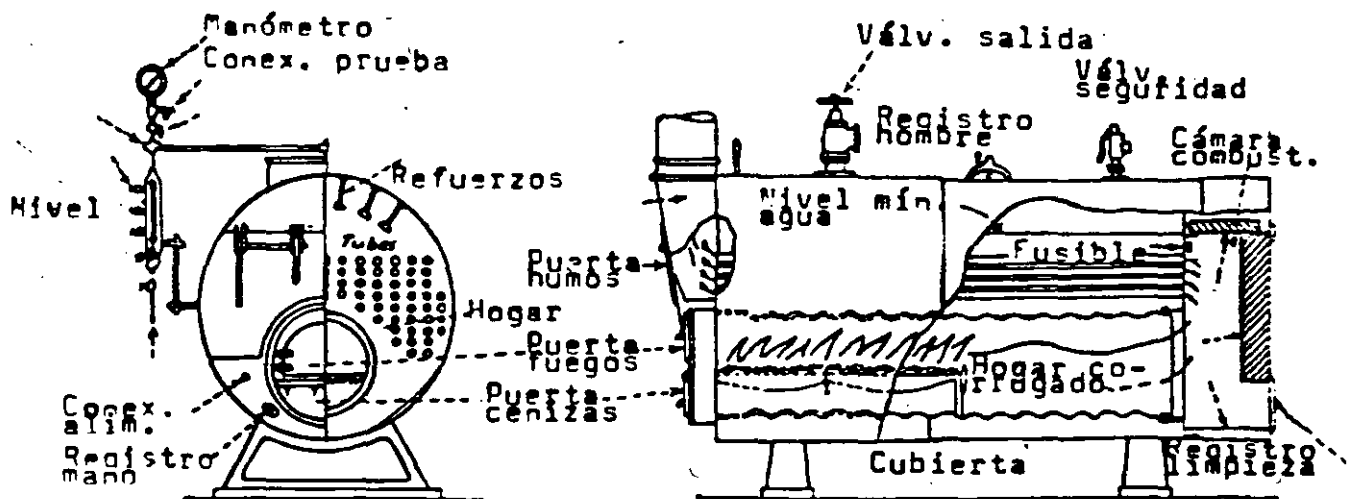


FIG.I-12 Caldera Escocesa Marina, de Fondo Seco, dos pasos de gases y Hogar Corrugado

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 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 kg/cm^2 se elevaron a 46 kg/cm^2 (650 psig) y después a 70 y 85 kg/cm^2 (1000 y 1200 psi), lo que requirió modificaciones en los métodos de fabricación, en la siguiente forma:

- . de 46 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.

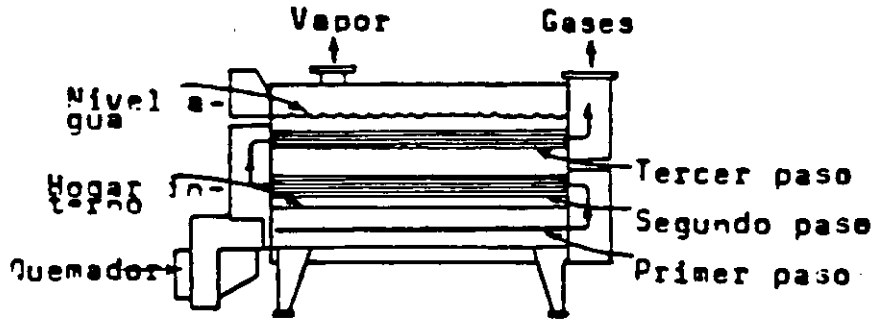
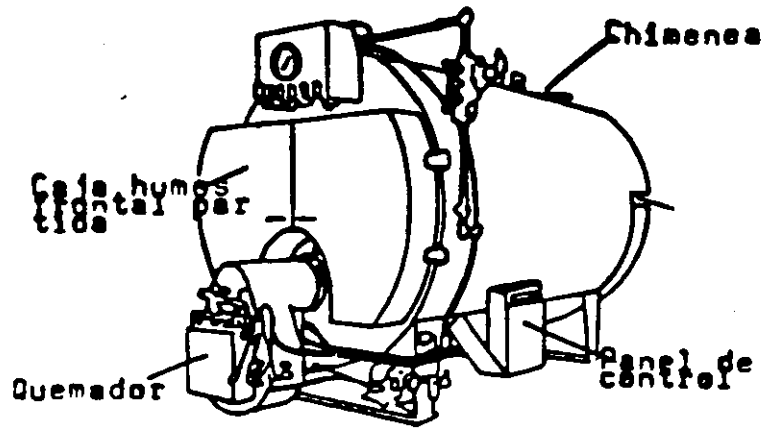
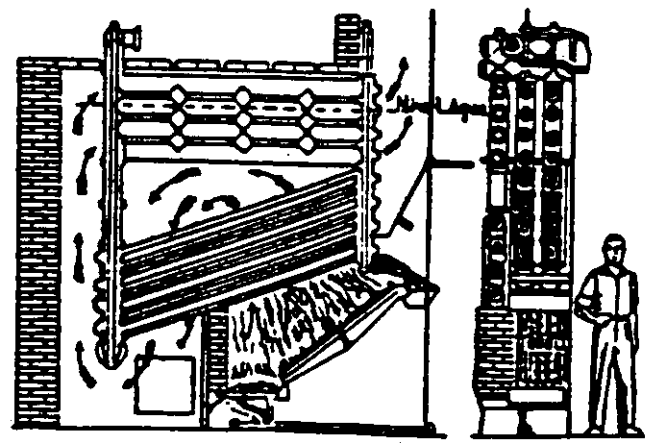
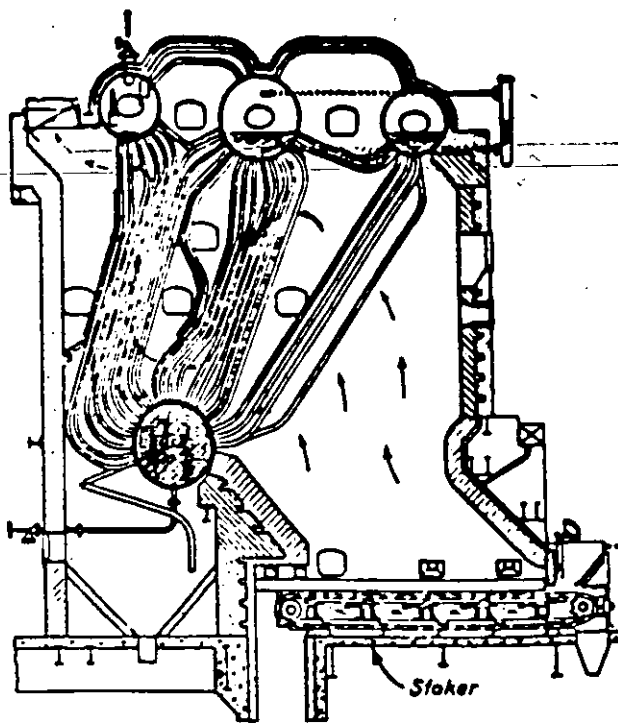


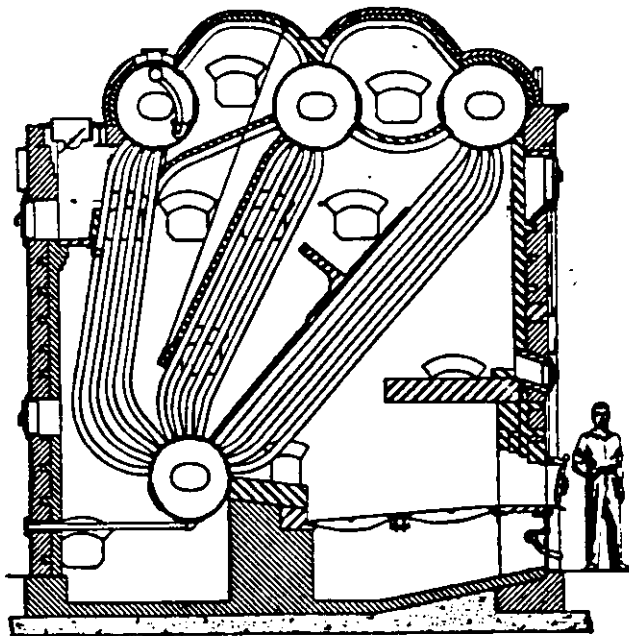
FIG1-13 Caldera Escocesa Marina Moderna de Fondo Seco y tres pasos de gases



FigI-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**

**CURSOS ABIERTOS
GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS**

COMBUSTIBLES

ING. M. CASTILLO

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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 combustible (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°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 (CH_4) y que usualmente contiene algo de etano (C_2H_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 ₂	-	10 a 15%
	CH ₄	-	2 a 2.5%
	C ₂ H ₄	-	0.5%
	CO	-	22 a 30%
	N ₂	-	47 a 57%
	CO ₂	-	3 a 8.3%
	O ₂	-	0.2%
	PCI	-	1150 a 1600 kcal/m ³

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

b.- Gas de Alto Horno

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

c.- Gas de Horno de Coke

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

d.- Gas Natural

Compuesto principalmente por CH₄ (metano) 90% aproximadamente y con un PCI de 9400 kcal/m³.

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>m³/kg</u>	<u>Kcal/m³</u>	<u>m³ aire/m³ gas</u>
Hidrógeno (H)	11.11	3106	2.41
Monóxido de carbono (CO)	0.80	3088	2.39
Metano (CH ₄)	1.40	9370	9.57
Etileno (C ₂ H ₄)	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 ya 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 parafínicos, asfálténicos 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 las 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

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

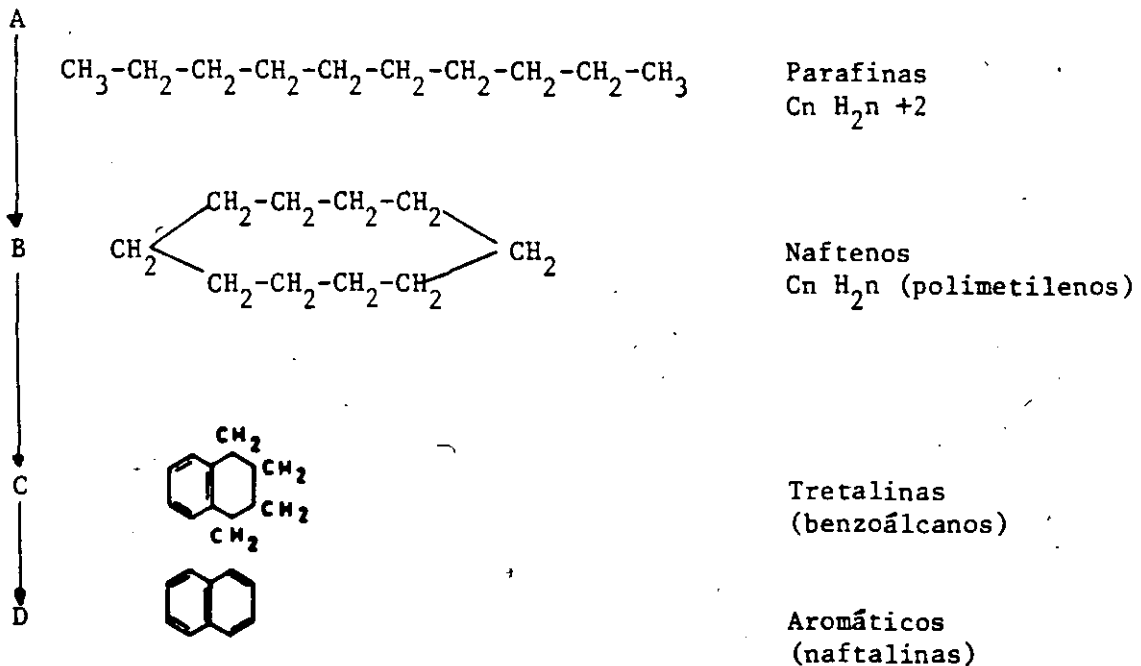
Normalmente en México el contenido de C del combustóleo varía de 82 a 84% y el H₂ del 13 al 15%; el S puede llegar al 4%. En algunos países que carecen de petróleo y que disponen de abundantes plantas y materias vegetales se utilizan al alcohol como combustible. Los principales alcoholes utilizados son: el alcohol etílico (C₂H₆O), obtenido de granos; el alcohol metílico (CH₄O), obtenido de madera; el alcohol butílico (C₄H₁₀O) y el alcohol propílico (C₃H₈O).

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 refinerías 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 refinería 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

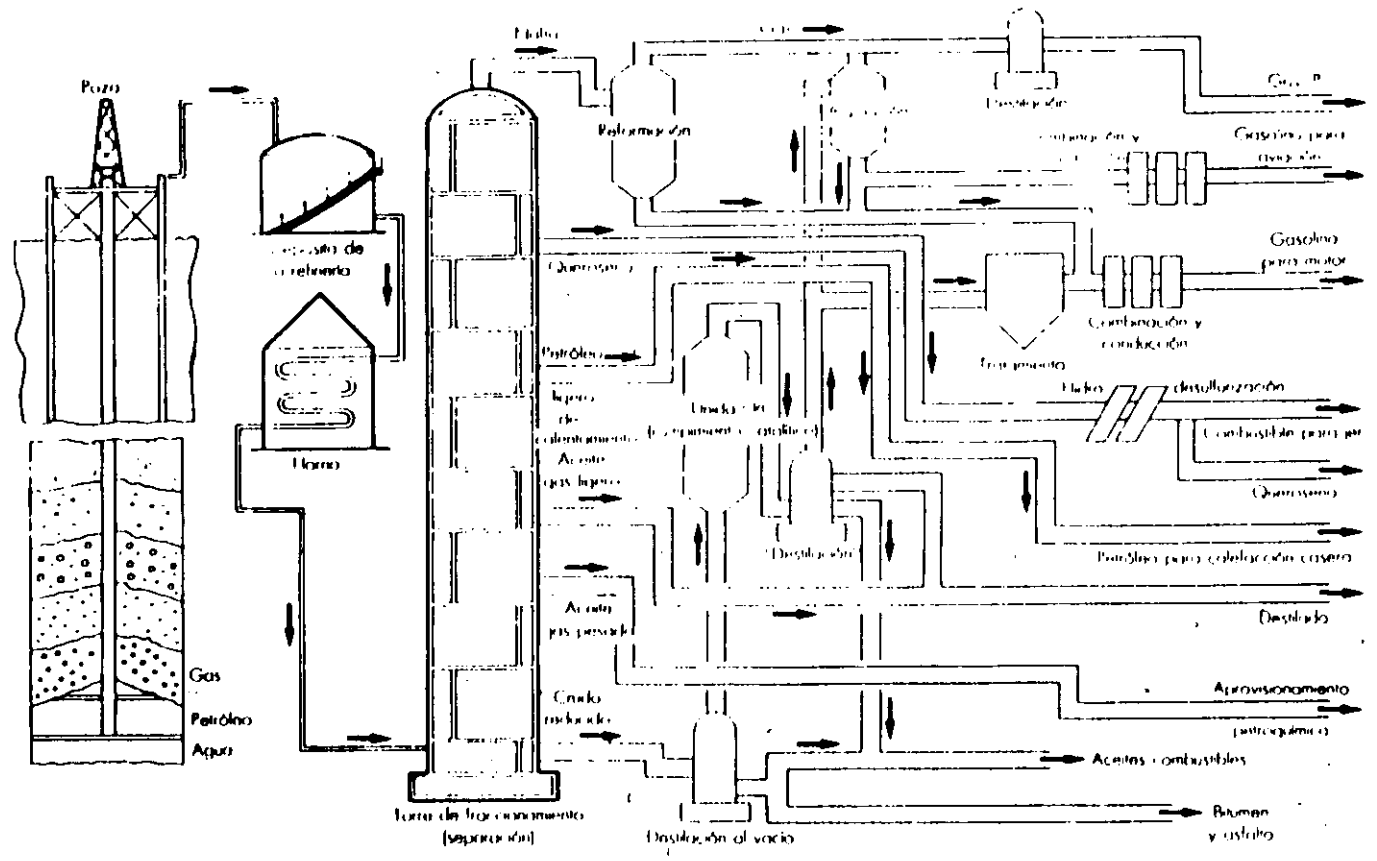


Figura . Diagrama de una refinería donde se muestran productos típicos.

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	165	—
Poder calorífico inf., kcal/kg	10.450	10.400	10.300	10.000	9700	9000	7750

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

Calidad del aceite	Punto de inflamabilidad °C	Punto de deslizamiento °C	Agua y sedimentos % en volumen	Residuo carbonico en el 10% del residuo %	Cenizas % en peso	Destilación			Viscosidad Saybolt segundos				Viscosidad cinemática centistokes				Viscosidad Engler a 30 °C	Densidad grados API	Peso específico 15 °C / 15 °C	Prueba de corrosión sobre cobre	Azufre máx % a1	
						10 %h °C		90 %h °C		Universal a 1R °C		Fornla 50 °C		a 30 °C		a 50 °C						
						máx	mín	máx	mín	mín	máx	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	Indicis	0,15	—	215	—	280	—	—	—	—	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)	330	(12,6) e)	(37,9)	—	—	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	55	-7	0,50	—	0,10	—	—	—	45	125	—	—	(5,8)	(26,4)	—	—	(1,47)	(3,64)	—	—	—	sin límite
n. 5 (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	(23)	(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 1,8 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, ‰	—	—	0,50	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 1-10 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 ³	0,82	0,83	0,90	0,94	0,95
máx kg/dm ³	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 - desplazárlas. 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

FRANCIA

U.S.A.

INGLATERRA

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 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 - - desciende 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 las chimeneas y ductos. Dada la temperatura del hogar y los humos, estos 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 Combustible Calor específico según la Temp.

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

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, bago 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**

**CURSOS ABIERTOS
GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS**

COMBUSTION

ING. M. CASTILLO

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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 CO_2 , H_2O y SO_2 ; además de los productos de oxidación, se obtienen en los gases de combustión 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 volumen 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 volumen 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 en 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.

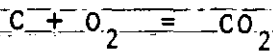
En la realidad no se alcanza la temperatura anterior, debido a las siguientes causas:

- 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.

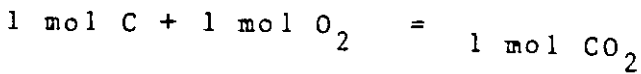
Las leyes que gobiernan la transmisión de calor y el transporte de masa controlan en muchos casos el proceso, ya que las reacciones químicas son generalmente mucho más rápidas, la mezcla del combustible con oxígeno determina la velocidad total del conjunto en algunos casos.

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.

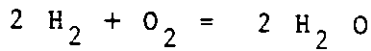


$$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 44 \text{ kg}$$

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

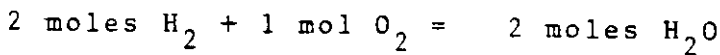


$$1 \text{ vol.} + 1 \text{ vol.} = 1 \text{ vol.}$$

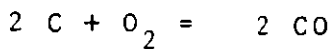


$$4 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 36 \text{ kg}$$

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

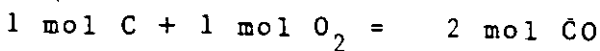


$$2 \text{ vol.} + 1 \text{ vol.} = 2 \text{ vol.}$$

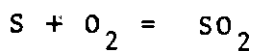


$$24 \text{ kg.} + 32 \text{ kg} = 56 \text{ kg}$$

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

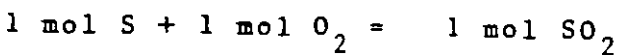


$$2 \text{ vol} + 1 \text{ vol.} = 2 \text{ vol.}$$

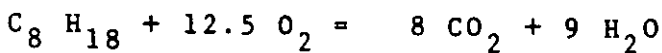


$$32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 64 \text{ kg}$$

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

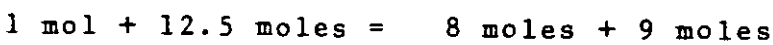


$$1 \text{ vol} + 1 \text{ vol} = 1 \text{ vol}$$



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

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



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

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.

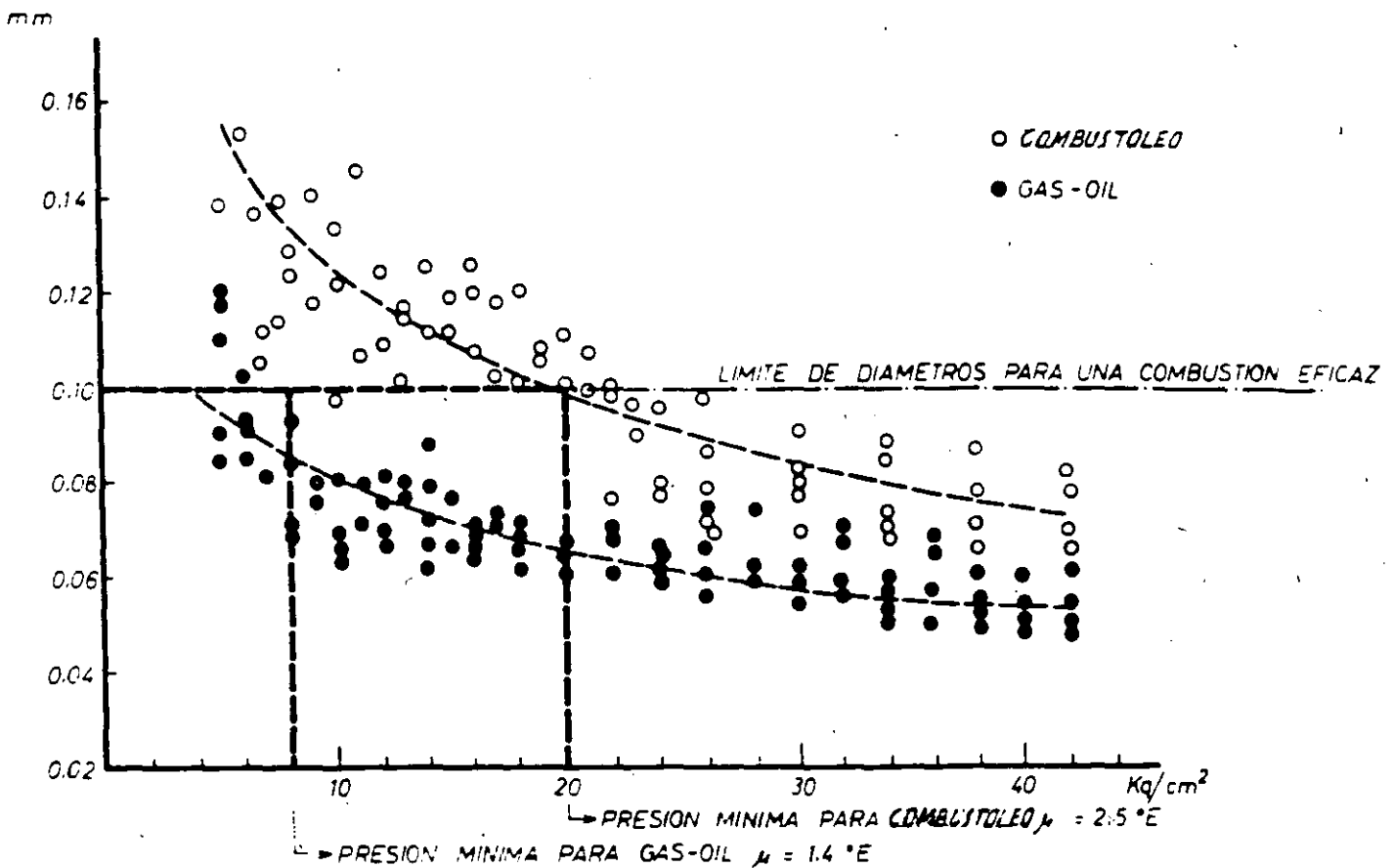
La subdivisión del aceite combustible conocida como atomización, se efectúa mecánicamente por medio de presión o bien por medio de un fluido auxiliar (vapor o aire), en la

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 volúmen y características cinéticas muy diversas entre sí.

RELACION DE LOS DIAMETROS DE PULVERIZACION CON LA PRESION



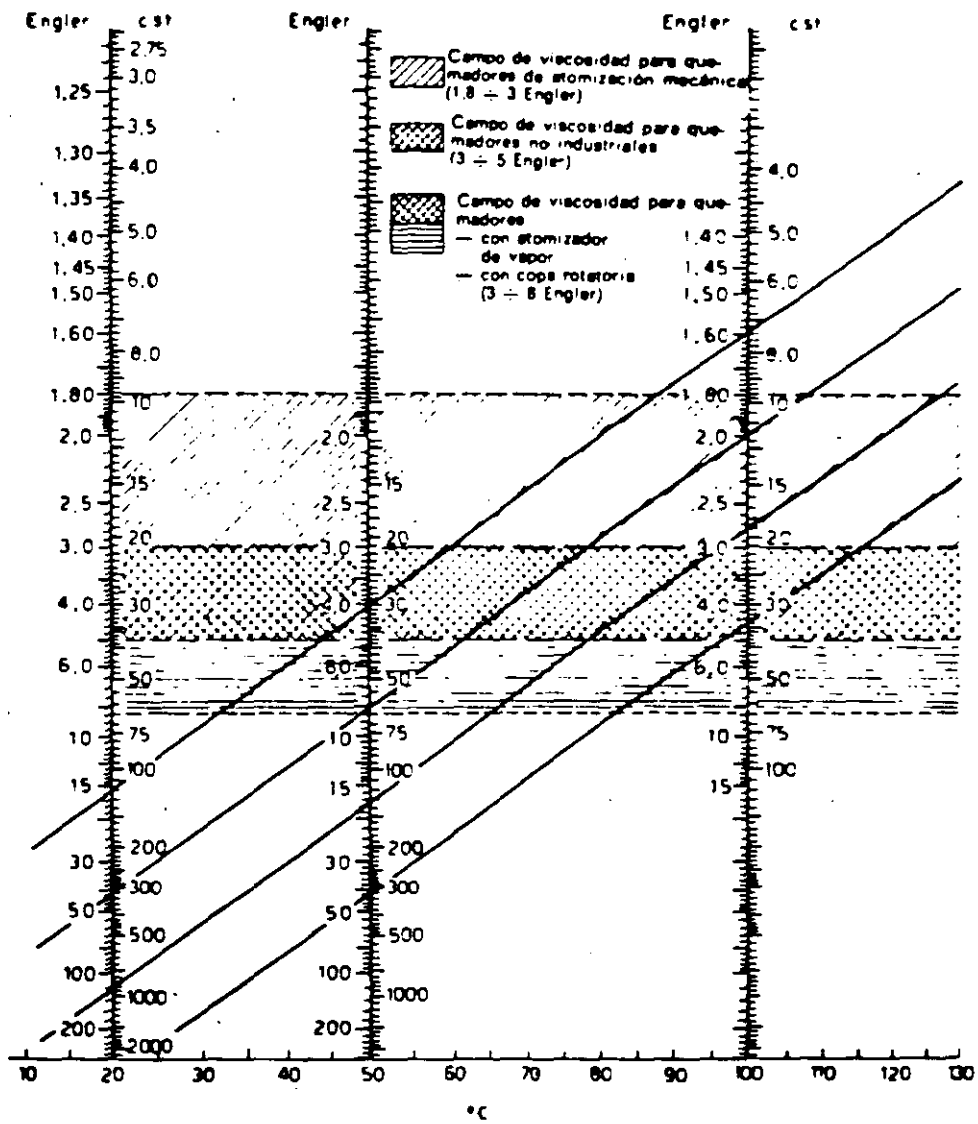


Fig . —Variaciones de la viscosidad de los aceites combustibles con la temperatura: las líneas oblicuas se refieren a algunos aceites típicos. Las zonas de puntos delimitan los campos de viscosidad referente al empleo, en condiciones óptimas, de los diversos tipos de quemadores industriales

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:

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

$$A_t = 8.89C + 26.77 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.33S, \text{ en m}^3$$

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 ³ de comb.		Por Kg de combustible.				Por m ³ de combustible.			
			kg	m ³	kg	m ³	kg O ₂	kg N ₂	m ³ O ₂	m ³ N ₂	kg O ₂	kg N ₂	m ³ O ₂	m ³ N ₂
C (12)	C + O ₂ (12 + 32)	CO ₂ (44)	3.667	1.867	-	-	2.667	8.8	1.867	7.02	-	-	-	-
S (32)	S + O ₂ (32 + 32)	SO ₂ (64)	2.0	0.7	-	-	1.0	3.31	0.7	2.61	-	-	-	-
H ₂ (2)	2 H ₂ + O ₂ (4 + 32)	2 H ₂ O (36)	9.0	11.19	0.804	1.0	8.0	26.48	5.6	21.10	0.713	2.36	0.5	1.88
CO (28)	2 CO + O ₂ (56 + 32)	2 CO ₂ (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 ₄ (16)	CH ₄ + 2O ₂ 16 + 64 subdividido: C + O ₂ 2H ₂ + O ₂	CO ₂ + 2 H ₂ 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 ₂	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 ₂ 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 ₂ H ₄ (28)	C ₂ H ₄ + 3O ₂ 28 + 96 subdividido: 2C + 2O ₂ 2H + O ₂	2CO ₂ + 2H ₂ 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 ₂	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 ₂ 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

CO₂

O₂

N₂

H₂O (en forma de vapor)

En los combustibles que contienen azufre (S), se tienen además SO₂ y SO₃.

En la combustión estequiométrica, se emplea 1 m³ de O₂ para la combustión de un m³ de carbono y se obtiene como producto de combustión 1 m³ de CO₂, pero como el O₂ se obtiene del aire atmosférico que está constituido por 21% de O₂ y 79% de N₂ en volúmen (23.13% de O₂ y 76.87% de N₂ en peso), resulta que un combustible que no contenga Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre deberá producir gases de combustión compuestos de 21% de CO₂ y 79% de N₂ en volúmen. Como en la práctica el combustible no sólo está constituido por C, el valor máximo de CO₂ en los gases de combustión nunca llega a 21% y sólo se acerca más cuanto menor es el contenido de H₂, N₂ y S en el combustible. Para una combustión con exceso de aire y con un combustible formado prácticamente por C, la suma de CO₂ y O₂ 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 G, 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 μ 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 1m^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 kg en m^3 .	Volúmen específico de 1 kg en m^3 .
Vapor de agua	H_2O	3	18.016	0.804	1.2438
Aire (seco)	-	-	28.96	1.293	0.7735
Oxígeno	O_2	2	32.00	1.429	0.6998
Hidrógeno	H_2	2	2.016	0.0899	11.1272
Nitrógeno (del aire)	N_2	2	28.016	1.257	0.7957
Oxido de carbono	CO	2	28.0	1.25	0.80
Gas carbónico	CO_2	3	44.0	1.977	0.506
Anhídrido sulfuroro	SO_2	3	64.06	2.926	0.3417
Metano	CH_4	5	16.03	0.717	1.3951
Etileno	C_2H_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 del 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 m³ 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 Gm³ 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 ₃ P, en kg/cm ³	1,257	1,429	1,293	1,977	0.804
t, en °C	N ₂	O ₂	Aire	CO ₂	H ₂ 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/M³ (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 del 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 varía 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 $7.02m^3$ de N_2 que dan en total $8.887m^3$ de gases de combustión conteniendo el PCI de 1 kg de C que es de 8080 kcal, de tal forma que 1 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 ± 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.

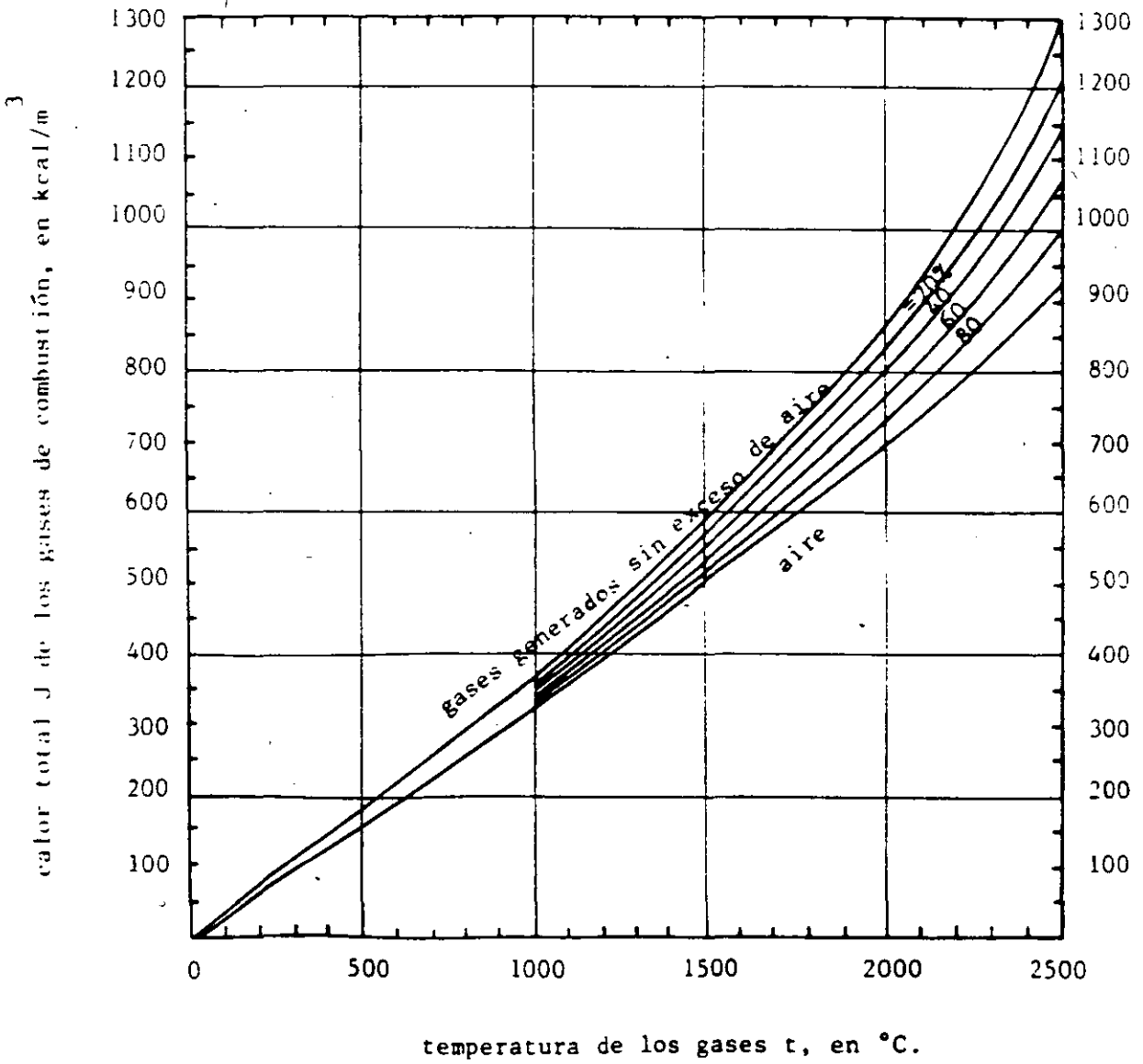


FIG. III-5.- DIAGRAMA CALOR TOTAL-TEMPERATURA (J-t) DE GASES DE COMBUSTION.



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

SISTEMAS DE ALIMENTACION DE COMBUSTIBLES

ING. M. AGUILAR

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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 éstas 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 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 kg/cm^2 hasta llegar a la caldera en donde nuevamente se reduce la presión a unos 0.5 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 atravesase 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.

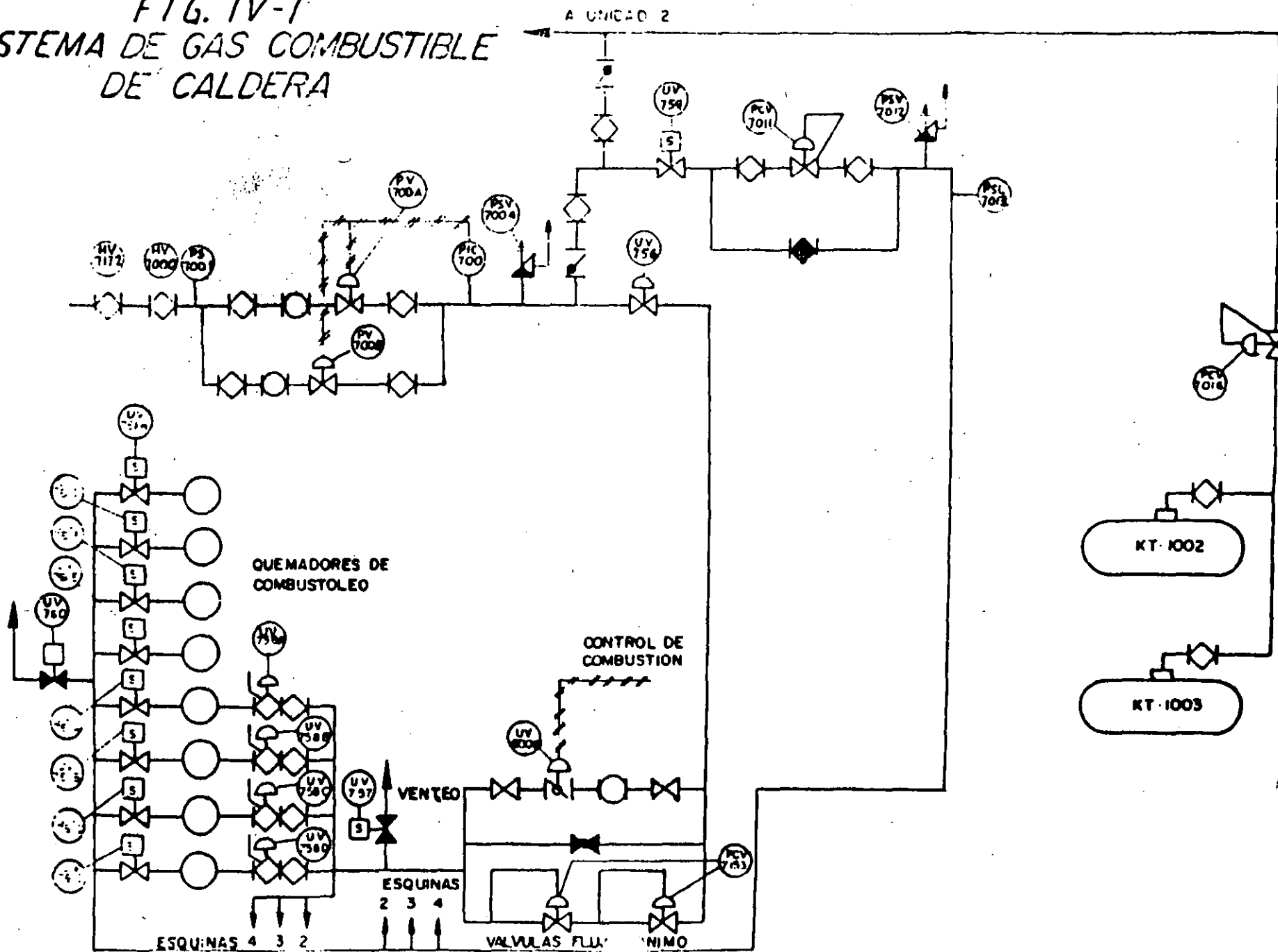
El suministro de gas puede proceder de dos fuentes diferentes; en condiciones normales el gas es proporcionado directamente por PEMEX. En caso de que este suministro no estuviese disponible, existe otra fuente de alimentación desde los tanques de emergencia (KT-1002, KT 1003) y que se usa solamente para 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 kg/cm^2 . Existen alarmas por alta y baja presión, taradas a 12 y 6 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 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 ambos 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.

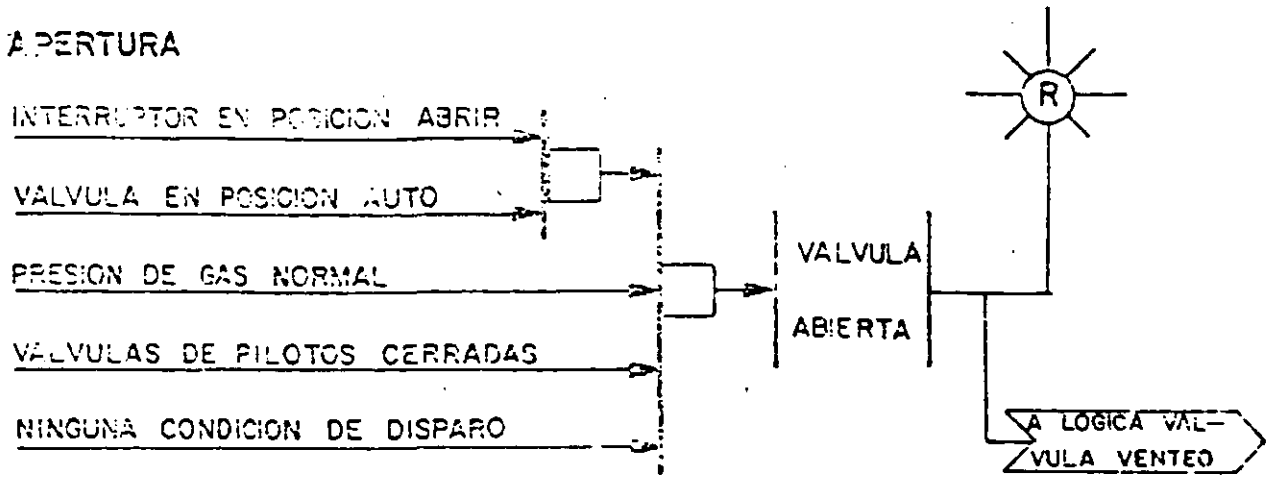
La válvula cerrará siempre que se produzca alguna de las siguientes condiciones:

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

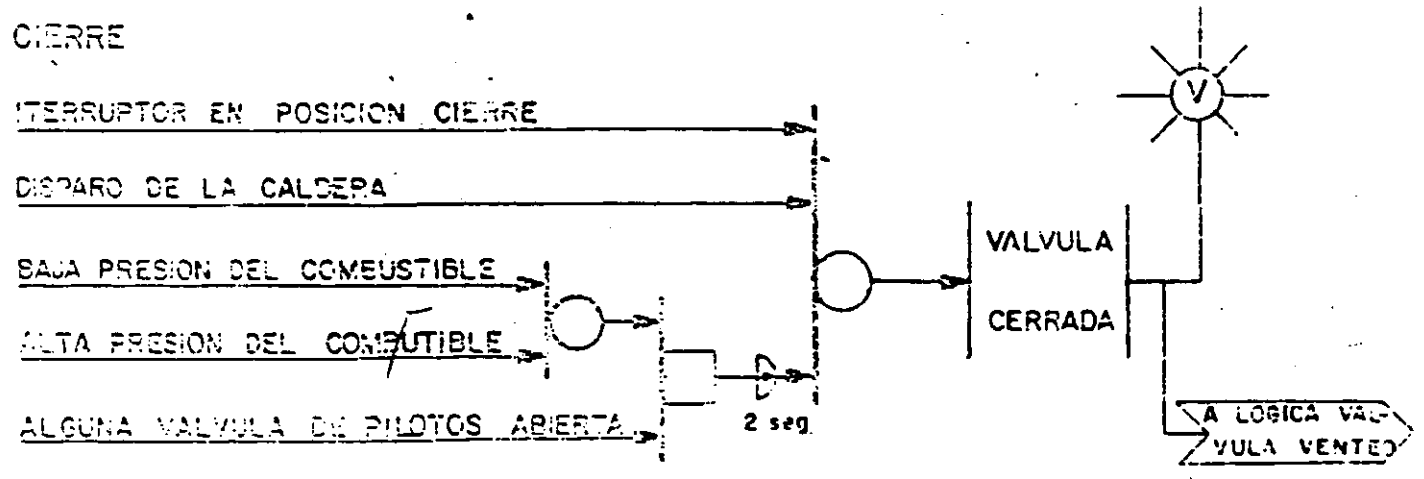
DIAGRAMA LOGICO DE LA VALVULA DE CORTE DE GAS A PILOTOS

FIG. IV-2

APERTURA



CIERRE



~~Después de la válvula de corte se 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 kg/cm^2 aproximadamente. Si la presión desciende a 0.49 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

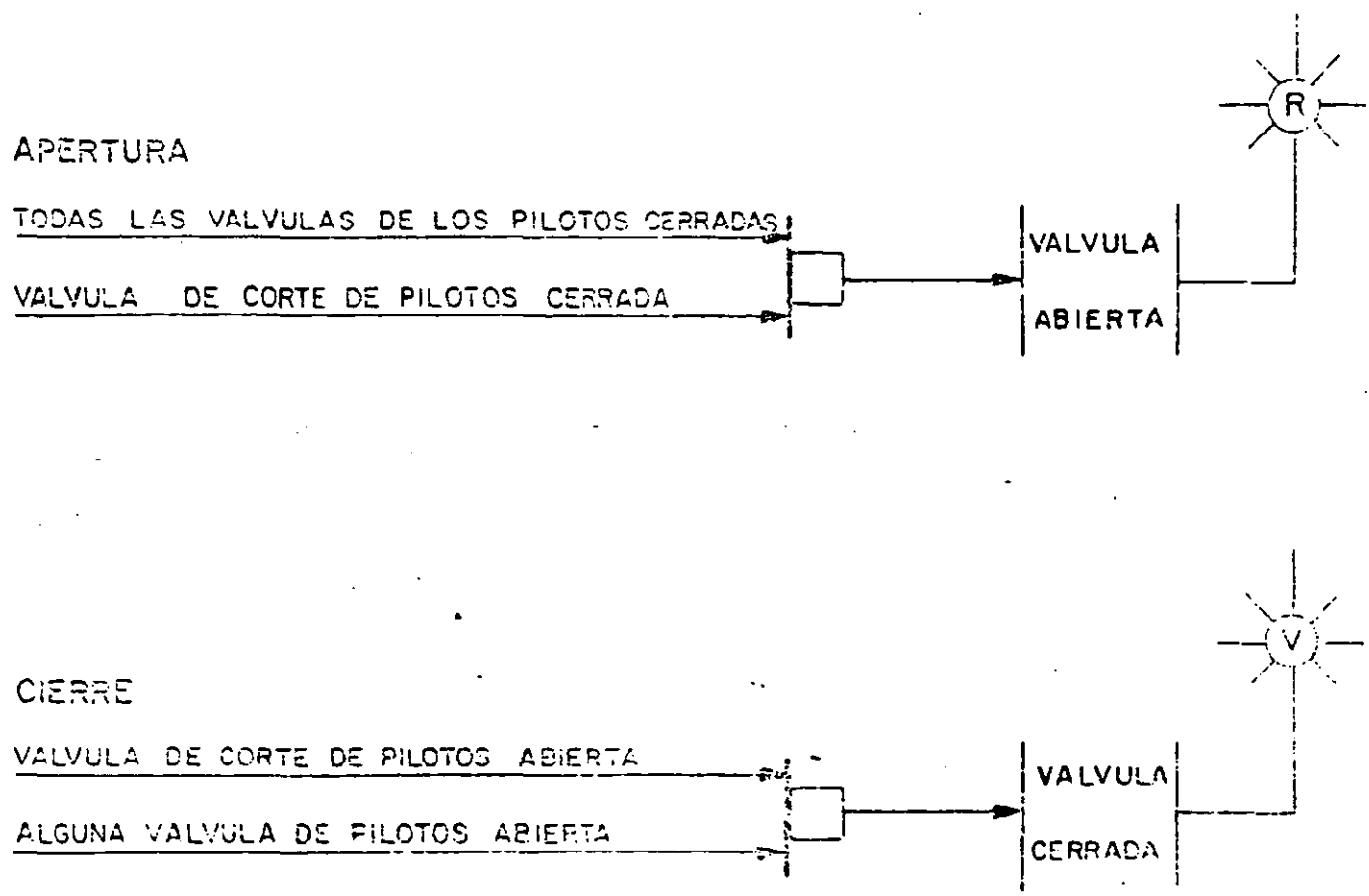
El generador de vapor consta de 16 quemadores de gas, distribuidos en cuatro niveles (elevaciones A, B, C y D) y capaces de suministrar 300 MW de potencia a plena carga.

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

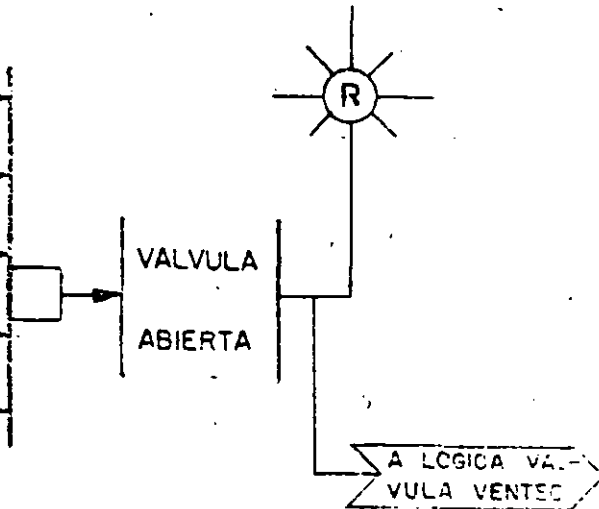
FIG. IV-3



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

APERTURA

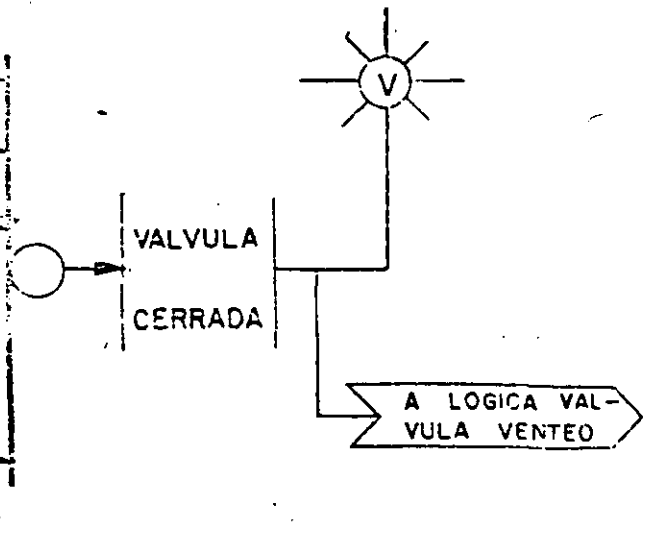
TODAS LAS VALVULAS DE LOS QUEMADORES CERRADAS
 PRESION DE GAS NORMAL (PS-710)
 INTERRUPTOR EN POSICION "ABRIR"
 NINGUNA CONDICION DE DISPARO DE CALDERA
 VALVULA DE CORTE PILOTOS ABIERTA



CIERRE

DISPARO DE CALDERA
 INTERRUPTOR EN POSICION "CERRAR"
 ALGUN PILOTO O QUEMADOR REQUERIDO NO ENC.

ALGUNA VAL. DE QUEMADOR ABIERTA
 BAJA PRES. EN EL CABEZAL
 ALTA PRES. EN EL CABEZAL



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 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 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 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.

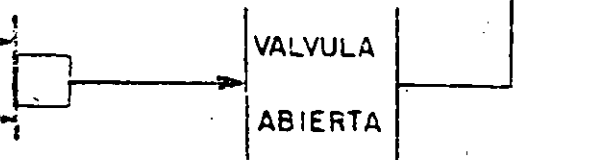
DIAGRAMA LOGICO DE FUNCIONAMIENTO DE LA VALVULA DE VENTEO PRINCIPAL UV -757

FIG. IV-5

APERTURA

VALVULA DE CORTE PRINCIPAL CERRADA

TODAS LAS VALVULAS DE QUEMADORES CERRADAS



CIERRE

VALVULA DE CORTE PRINCIPAL ABIERTA

ALGUNA VALVULA DE QUEMADORES ABIERTA

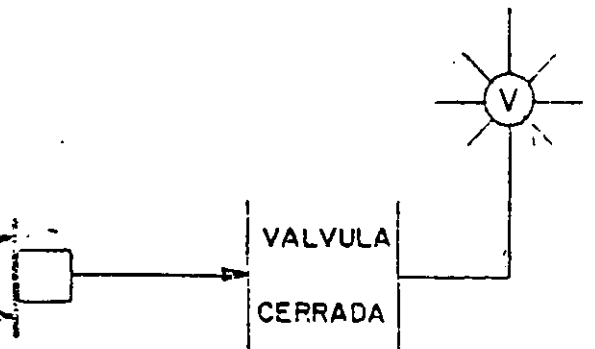
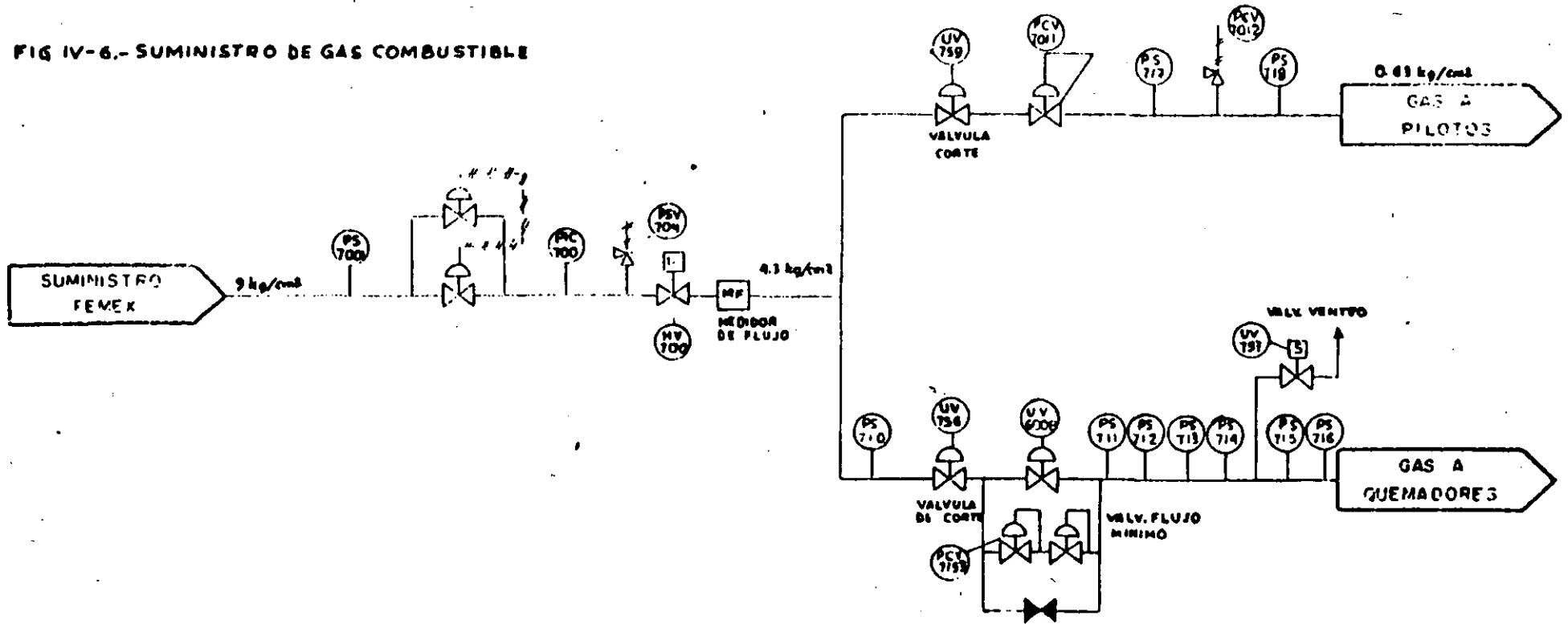


FIG IV-6.- SUMINISTRO DE GAS COMBUSTIBLE



<u>IDENTIFICACION</u>	<u>AJUSTE (kg/cm²)</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 kg/cm^2 , ni disminuir a menos de 6 kg/cm^2 , siendo la presión normal de funcionamiento de 9 kg/cm^2 .
- Las válvulas reductoras de presión en el cabezal de gas deberán estar sujetas para mantener una presión constante de 4.3 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 kg/cm^2 .

- Las válvulas reductoras de presión de gas a quemadores deberán mantener una presión constante de 0.4 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:

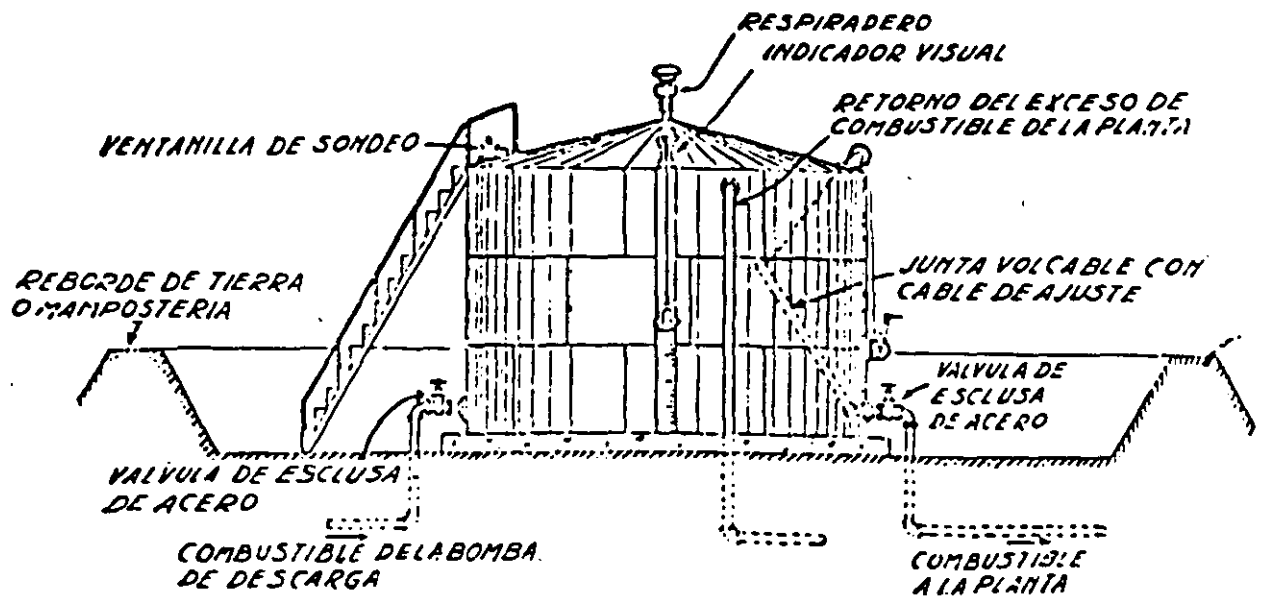
- . Carros tanque o pipas.- En este caso el calentamiento para el llenado de las pipas se conserva para poder hacer la descarga (40 a 45°C).

- . 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 espeificación 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.

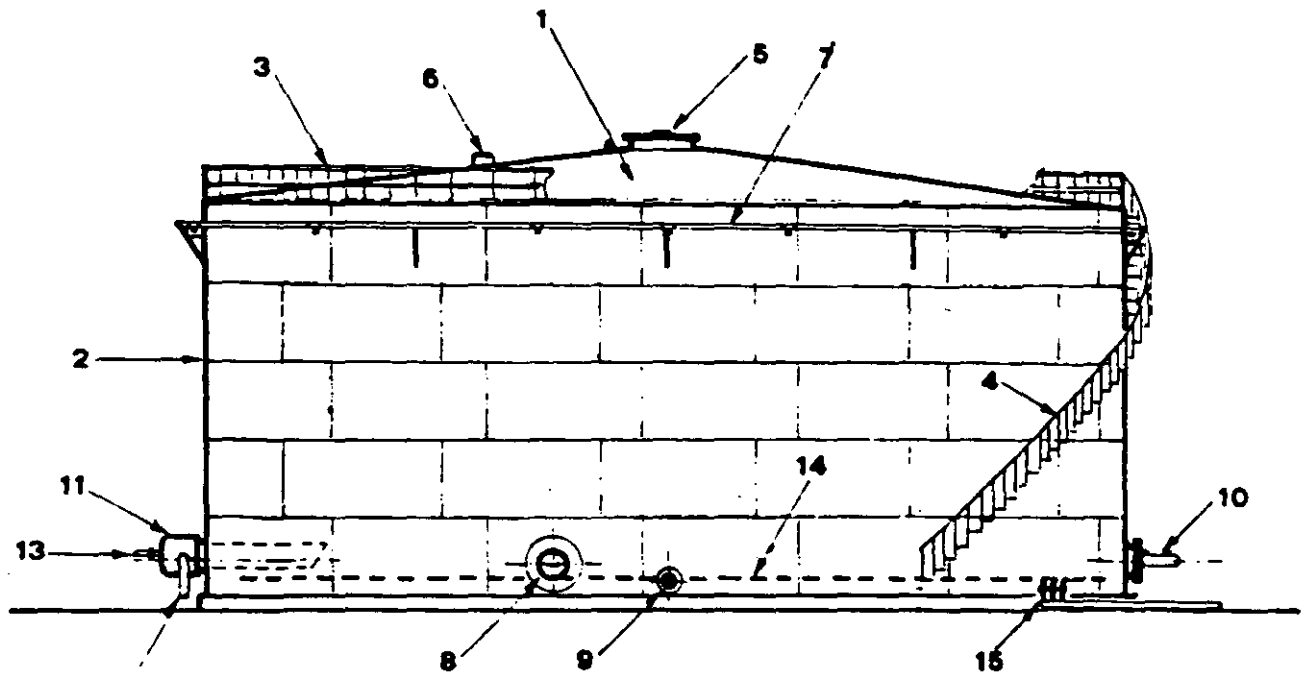


Fig IV-7.- TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

- . 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.N-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 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 combustible 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.

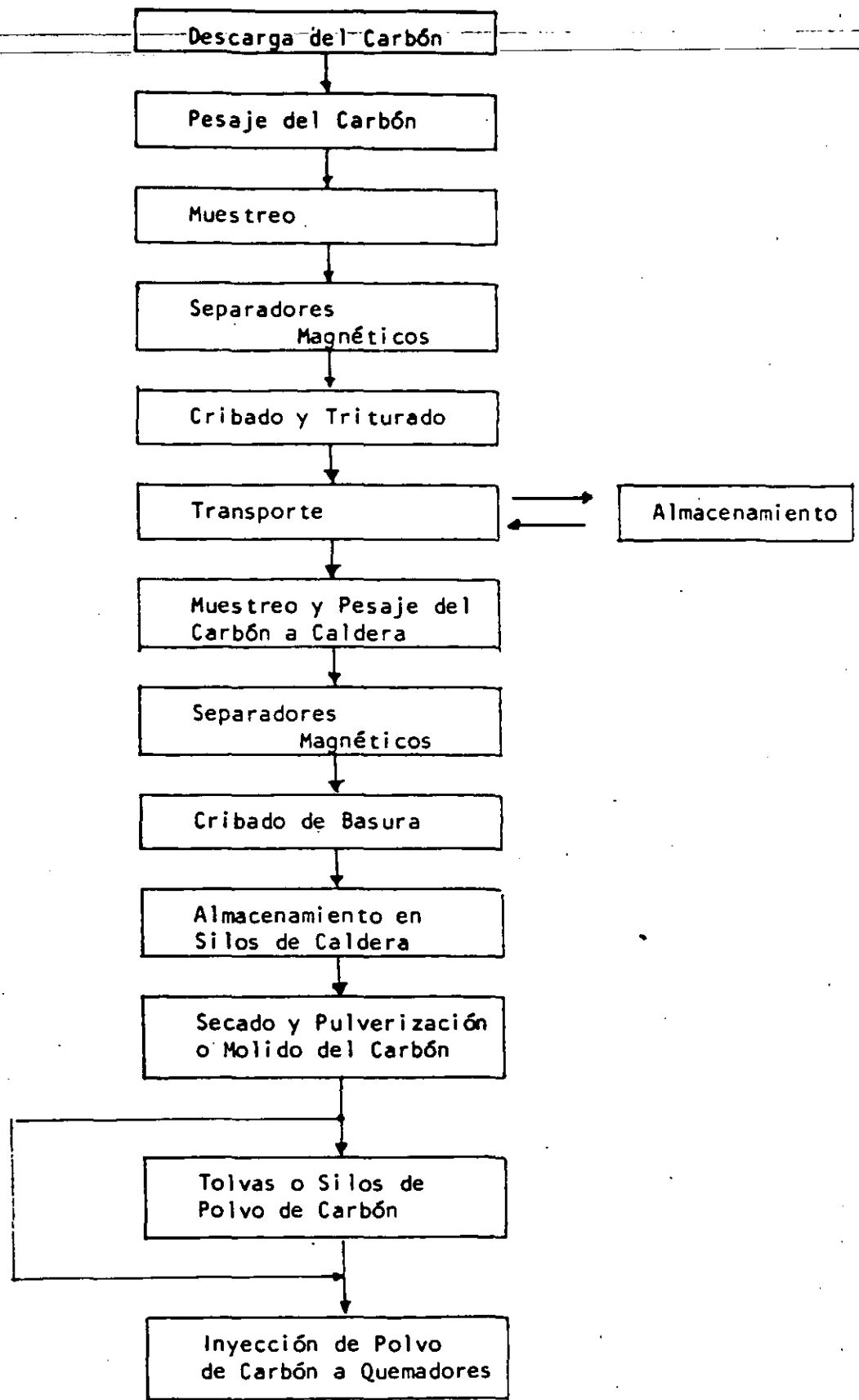
Los pulsadores de las bombas de combustóleo que se encuentren en posición AUTO, deberán pasarse a la posición PARO con el fin de evitar el arranque automático por baja presión del cabezal o paro de otra bomba.

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 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.

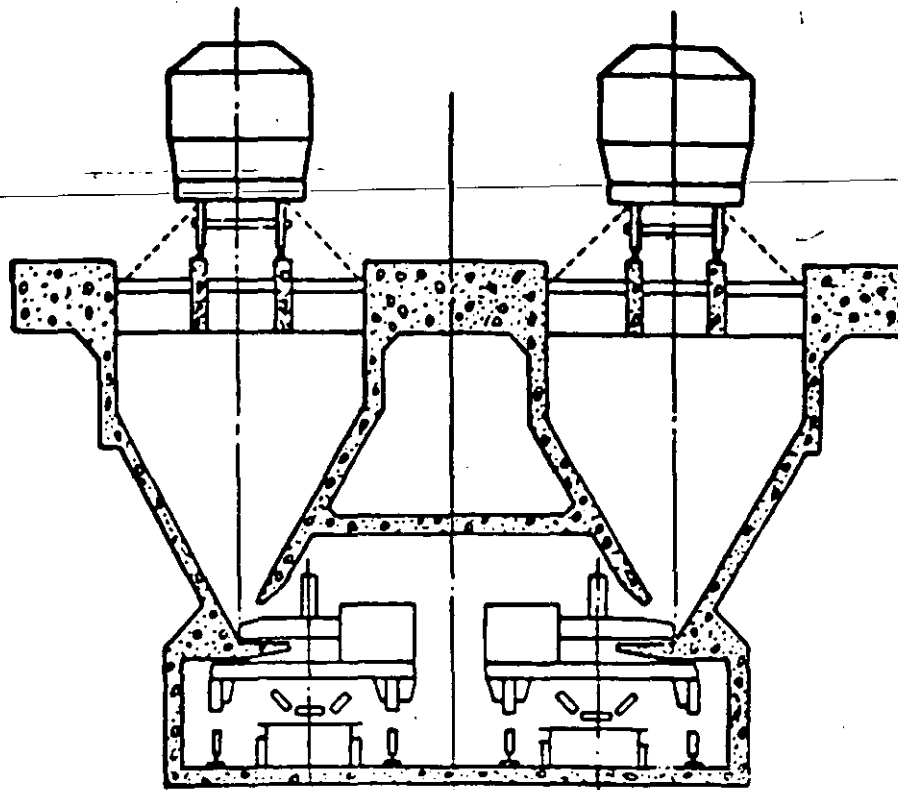


IV-24 DIAGRAMA DE FLUJO

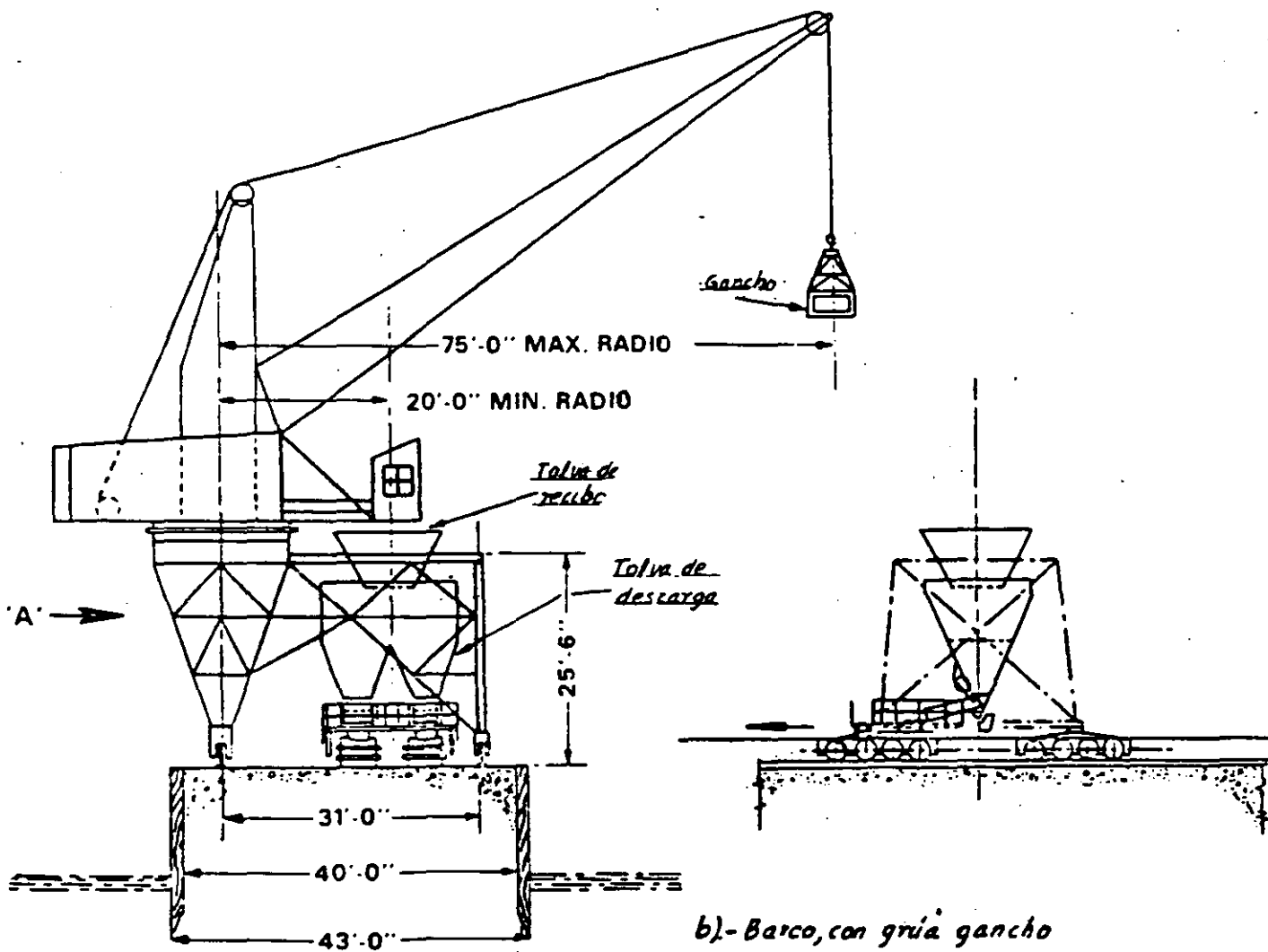
FIG. .- ESQUEMA DE MANEJO Y PREPARACION DEL CARBON

Si la temperatura del combustóleo llega a ser menor de 95°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°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.



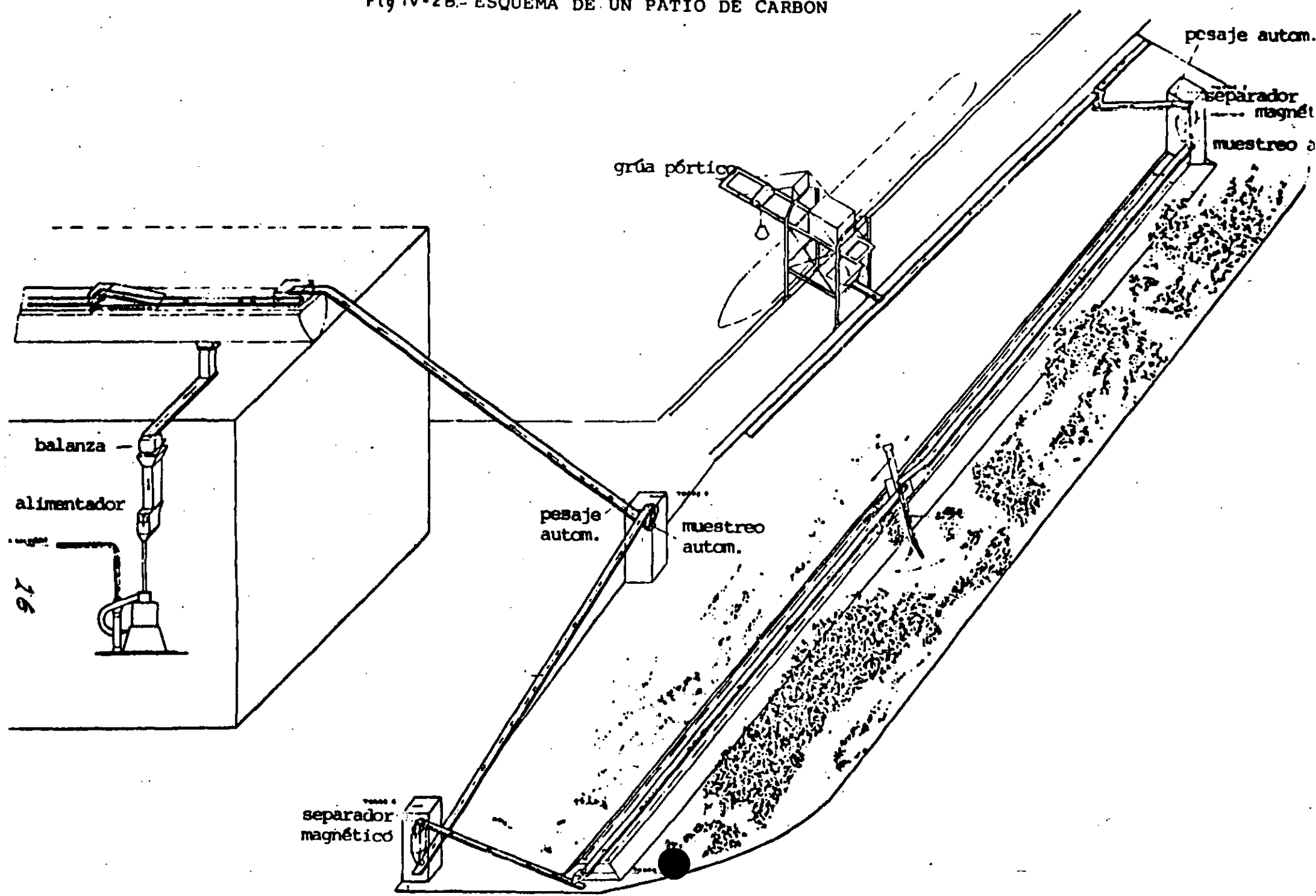
a) - Vagones de FFCC



b) - Barco, con grúa gancho

Fig IV-26.- Métodos de descarga de carbón

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



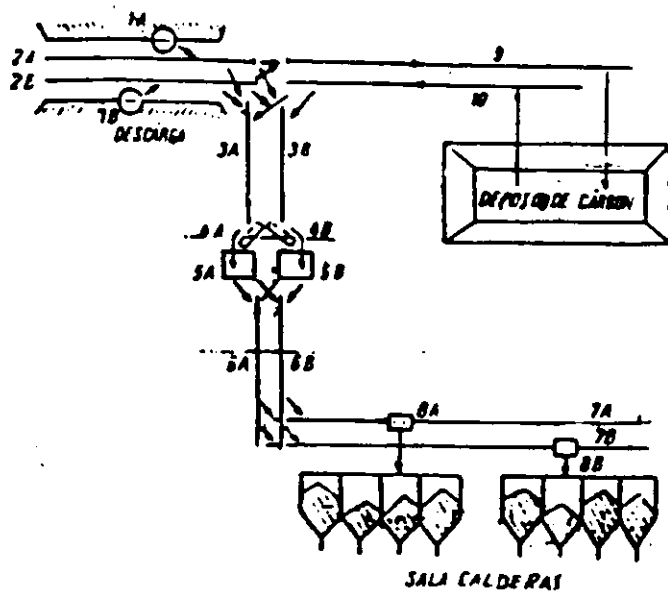


Fig IV-27.- Esquema de funcionamiento del transporte de carbon a la caldera

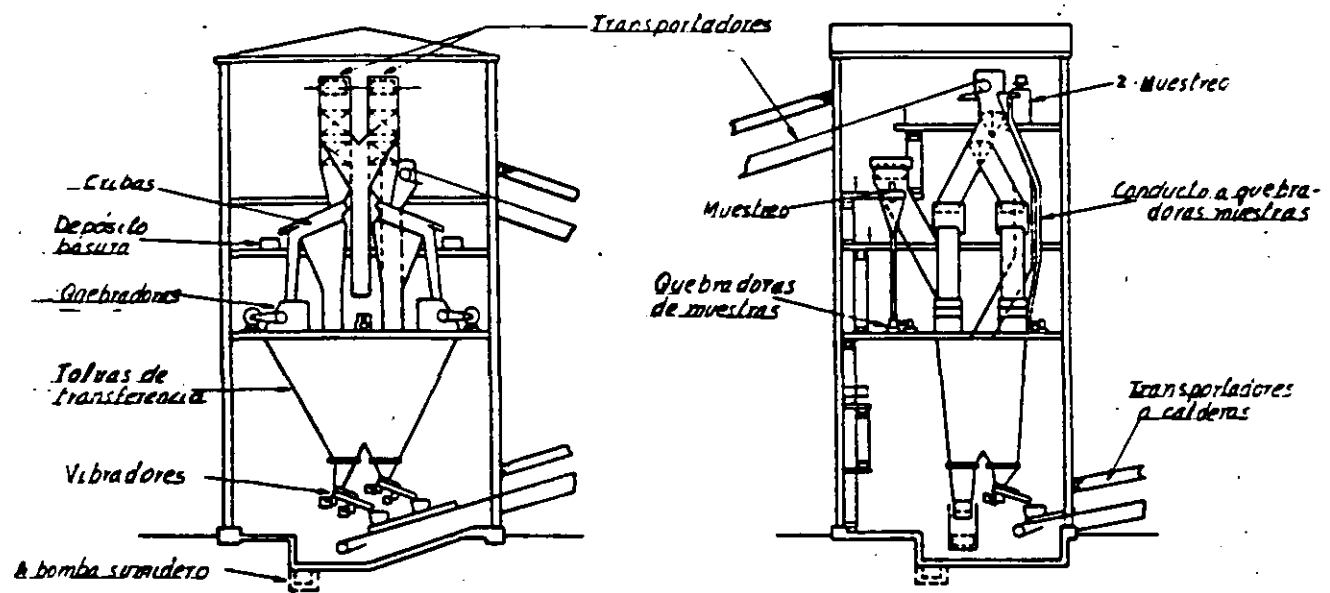


Fig IV-29.- Sección de una torre unión



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

C U R S O S A B I E R T O S

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

H O G A R

ING. M. AGUILAR

FEBRERO 1994

V.- 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)

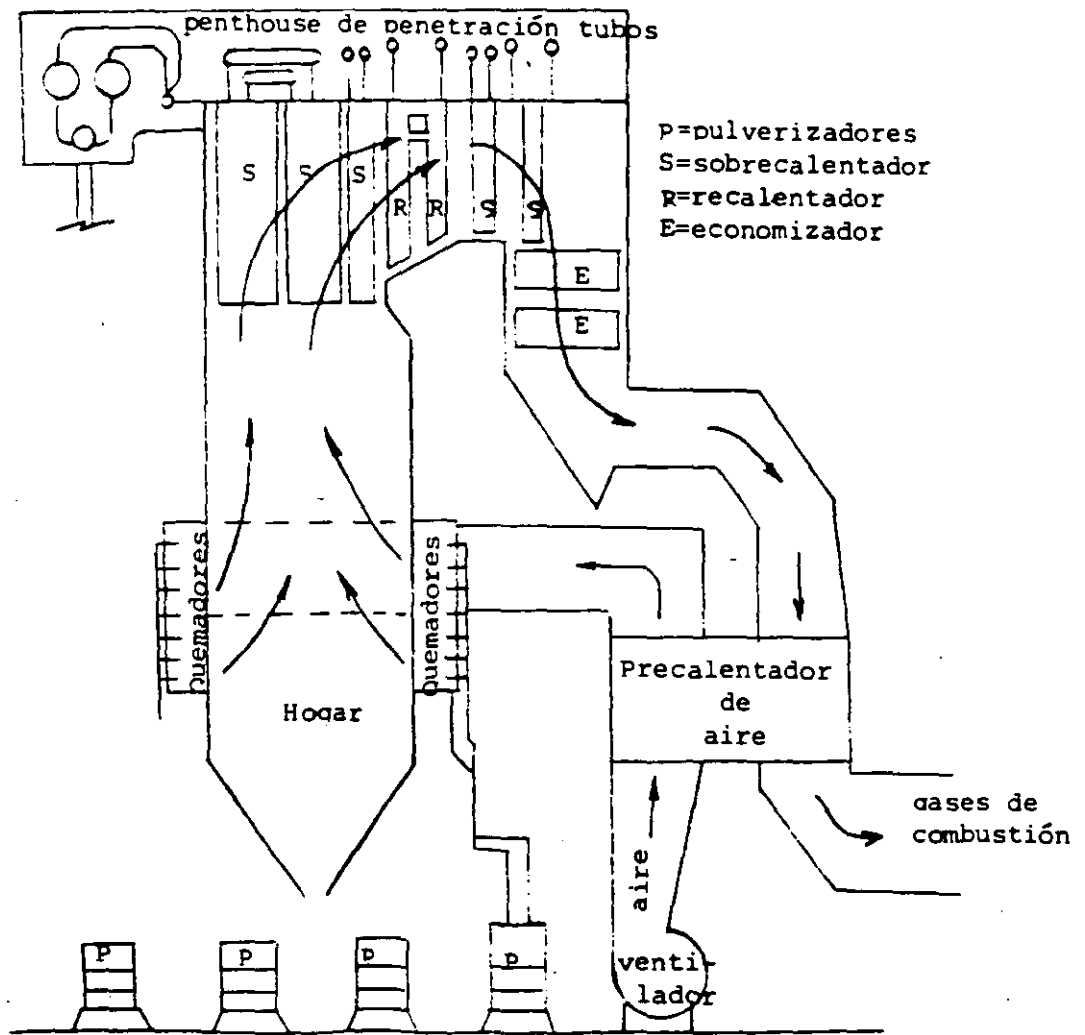


FIG. V-1.- CALDERA DE CARBÓN PULVERIZADO

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- TEORÍA

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; ésto no excluye que para las dimensiones de una llama determinada se pueda fabricar un horno con medidas diferentes.

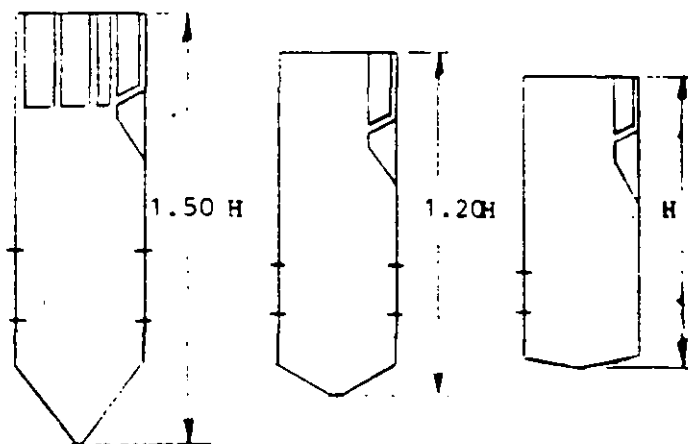
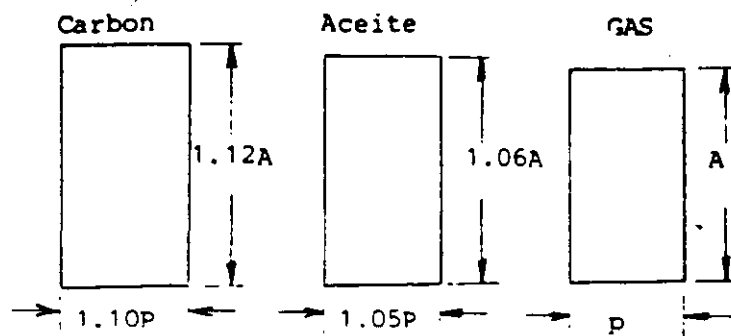
En la Fig V-3 se muestran las longitudes de las cámaras de combustión, según el flujo de aceite combustible

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

opi. No concluye

3



Exceso de aire	25	10	8
Relación C/H	15	6 a 8	3
Relación en peso aire / combustible	12	16	18

Fig. 2.11 - 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 SUSPENSION

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 1.2m. 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 y 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 H₂ 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 disminuída, 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°K , y a 1200°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°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.

~~Carbon pulverizado en suspensión~~
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 no se completa, 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.

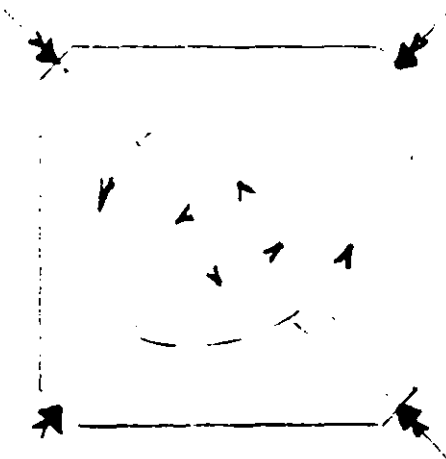


FIG. V-8.- COLOCACION DE QUEMADORES EN LAS ESQUINAS

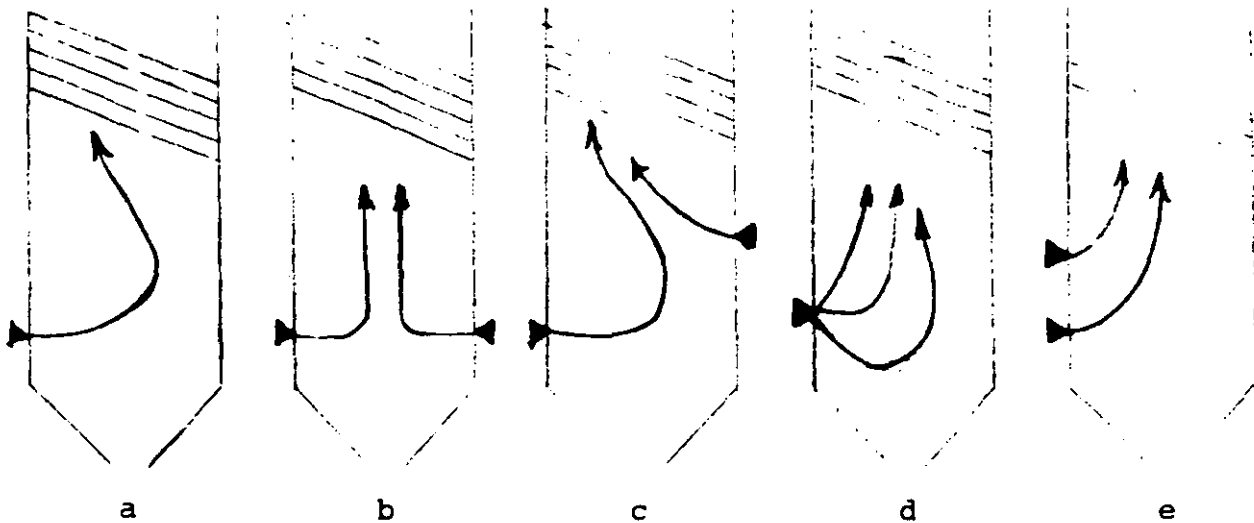


FIG. V-9.- ESQUEMAS DE COLOCACION DE QUEMADORES

- 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, como en la Fig. IV-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. IV-10 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 kg/h

PCS = poder calorífico superior del combustible, en kcal/kg

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

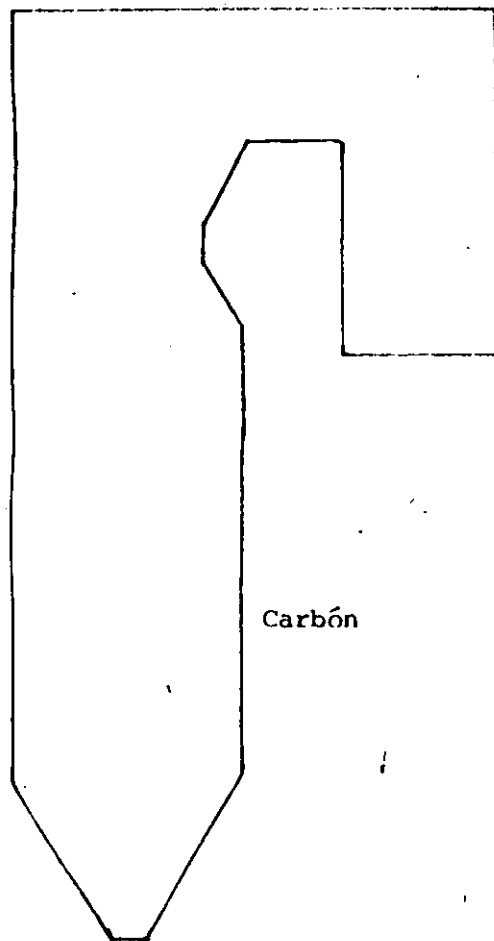
El régimen de liberación de calor superficial Cl_s , varía entre 210 000 y 250 000 $\text{kcal/m}^2\text{ h}$, con el cual se puede calcular la superficie del hogar S_h , de acuerdo con la siguiente ecuación:

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

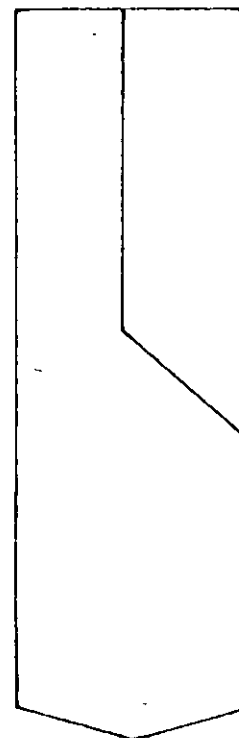
Temperatura de salida de gases.-

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° y 1150° , recomendándose en general - que sea de 50° a 100°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:



Carbón



Aceite

Régimen de liberación de calor en el hogar:

120000 a 150000 kcal/m³h

250000 a 300000 kcal/m³h

FIG IV 4.-COMPARACION DE TAMAÑOS DE CALDERAS DE ACUERDO CON EL COMBUSTIBLE USADO

12

41

rojo visible solamente en la obscuridad	500°C
rojo obscuro	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 V-5 se muestra la correlación de la temperatura de salida del hogar con la temperatura teórica de combustión, la transferencia de calor en kcal/m²h y el grado de ennegrecimiento del hogar

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 :

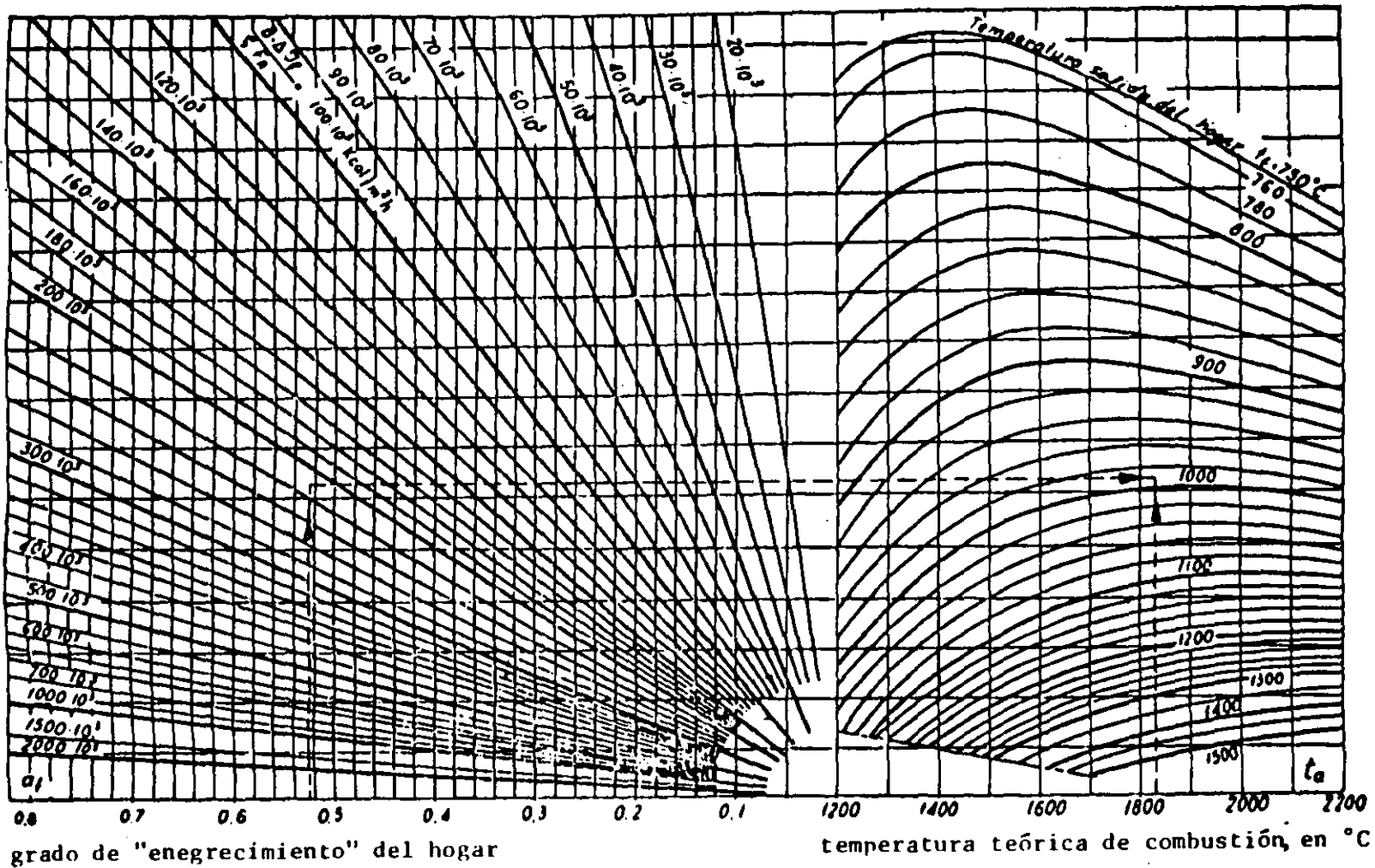


FIG. 16. CALCULO DE LA TRANSMISION DE CALOR EN EL HOGAR



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

QUEMADORES

ING. M. AGUILAR

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

VI.- QUEMADORES

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. XI-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 necesaria 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.

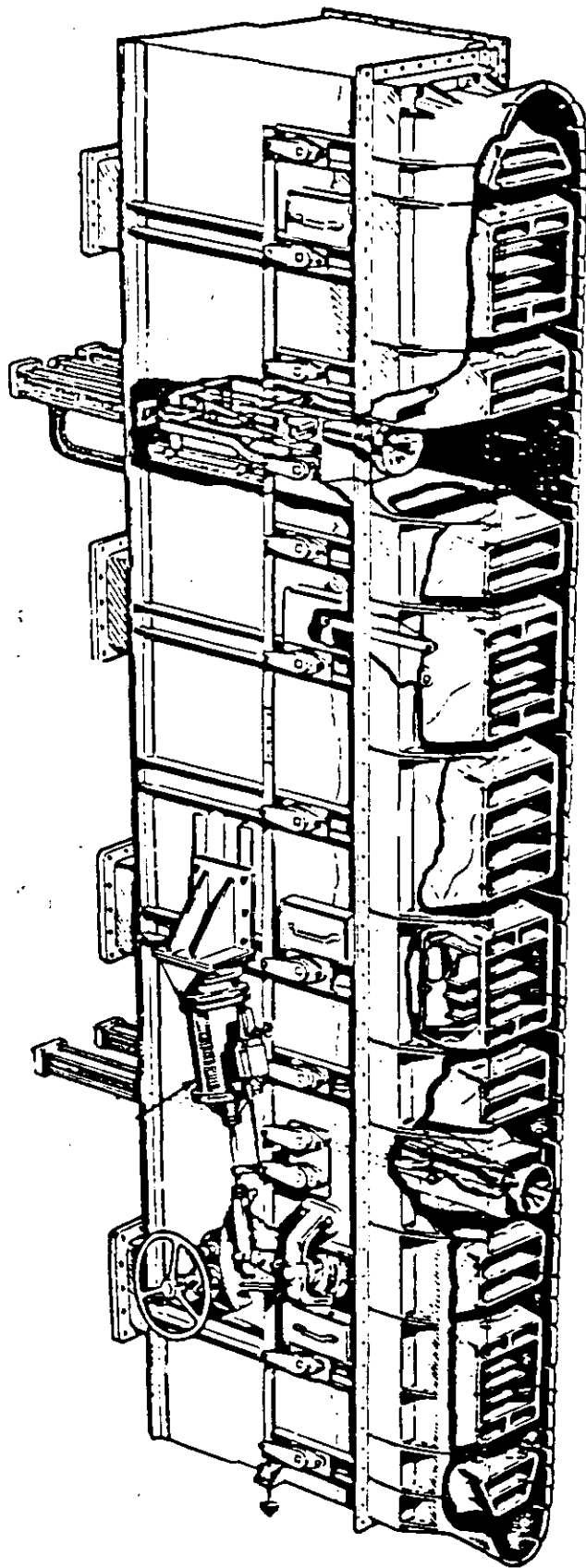


Fig. VI-1. - ARREGLO DE QUEMADORES

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 sólido

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 H₂O 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

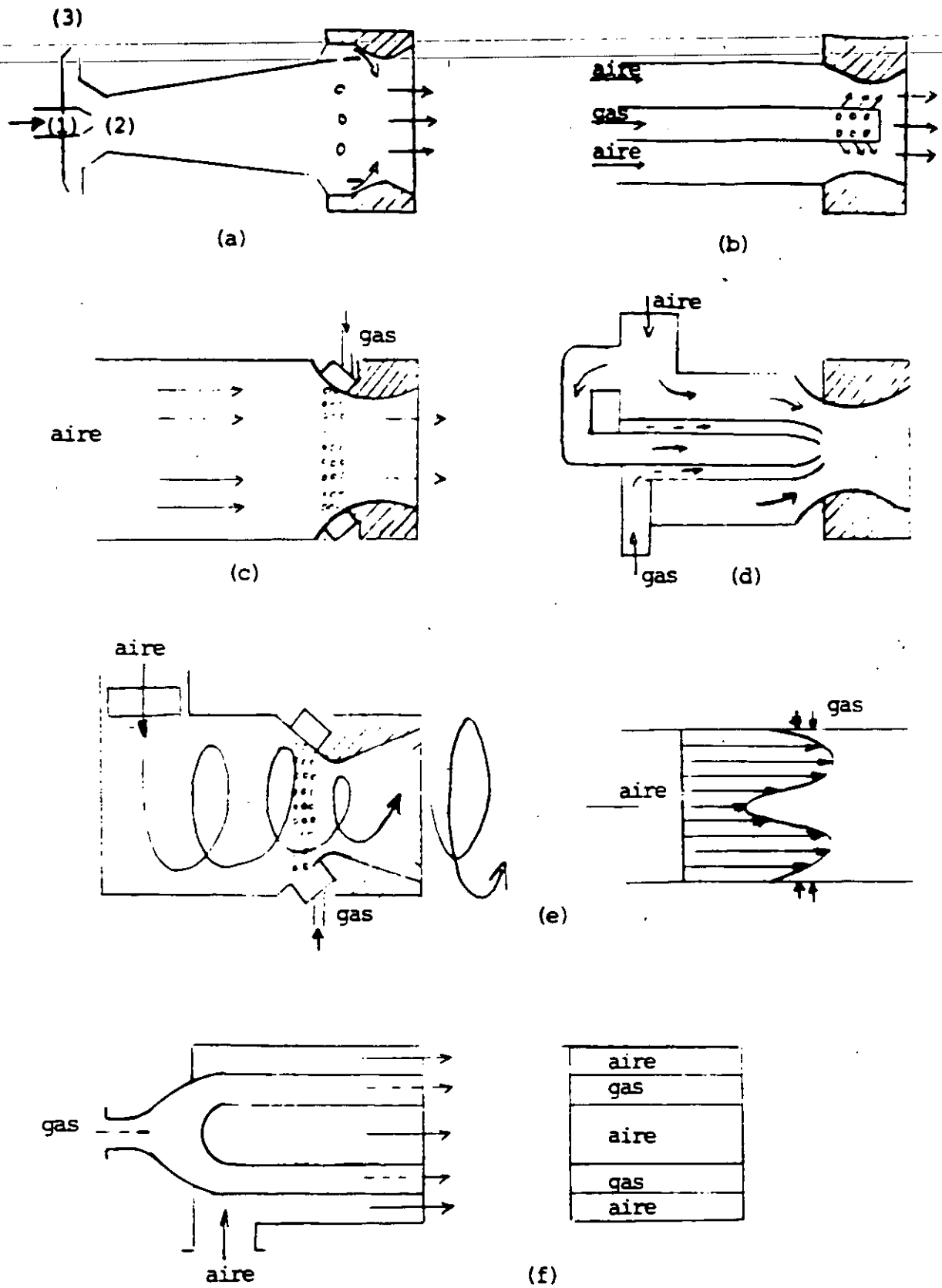


FIG. 1.- ESQUEMAS DE DIFERENTES TIPOS DE QUEMADORES
PARA GAS COMBUSTIBLE

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, larga 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, re-~~
sultando 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^2 en función de la resistencia aerodinámica del trayecto y los gases se inyectan a una presión de 2 000 a 15 000 N/m^2 . 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 paletas 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

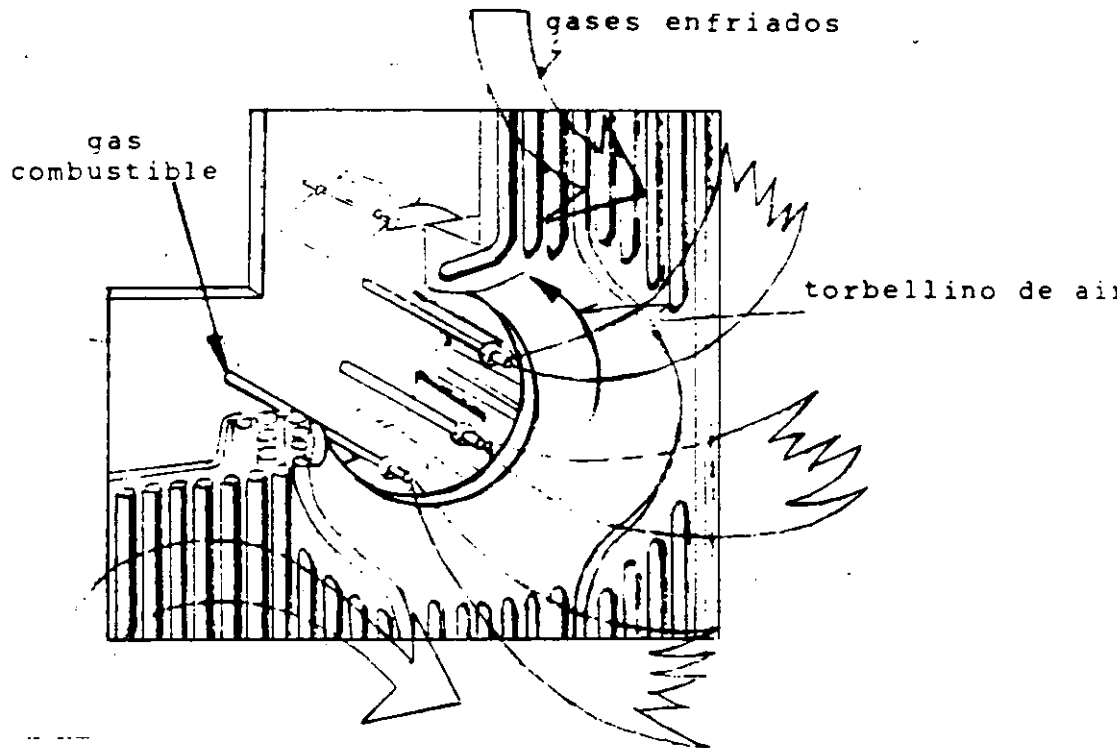
del fluido (del hogar hacia el quemador); esta situación debe evitarse ya sea disminuyendo la turbulencia, o acelerando la salida del chorro con dispositivos auxiliares para aumentar la velocidad en el centro. El regreso de la flama hacia el quemador produce el apagado de la flama.

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-2f. - 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 espe-~~

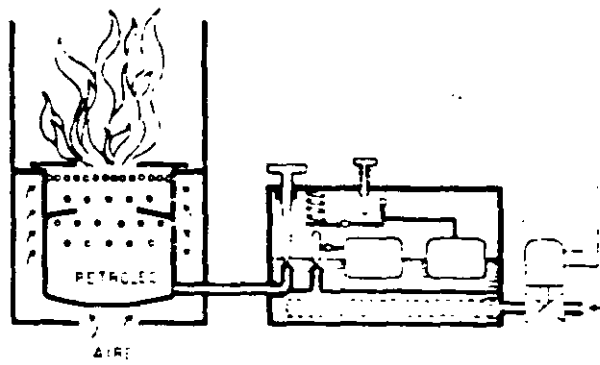
cial utilizado en las calderas pequeñas es suficientemente fluido para pulverizarse, pero el combustible debe precalentarse de 360 a 420 °K para obtener la fluidez necesaria.

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.

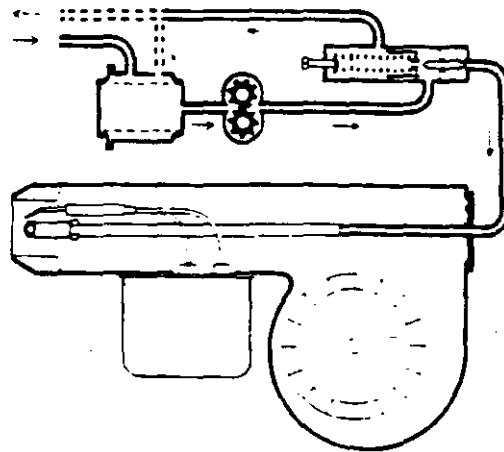
Los combustibles líquidos pueden quemarse, ya sea mediante su evaporación para que reaccionen como gases, o mediante la subdivisión en gotas diminutas que, calentadas por radiación y mezcla turbulenta, se evaporarán durante la combustión. VI-5 y VI-6

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.

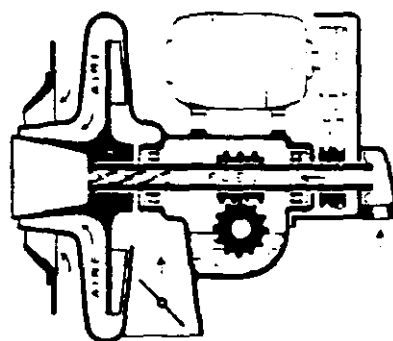
La necesidad de subdividir el aceite en gotas pequeñas y de que éstas tengan que mezclarse con el aire por turbulencia se explica por la condición de aumentar con la evaporación la superficie del líquido en la combustión y además por las siguientes consideraciones: El aceite combustible se compone de moléculas que sufren rompimiento ("craking") 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

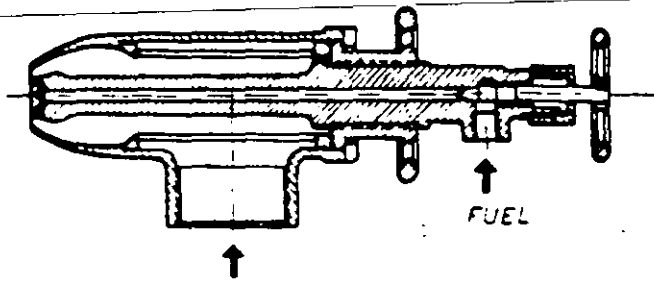


PULVERIZACION MECANICA
(Presion hidraulica)

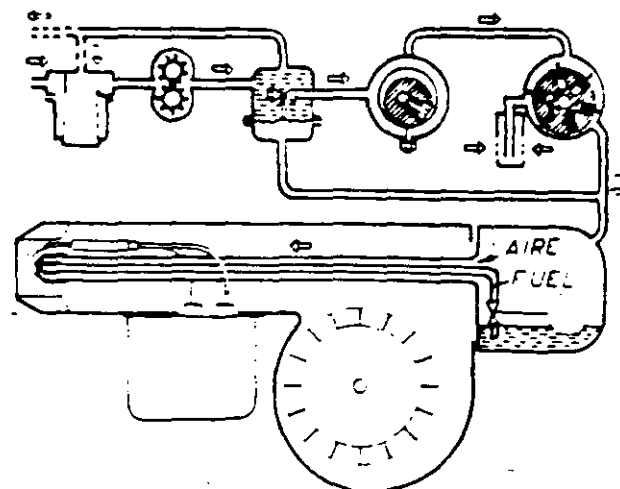


COPULA ROTATIVA

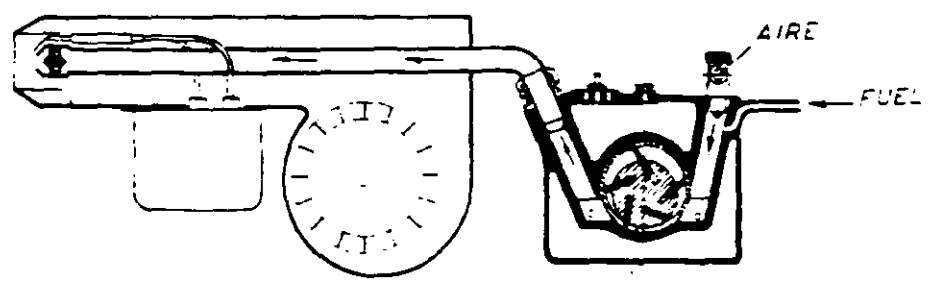
FIG. VI-5. QUEMADORES DE COMBUSTIBLE LIQUIDO



ARRASTRE POR FLUIDOS



PULVERIZACION NEUMATICA



EMULSION INTERNA DE AIRE

VI-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 sea perfecta 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**

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

VENTILADORES (Y BOMBAS)

ING. M. AGUILAR

FEBRERO 1994

VII - BOMBAS Y VENTILADORES

1.- BOMBAS

Las bombas son máquinas volumétricas que mueven cantidades de fluidos de un lugar hacia otro suministrándole la energía necesaria para su movimiento y para vencer la resistencia al flujo.- Los elementos esenciales de las bombas son flechas, impulsores o émbolos y cajas, envolventes o cilindros - con válvulas para conectar la entrada del fluido y dirigir su flujo.

Las bombas, que son de los equipos más antiguos y empleados, se utilizan en las calderas como auxiliares para el agua de alimentación, recirculación de agua, inyección de sustancias químicas y sistema de combustible líquido; como el conocimiento de éstos equipos se encuentra bien difundido, en esta sección únicamente se darán algunos principios fundamentales.

La clasificación de las bombas puede hacerse de acuerdo con los siguientes criterios:

- . por la aplicación
- . por el movimiento del fluido, que le imprime el mecanismo de la bomba

Por la aplicación pueden clasificarse en bombas de extracción de condensado, de agua de alimentación, de agua de circulación, de dosificación de sustancias químicas, de aceite combustible, etc.

De acuerdo con el movimiento del fluido que le imprime el mecanismo, existen tres clases de bombas:

- . centrifugas
- . alternativas
- . rotativas

Dentro de cada una de estas clases de bombas, existen diferentes tipos, que se muestran en la Tabla ^{VIII-1} y en la gráfica de la Fig. ^{VII-1} se muestra en general las zonas de aplicación de cada una de estas clases de bombas.

El trabajo requerido para elevar un líquido, puede determinarse a partir de la definición básica de trabajo.

$$\text{trabajo (kg-m)} = \text{fuerza (kg)} \times \text{distancia (m)}$$

$$= \text{peso o masa del líquido (kg)} \times \text{altura (m)}$$

Si se toman en consideración las pérdidas puede introducirse el término de eficiencia y si se expresa el trabajo por unidad de tiempo (unidades de potencia), se obtienen las ecuaciones de trabajo en la siguiente forma:

$$CV = \frac{\text{kg/s} \times \text{m de altura}}{76 \times \text{eficiencia}}$$

$$= \frac{\text{litros/s} \times \text{presión diferencial (kg/cm}^2\text{)}}{76 \times \text{eficiencia}}$$

$$= \frac{W \quad Q \quad H}{76 \quad \eta}$$

en donde:

CV = caballos de potencia

W = peso específico del líquido, en kg/m³

Q = flujo del líquido, en m³/s

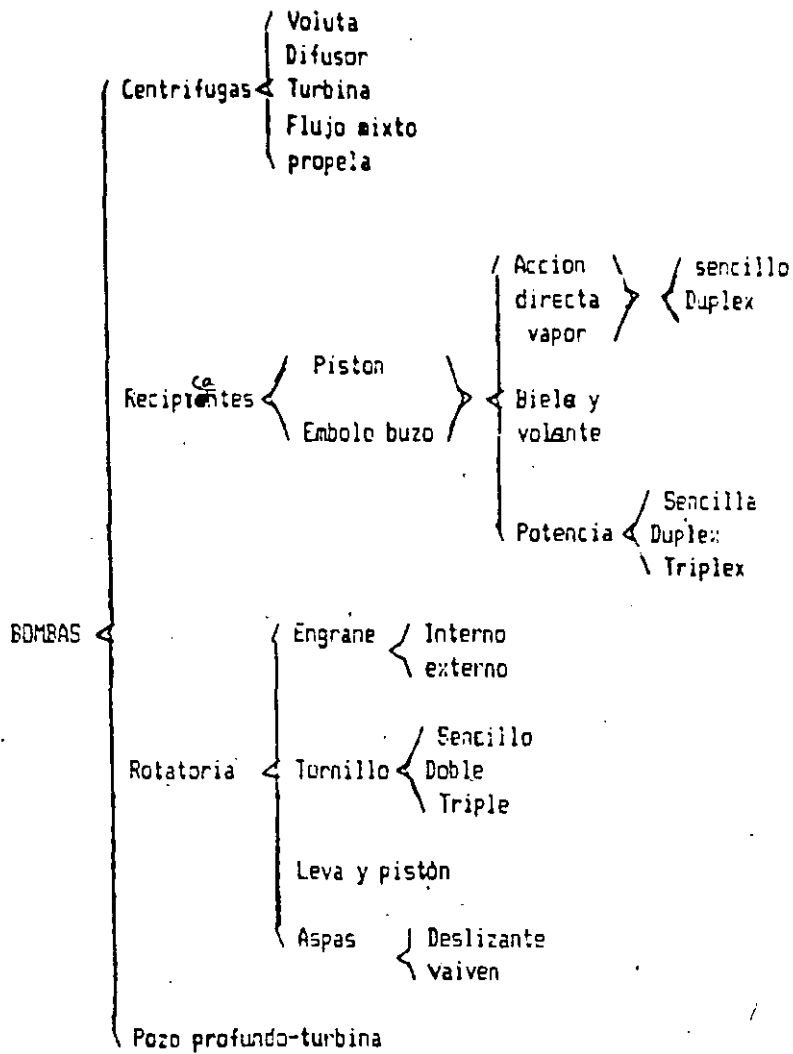


TABLA 1 .- TIPOS DE BOMBAS

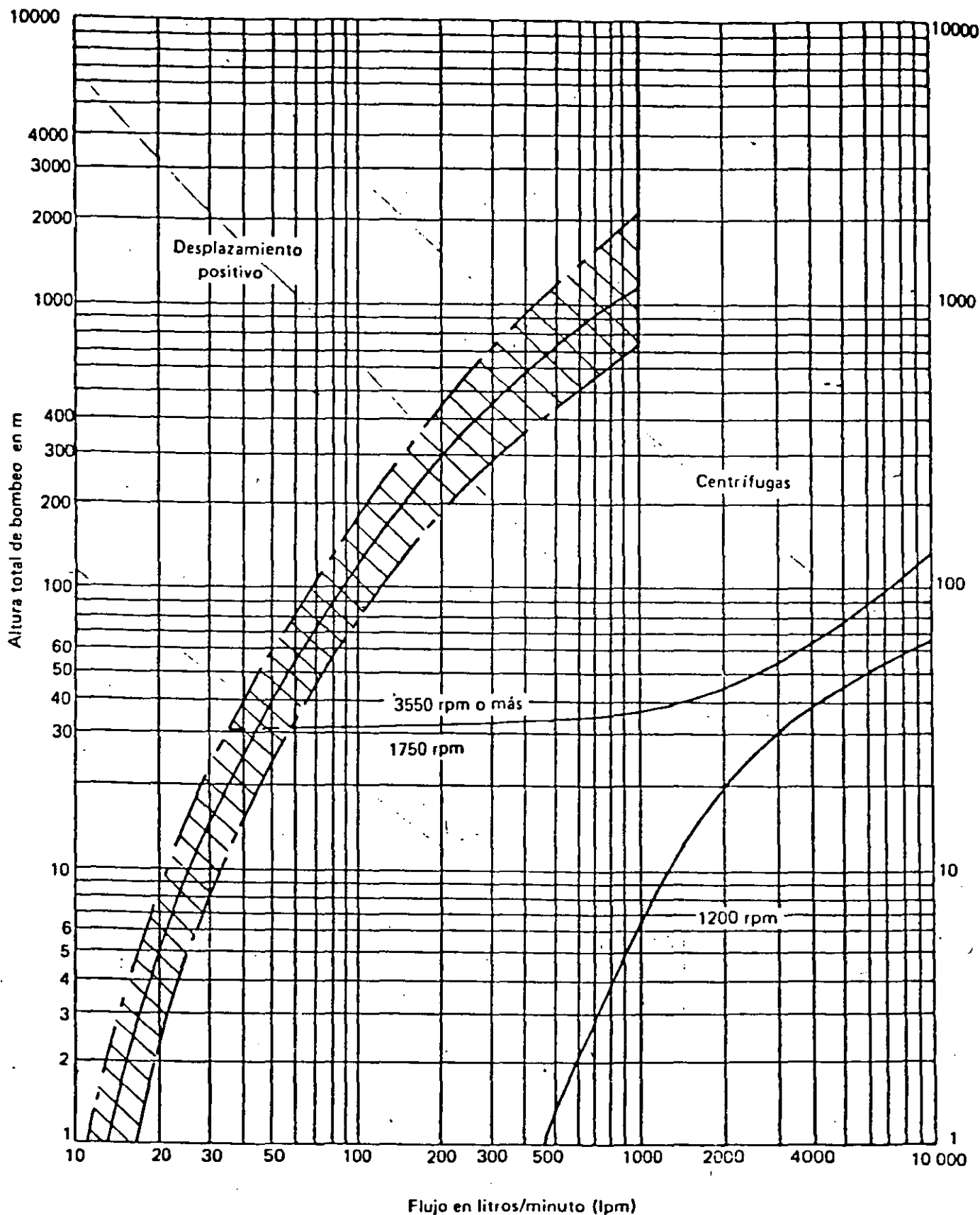


Figura 13.1 Gráfica para selección de bombas

H = altura de bombeo, en m

η = eficiencia

La eficiencia es variable para las diferentes clases y tipos de bombas y puede computarse a partir de la ecuación anterior en donde al término $WQH/76$ se le denomina caballos de agua (CV_{agua}), es decir:

$$\eta = \frac{CV_{\text{agua}}}{CV_{\text{freno}}} = \frac{WQH/76}{CV_f}$$

La altura máxima que puede succionar una bomba está relacionada con la presión sobre la superficie del líquido en la succión y con la presión de vapor del mismo líquido; la altura teórica de succión h_s , está dada por la siguiente ecuación:

$$h_s = \frac{10 \times \text{kg/cm}^2}{P}, \quad \text{en m}$$

En donde P es la densidad del líquido en Kg/litro.

La altura máxima de succión real es bien diferente a la anterior teórica.

Las características generales de las diferentes clases de bombas se dan en la Tabla V.1

Debido a que las bombas en las plantas cubren un amplio

TABLA 2 .- RESUMEN DE CARACTERISTICAS DE BOMBAS

TIPO CARACTERISTICAS	Centrifuga		Rotatoria	Reciprocante		
	Voluta y Difusor	Flujo Axial	Tornillo Engrane	Vaporización Directa	Doble Acción	Tripe
Descarga	Continua	Continua	Continua	Pulsante	Pulsante	Pulsante
Máxima Elevación de Succión en m	4.5	4.5	6.60	6.60	6.60	6.60
Líquidos que Maneja	Limpio, claro, sucio, Abrasivo, con Contenido de Sólidos		Viscoso no Abrasivo	Limpio y Claro		
Fresión de Descarga	Baja a Alta		Media	Pequeña a Máxima		
Capacidad	Pequeña a Máxima		Pequeña a Media	Relativamente Pequeña		
Con aumento de Columna:						
a) Capacidad	Disminuye		Nada	Disminuye	Nada	Nada
b) Potencia	Función de la Relación Específica		Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Con Disminución de Columna :						
a) Capacidad	Aumenta		Nada	Aumento Pequeño	Nada	Nada
b) potencia	Función de rel. Específica		Disminuye	Disminuye	Disminuye	Disminuye

rango de aplicaciones que van desde líquidos sucios a limpios, fríos a calientes, de alta a baja presión, etc., se tienen problemas para el sellado de la flecha, que son mayores cuando aumenta la temperatura, velocidad y diámetro.

Existen dos formas básicas de realizar el sello de la flecha: por medio de empaques en cajas de estoperos y por medio de sellos mecánicos. La decisión de usar uno u otro depende de muchas condiciones.

Los empaques en cajas de estoperos son indicados para las siguientes condiciones:

- . presiones y temperaturas moderadas;
- . servicios de paro y arranque;
- . cuando las fugas no son un factor determinante.

Los sellos mecánicos son indicados para las siguientes condiciones:

- . alta presión;
- . cero fugas;
- . alta temperatura;
- . líquidos tóxicos;
- . líquidos inflamables;
- . líquidos volátiles;
- . servicio continuo

Al hacer una comparación entre los empaques en cajas de estoperos y los sellos mecánicos, destacan los siguientes pun-

tos:

- . el costo inicial de los sellos mecánicos es normalmente mayor
- . los sellos mecánicos son difíciles de cambiar, requiriéndose remover los cojinetes, lo cual significa casi el -- desensamble completo de la bomba
- . durante los arranques y paros de las bombas, se deberá tener cuidado, abriendo y cerrando gradualmente la válvula de descarga
- . cuando un sello mecánico empieza a fallar, falla completamente y debe ser repuesto
- . la compresión del resorte de un sello mecánico, puede ser ajustado únicamente con la bomba parada
- . una deflexión en la flecha puede causar desgaste no uniforme en las caras del sello

Las especificaciones de las bombas deberán incluir requerimientos del fabricante para su instalación apropiada; los detalles de las instrucciones del fabricante deben ser suficientemente claros para proveer una guía de diseño en lo siguiente:

- . método de montaje de la bomba y el equipo motor
- . requerimientos de placa base, pedestales, etc. para la cimentación
- . ajuste de las anclas de la cimentación
- . acondicionamiento del subsuelo

- . instrucciones para la nivelación y colado de acabado (grouting)
- . tolerancias de plomeado (flecha horizontal o vertical)
- . cuidados necesarios en el alineamiento de la bomba y la transmisión
- . conexión de la tubería de descarga y succión sin esfuerzos residuales sobre las boquillas de la bomba
- . soportes apropiados de la tubería y válvulas adyacentes
- . empotramiento de tubería cerca de la bomba
- . criterio de arreglo de la tubería de succión o paro

BOMBAS CENTRIFUGAS

En la Fig. ^{VII-2} 2 se muestran las secciones de los diferentes tipos de impulsores de bombas centrífugas relacionados con la velocidad específica, flujo y eficiencia.

La velocidad específica n_e , en rpm, es la velocidad a la cual debe girar un impulsor si su tamaño se reduce para dar un flujo de 1 litro/s contra una columna de 1 m.

La velocidad específica es un índice del tipo de bomba que emplea la columna que se obtiene en el punto de máxima eficiencia y determina el perfil o forma general del impulsor; para columnas altas tienen velocidad específica baja y para columnas reducidas tienen velocidad específica alta.

Las velocidades utilizadas normalmente son de 1,200 a 3,550 rpm, aunque pueden utilizarse velocidades hasta de 6,000 rpm o más cuando se acoplan a turbinas de vapor o incrementadores de velocidad.

La eficiencia es afectada por la relación entre el gasto y la altura de bombeo Q/H . Para relaciones pequeñas, la eficiencia es baja; cuando la relación es alta, se alcanzan eficiencias similares a las de las bombas de desplazamiento positivo. La eficiencia disminuye cuando se manejan líquidos viscosos y con sólidos en suspensión.

Las diferentes características de las bombas centrífugas pueden obtenerse estudiando su comportamiento y se pueden reducir a condiciones estándar. El criterio más comúnmente aplicado es el de *velocidad específica* (la velocidad de una bomba ideal, geoméricamente similar a la bomba real, que al trabajar a esta velocidad eleva la unidad de volumen en una unidad de tiempo a través de una unidad de altura).

Los valores de la velocidad específica n_s se derivan de los datos de la velocidad de operación por medio de la siguiente expresión:

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

en donde:

- n = velocidad en rpm
- Q = flujo en m^3/s
- H = altura de bombeo en m.

La velocidad específica no se afecta por el peso de los líquidos que se están manejando.

En la figura 13.2 se muestran las velocidades específicas de los diferentes tipos de impulsores de bombas centrífugas; en realidad no existe una línea de división real entre los varios diseños de impulsores.

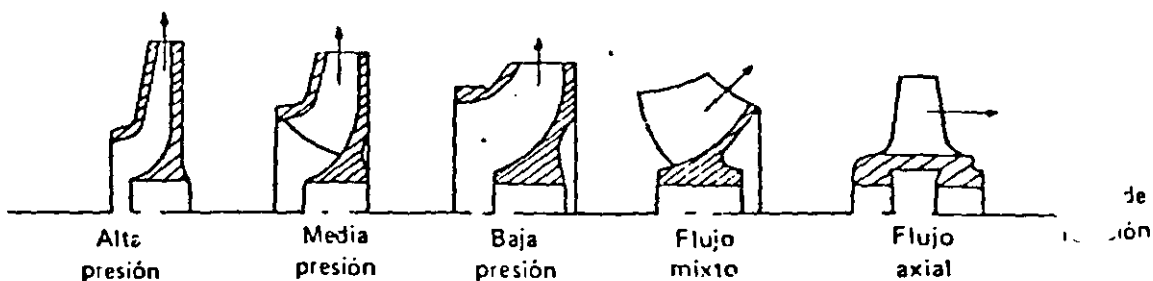
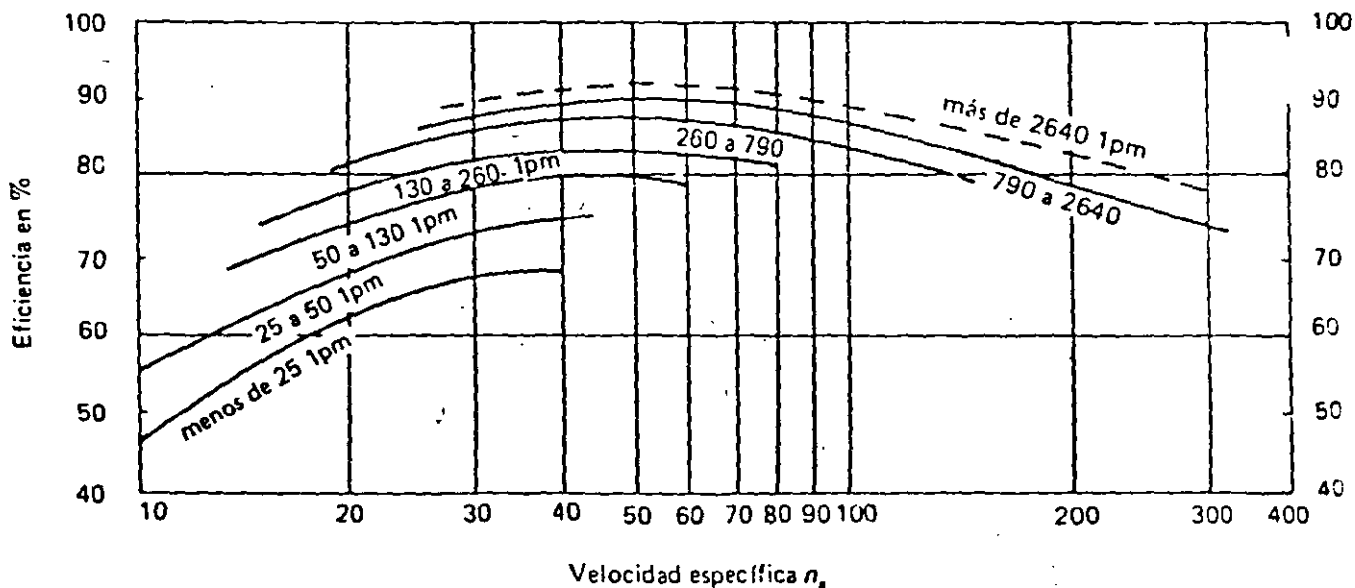


Fig. VII-2

A continuación se da un resumen de las principales leyes que gobiernan el comportamiento de las bombas.

A) Cambio en la velocidad de la bomba, con densidad y sistema constante.

a.- El flujo Q varía proporcionalmente con la velocidad (rpm)

b.- La presión o altura de bombeo varía con el cuadrado de la velocidad

c.- La potencia varía con el cubo de la velocidad

B) Cambio en el diámetro del impulsor, con rpm, densidad y proporciones de la bomba constante

a.- El flujo Q varía con el cubo del diámetro del impulsor

b.- La presión varía con el cuadrado del diámetro

c.- La velocidad tangencial (de la punta) varía proporcionalmente con el diámetro

d.- La potencia varía con la quinta potencia del diámetro

C) Cambio en la densidad, con el sistema y la presión constantes; - fijo el tamaño de la bomba y velocidad variable

a .- El flujo Q varía inversamente con la raíz cuadrada de la densidad

b .- La presión es constante

c .- Los rpm varían inversamente de la raíz cuadrada de la densidad

A diferencia de las bombas rotativas y alternativas, las bombas centrífugas suministran, a velocidad constante, cualquier capacidad entre cero y la máxima, dependiendo de las condiciones de altura, succión y diseño.

SELECCION DE BOMBAS

La mayoría de las bombas se adaptan a varios sistemas, sin embargo no necesariamente son eficientes, útiles o aún tolerables en todas las situaciones; para hacer la mejor selección, se deben proporcionar todos los datos posibles relevantes del medio ambiente del sistema, variaciones y otros requerimientos que deben conocerse .- A continuación se da un listado de puntos, que aunque no todos se aplican a una bomba determinada, si deben describirse todos los que sean pertinentes, en forma tan completa como sea posible con todas las solicitudes de compra.

i .- Operación general

- . Curva H-Q (altura-gasto) del sistema
- . Operación constante (de la bomba) o máximo 2 arranques en 24 horas
- . Operación intermitente o aproximadamente x arranques en 24 horas
- . trabajará _____ mínimo antes de parada
- . Una vez parada no se restablecerá por _____ mínimo
- . Número de horas de operación al año (de la bomba)
- . Si son bombas múltiples, forma de conexión (serie/paralelo)
- . Si son bombas múltiples describa la secuencia de arranque

Los ventiladores se emplean en la caldera para inyectar el aire para la combustión, además de circulación, evacuación y recirculación de gases de combustión principalmente; se emplean también para aire de sellos en las calderas de hogar presurizado.

Los ventiladores pueden definirse como una máquina volumétrica, que en forma similar a las bombas, mueve cantidades de aire o gases de un lugar a otro, para lo cual requiere vencer la resistencia al flujo, suministrando al fluido la energía necesaria para su movimiento; físicamente los elementos esenciales de los ventiladores son rotores con álabes y cajas o envolventes para coleccionar el aire o gas de entrada y dirigir su flujo.

La energía que se comunica al fluido por los ventiladores es similar a la del ciclo de compresores mostrado en la Fig. 1, sólo que la elevación de presión es pequeña en el caso de los ventiladores; el trabajo que se realiza en el ciclo de los ventiladores es igual a la diferencia de presión Δp por el volumen V de aire o gas manejado ($\Delta p V$). La diferencia de presión ya sea estática, de velocidad o total normalmente se mide en mm de columna de agua; en la Fig. 2 se muestra esquemáticamente la forma en que se miden las diferentes presiones, explicando su significado físico.

Existen dos tipos básicos de ventiladores:

- . axiales (propela, alabe, tuboaxial) Fig. V.1-5a
- . centrífugos o radiales (aspas radiales, curvas hacia adelante y curvas hacia atrás) Fig. V.1-5b

Los que normalmente se emplean en las calderas, son las axiales de alabes o aspas (tuboaxial) y las tres clases de centrífugos.

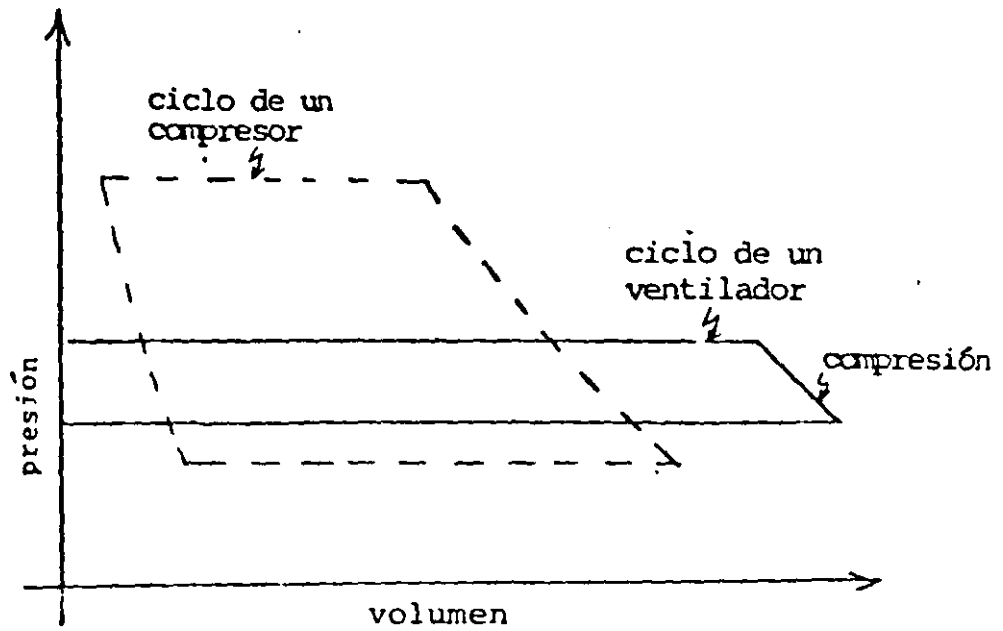


FIG. 1.- ESQUEMA COMPARATIVO DE CICLOS

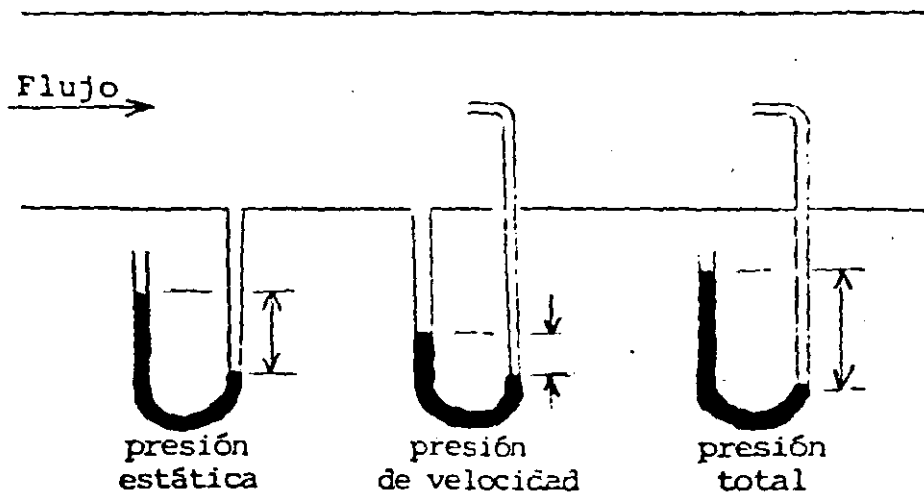
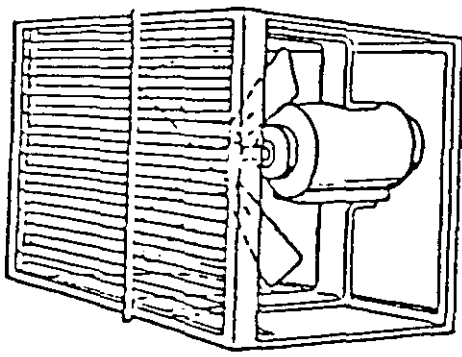
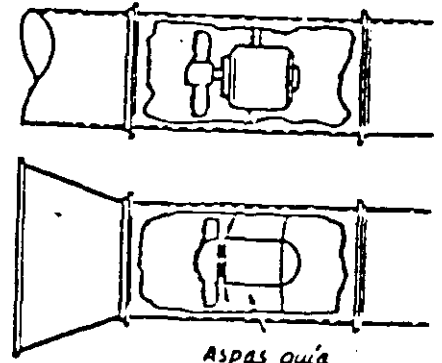
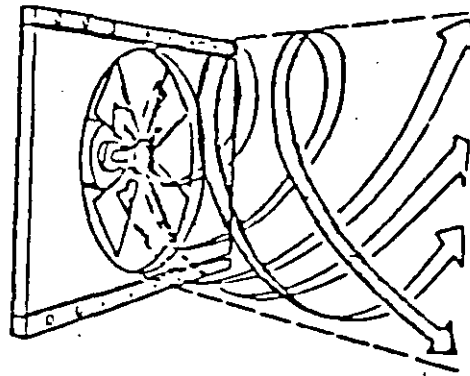


FIG. 2.- MEDICION DE LAS DIFERENTES PRESIONES DE LOS VENTILADORES

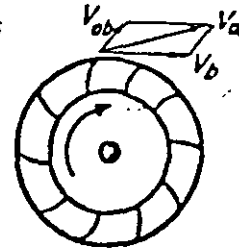
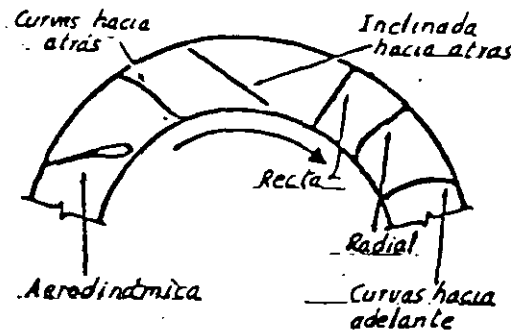
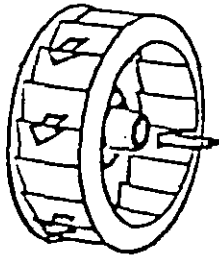
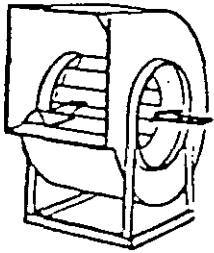


Propela

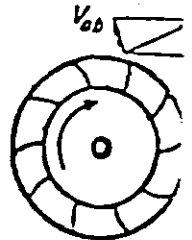


Tuboaxial

a - Axiales



Curvas hacia adelante



Curvas hacia atrás

b - Centrífugos

FIG. -- TIPOS BASICOS DE VENTILADORES

En la Fig 3, a, b, c y d se muestran las curvas de comportamiento típicas de eficiencia, potencia y presiones de los tipos de ventiladores empleados en las calderas. La diferencia de presión total o altura total h_t , es la suma de la altura estática h_e más la altura de velocidad h_v ; para el estudio de los ventiladores se distinguen la potencia estática HP_e referente a la altura estática y la potencia total HP_t referido a la altura total que se calculan en la siguiente forma:

$$HP_e = \frac{h_e v}{60 \times 75 \eta}$$

$$HP_t = \frac{h_t v}{60 \times 75 \eta}$$

en donde:

V = volumen de aire, en m^3/min (mcm)

η = eficiencia del ventilador

= 0.65 a 0.70 para centrífugos pequeños

= 0.75 a 0.80 que centrífugos grandes

= 0.80 a 0.85 para axiales grandes

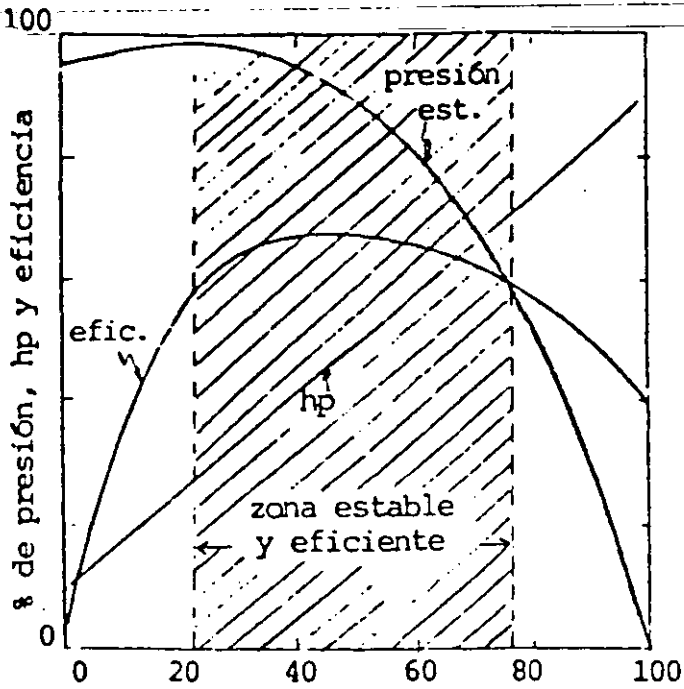
La altura y la potencia varían inversamente con la temperatura absoluta del fluido T y directamente con la presión absoluta del fluido P ; las correcciones se efectúan en la siguiente forma:

$$h_a = h \frac{P_a T_d}{d P_a T_a}$$

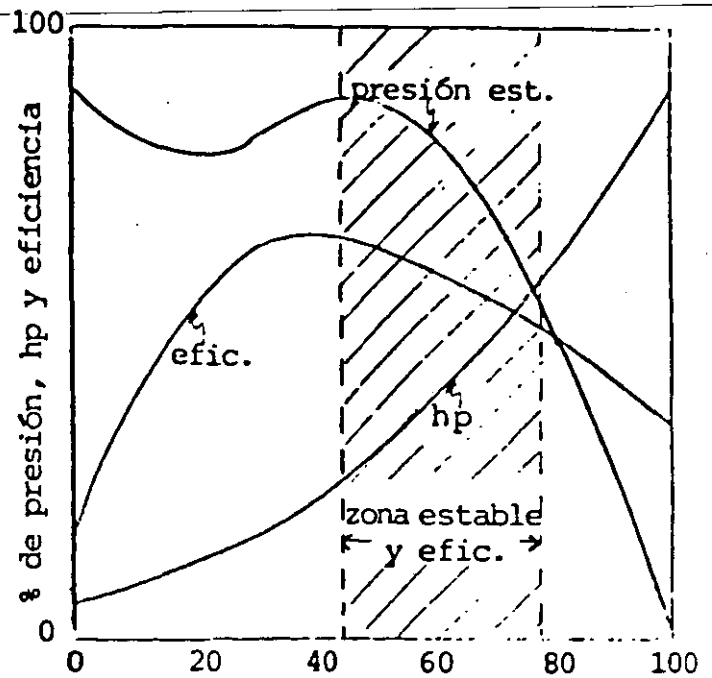
$$HP_a = HP \frac{P_a T_d}{d P_a T_a}$$

Los índices a y d indican condiciones de antes y después de la corrección respectivamente.

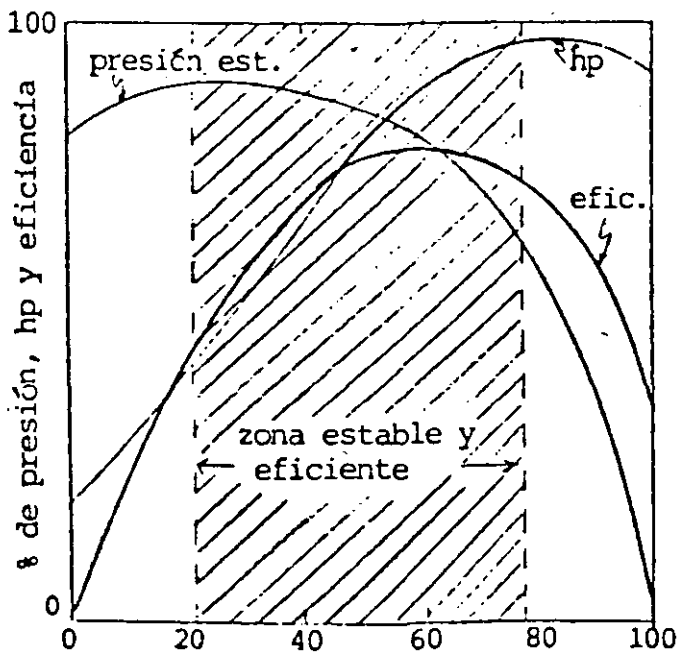
El rango de presiones de trabajo de los ventiladores es aproximadamente el siguiente:



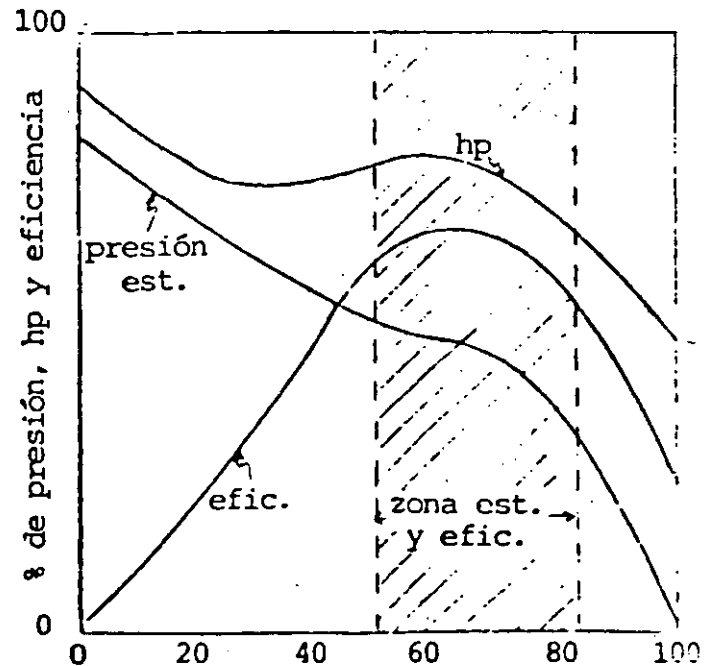
a.- ASPAS RADIALES (CENTRIFUGO)



b.- ASPAS CURVAS HACIA ADELANTE (CENT.)



c.- ASPAS CURVAS HACIA ATRAS (CENT.)



d.- ALABES AXIALES

FIG. .- CURVAS CARACTERISTICAS DE VENTILADORES CENTRIFUGOS Y ALABE AXIAL

- ventiladores de propela, de 1 a 25 mm de columna de H_2O
- tubo axiales, de 6 a 60 mm de columna de agua.
- álabe axiales, de 10 a 1500 mm de columna de agua
- centrífugos, de 10 a 2000 mm de columna de agua.

De acuerdo con la Fig 3d los ventiladores de álabes axiales tienen su máxima eficiencia a un porcentaje más alto de carga que los ventiladores centrífugos.

A pesar de que los ventiladores radiales son menos eficientes que los de flujo axial, su bajo costo en la inversión inicial y en el mantenimiento hacen que se continúe utilizando en mayor proporción en las calderas.

Cada uno de los 3 tipos de ventiladores centrífugos tiene sus propias características que los hacen adecuados para cada servicio, siendo éstas las siguientes:

Los ventiladores de aspas radiales tienen las siguientes características:

- construcción pesada del rotor que puede soportar moderadas y pesadas cargas de choque.
- la forma radial de las aspas desarrolla y soporta altas presiones.
- el diseño de las aspas radiales requiere únicamente velocidades medias en la periferia.
- la fabricación es sencilla y barata, además de que las aspas gastadas pueden ser relevadas y reemplazadas fácilmente.
- para aplicaciones corrosivas y erosivas las aspas pueden fabricarse de aleaciones especiales o recubiertas para incrementar su vida útil.
- la construcción abierta de la rueda y el diseño plano de las aspas soporta fuerzas centrífugas que minimizan el material de fabricación y las vibraciones.

- ~~tienen baja eficiencia comparadas con los otros tipos,~~
- pueden construirse en tamaños grandes
- tienen alto costo inicial
- la curva de elevación de potencia es moderada
- tiene tolerancia liberales para su operación
- tiene un alto nivel de ruido
- es estable de 20 a 100%

Los ventiladores centrífugos de aspas curvas hacia atras trabajan aceptablemente en medios cargados con polvo y partículas muy finas, pero no se fabrican en forma robusta por lo que no pueden proporcionar o soportar altas presiones; requiere altas velocidades de rotación y no es suficientemente durable en aplicaciones que incluya materiales corrosivos o erosivos, siendo en general sus características las siguientes:

- alta eficiencia
- alta velocidad
- tamaños medianos
- costo inicial moderado
- limitación de potencia
- buena para recubrimientos ligeros de corrosión
- temperaturas de operación limitadas
- requiere tolerancia cerradas durante la operación
- operación con buena eficiencia particularmente sin envolvente o difusor
- bajo nivel de ruido
- estable de 20 a 100%

Los ventiladores centrífugos de aspas curvas hacia adelante no deben considerarse para aplicaciones de extractores industriales a menos que el medio esté libre de polvo o de otras partículas, ya que la curvatura hacia adelante de la aspas tiene la tendencia a atrapar y retener partículas que causan condiciones de desbalance; estos ventiladores tienen las siguientes características:

- eficiencia media
- baja velocidad
- tamaños pequeños
- bajo costo inicial
- elevación rápida de la curva de potencia
- de regular a malo para recubrimientos de corrosión
- bueno para altas temperaturas
- tolerancias medias de operación
- deberá usarse envolvente o difusor
- bajo nivel de ruido
- estable de 40 a 100%

El número óptimo de aspas en el rotor debe determinarse experimentalmente aunque en general demasiadas aspas incrementan la fricción a través del ventilador y también incrementan la frecuencia del ruido. Los ventiladores de aspas radiales tienen de 6 a 12 aspas, los de aspas curvas hacia atrás tienen de 16 a 24 y los de aspas hacia adelante tienen de 32 a 66 aspas.

La forma en que los ventiladores se ven afectados por los cambios de las condiciones de operación pueden predecirse por medio de un conjunto de reglas, conocidas como leyes de los ventiladores que a continuación se indican:

Cómo calcular el comportamiento de los ventiladores por diferentes condiciones de operación.

- 1) Dado el tamaño del ventilador, resistencia del sistema y densidad del aire

Cuando la velocidad cambia:

- a) La capacidad varía directamente con la velocidad

$$\text{ó, } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}$$

b) La presión varía en proporción al cuadrado de la velocidad

$$\text{ó, } \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} \right)^2$$

c) La potencia varía en proporción a la velocidad al cubo

$$\text{ó } \frac{\text{hp}_1}{\text{hp}_2} = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} \right)^3$$

Cuando la presión cambia:

a) La capacidad y velocidad varía en proporción a la raíz cuadrada de la presión o,

$$\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}, \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/2}$$

b) La potencia varía en proporción a la presión a los (3/2) de potencia o,

$$\frac{\text{hp}_1}{\text{hp}_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{3/2}$$

2) A presión constante, densidad, capacidad y ventilador geométricamente similar.

Cuando el tamaño del ventilador (diámetro de la rueda) cambia:

a) La capacidad y la potencia varían en proporción al cuadrado del diámetro de la rueda o,

$$\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{\text{hp}_1}{\text{hp}_2} = \left(\frac{\text{dia}_1}{\text{dia}_2} \right)^2$$

- b) La velocidad varía inversamente en proporción al diámetro de la rueda o,

$$\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} = \frac{\text{dia}_2}{\text{dia}_1}$$

Cuando la velocidad y el diámetro de la rueda cambian:

- a) La capacidad varía en proporción al producto de la velocidad y el diámetro de la rueda al cubo, o

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2} \times \left(\frac{\text{dia}_1}{\text{dia}_2}\right)^3$$

- b) La presión varía en proporción al producto del cuadrado de la velocidad y del diámetro de la rueda al cuadrado o,

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}\right)^2 \times \left(\frac{\text{dia}_1}{\text{dia}_2}\right)^2$$

- c) La potencia varía en proporción al producto de la velocidad al cubo y el diámetro de la rueda elevado a la quinta potencia o,

$$\frac{\text{hp}_1}{\text{hp}_2} = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}\right)^3 \times \left(\frac{\text{dia}_1}{\text{dia}_2}\right)^5$$

- d) La potencia también varía en proporción al producto de la capacidad y presión o,

$$\frac{\text{hp}_1}{\text{hp}_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \times \frac{P_1}{P_2}$$

3) Presión constante

- a) Velocidad, capacidad y potencia varían inversamente con la raíz cuadrada de la densidad o,

$$\frac{rpm_1}{rpm_2}, \frac{Q_1}{Q_2}, \frac{hp_1}{hp_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{1/2}$$

- b) Y entonces la velocidad, capacidad y potencia varían inversamente con la raíz cuadrada de la presión barométrica y directamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta:

$$\frac{rpm_1}{rpm_2}, \frac{Q_1}{Q_2}, \frac{hp_1}{hp_2} = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^{1/2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{1/2}$$

4) Velocidad y capacidad constantes

- a) La potencia y presión varían directamente con la densidad y presión barométrica e inversamente con la temperatura absoluta.

$$\frac{hp_1}{hp_2}, \frac{P_1}{P_2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

5) Cantidad de flujo constante por peso

- a) La capacidad, velocidad y presión varían inversamente con la densidad (o inversamente con la presión barométrica, directamente con la temperatura absoluta) o

$$\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{rpm_1}{rpm_2}, \frac{P_1}{P_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{b_2}{b_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

b) La potencia hp_1 varía inversamente con la densidad al cuadrado o $\frac{hp_1}{hp_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$

c) También varía inversamente con la presión barométrica al cuadrado y directamente con la temperatura absoluta al cuadrado o,

$$\frac{hp_1}{hp_2} = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^2 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2$$

Quando la temperatura y presión varían:

d) La capacidad y velocidad varían en proporción a la raíz cuadrada del producto de la presión y temperatura absoluta:

$$\frac{Q_1}{Q_2}, \frac{rpm_1}{rpm_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \times \frac{T_1}{T_2}\right)^{1/2}$$

e) La potencia varía en proporción a la raíz cuadrada del producto de la presión al cubo y temperatura absoluta o

$$\frac{hp_1}{hp_2} = \left(\frac{P_1^3}{P_2^3} \times \frac{T_1}{T_2}\right)^{1/2}$$

Los ventiladores geoméricamente similares tienen características operativas similares. Por lo tanto, el comportamiento de un ventilador se puede predecir conociendo como opera un ventilador más pequeño o más grande. Los tres factores principales de comportamiento (flujo, velocidad, carga), están ligados en los conceptos de velocidad específica y diámetro específico.

Velocidad específica.- Son las rpm a las que un ventilador operaría si se redujera proporcionalmente en tamaño para suministrar 1 mcm de aire en condiciones estándares, con-

tra una presión estática de 1 cm de columna de agua.

Diámetro específico.- Es el diámetro del ventilador requerido para suministrar 1 mcm de aire estandar contra una presión estática de un cm de columna de agua a una velocidad específica dada. De las leyes de los ventiladores se obtienen estas ecuaciones:

$$\text{Velocidad específica } (N_e) = \frac{\text{rpm}(\text{mcm})^{1/2}}{(\text{PE})^{3/4}}$$

$$\text{Diámetro específico } (D_e) = \frac{D(\text{PE})^{1/4}}{(\text{mcm})^{1/2}}$$

donde el flujo en mcm está en condiciones estándar, PE es la presión estática (cm. de agua), y D es el diámetro del ventilador (cm).

Para la selección de los ventiladores debe determinarse la curva de resistencia del sistema que será contra la que ^{ha} trájese el ventilador tal como se muestra en la Fig.; esta información junto con el flujo de aire necesario, son los parámetros principales para la selección de los ventiladores, además de las características mencionadas anteriormente de cada uno de los tipos.

Para la selección del tipo de ventilador se calcula la velocidad específica N_e a las condiciones estándar y de acuerdo con la gráfica de la Fig. , se selecciona el tipo más apropiado de acuerdo con la mejor eficiencia estática. En esta misma gráfica puede obtenerse también, con la velocidad específica, el diámetro específico del ventilador y a partir de éste determinar el diámetro real aproximado del ventilador.

La operación de ventiladores en paralelo y en serie dentro de un sistema, se muestra en las Figs, ^{VII-5} observando ^{se} que existe una zona de inestabilidad para cierto tipo de ventiladores

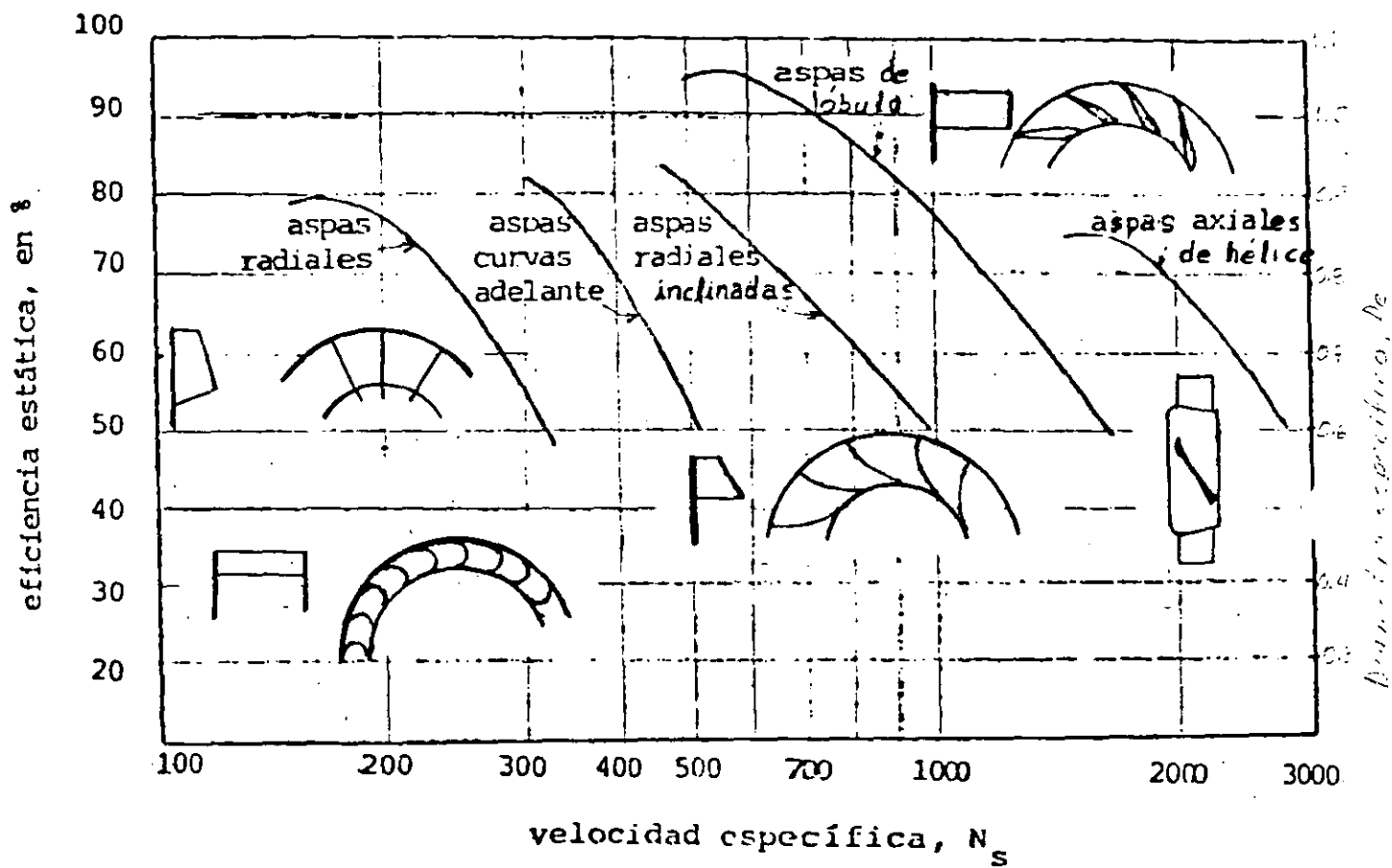
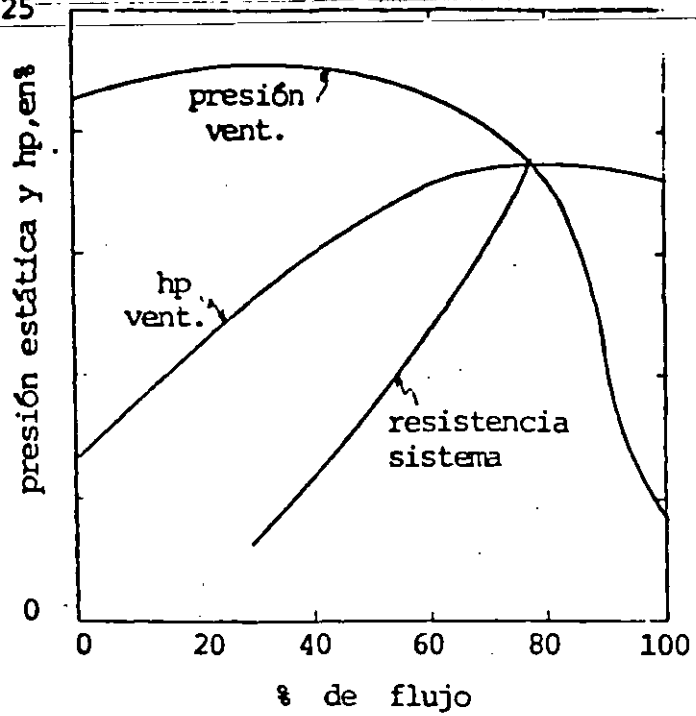
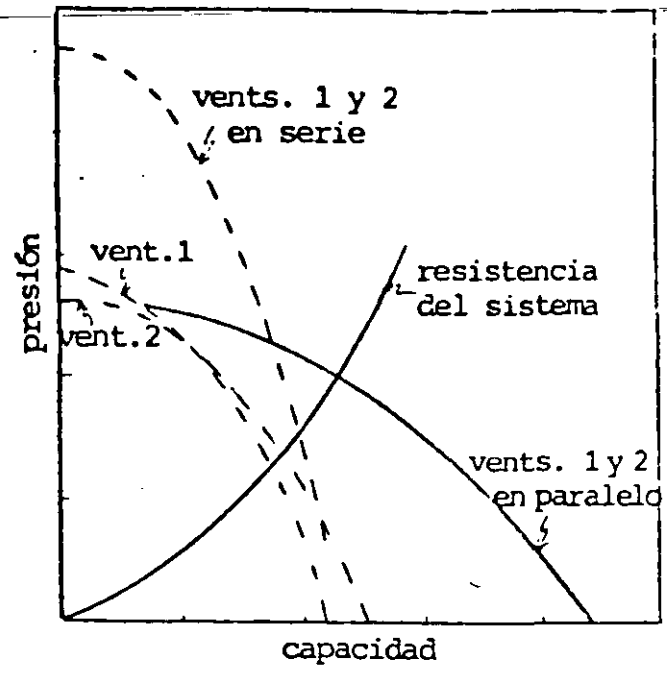


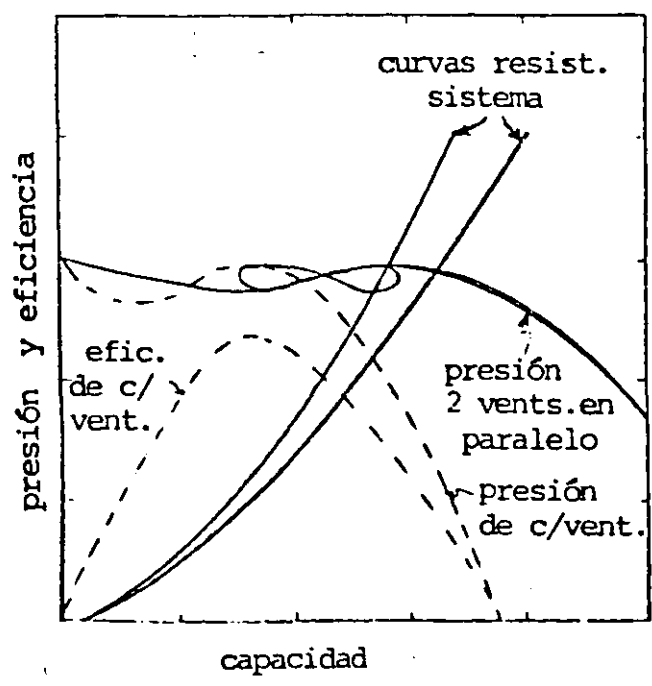
FIG. -- EFICIENCIAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE VENTILADORES



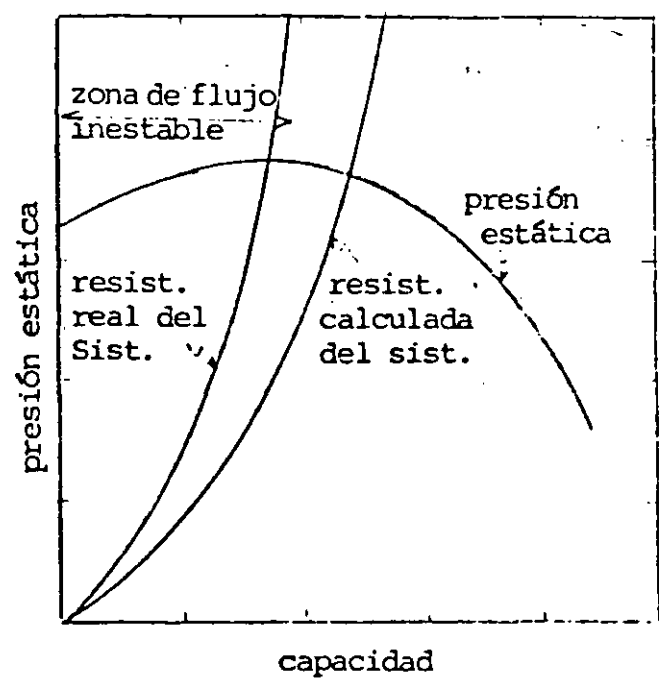
a.- Curva de resistencia del sistema y característica del ventilador



b.- Conexión de ventiladores



c.- Operación inestable de dos ventiladores en paralelo



d.- Zona de inestabilidad por error de cálculo

FIG. .- CURVAS DE OPERACION DE VENTILADORES



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

**EQUIPOS COMPONENTES PARTES
AUXILIARES Y ACCESORIOS**

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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.

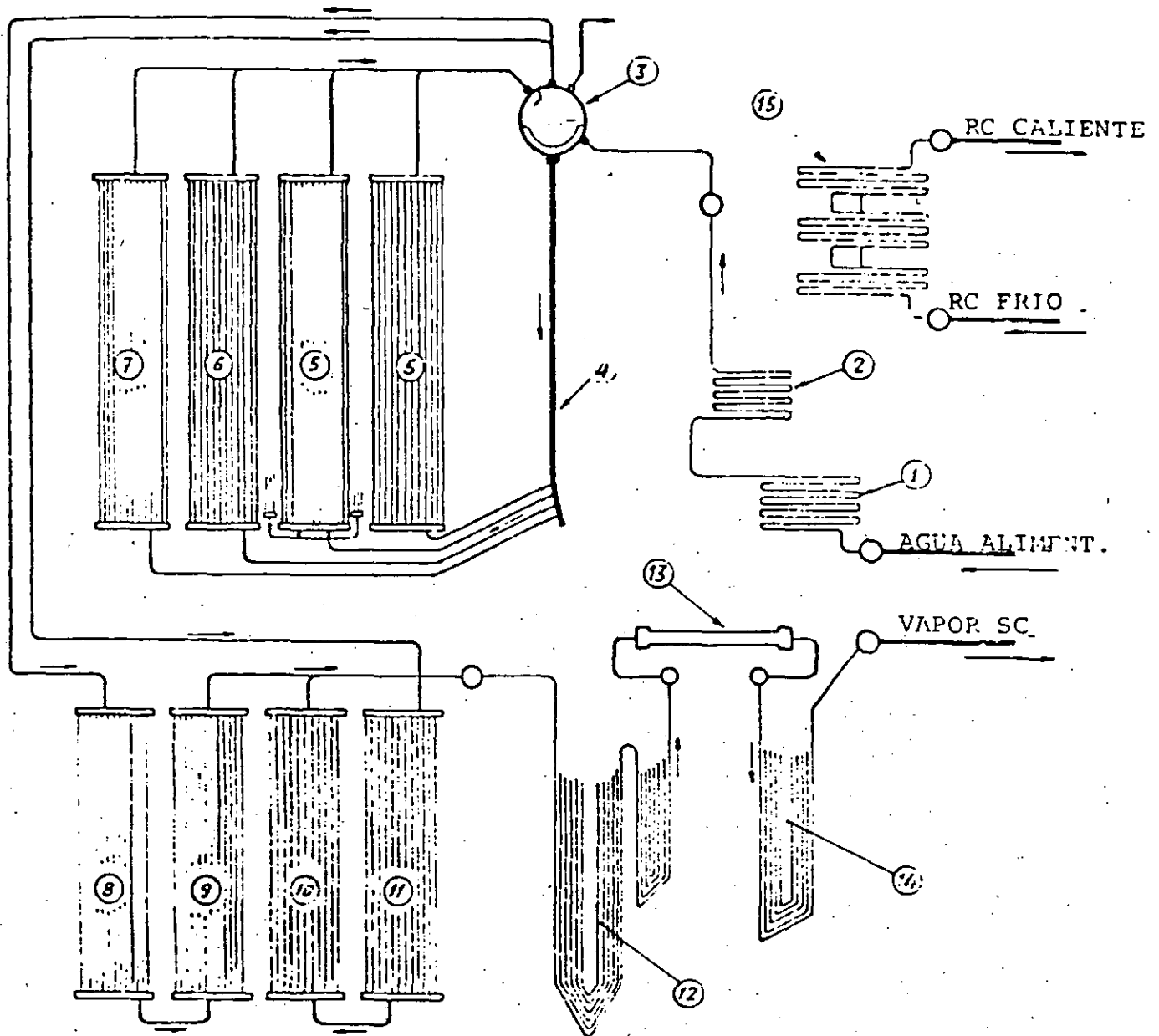


FIG VIII-1.- CIRCUITO DE AGUA - VAPOR EN UNA CALDERA DE CIRCULACION NATURAL.

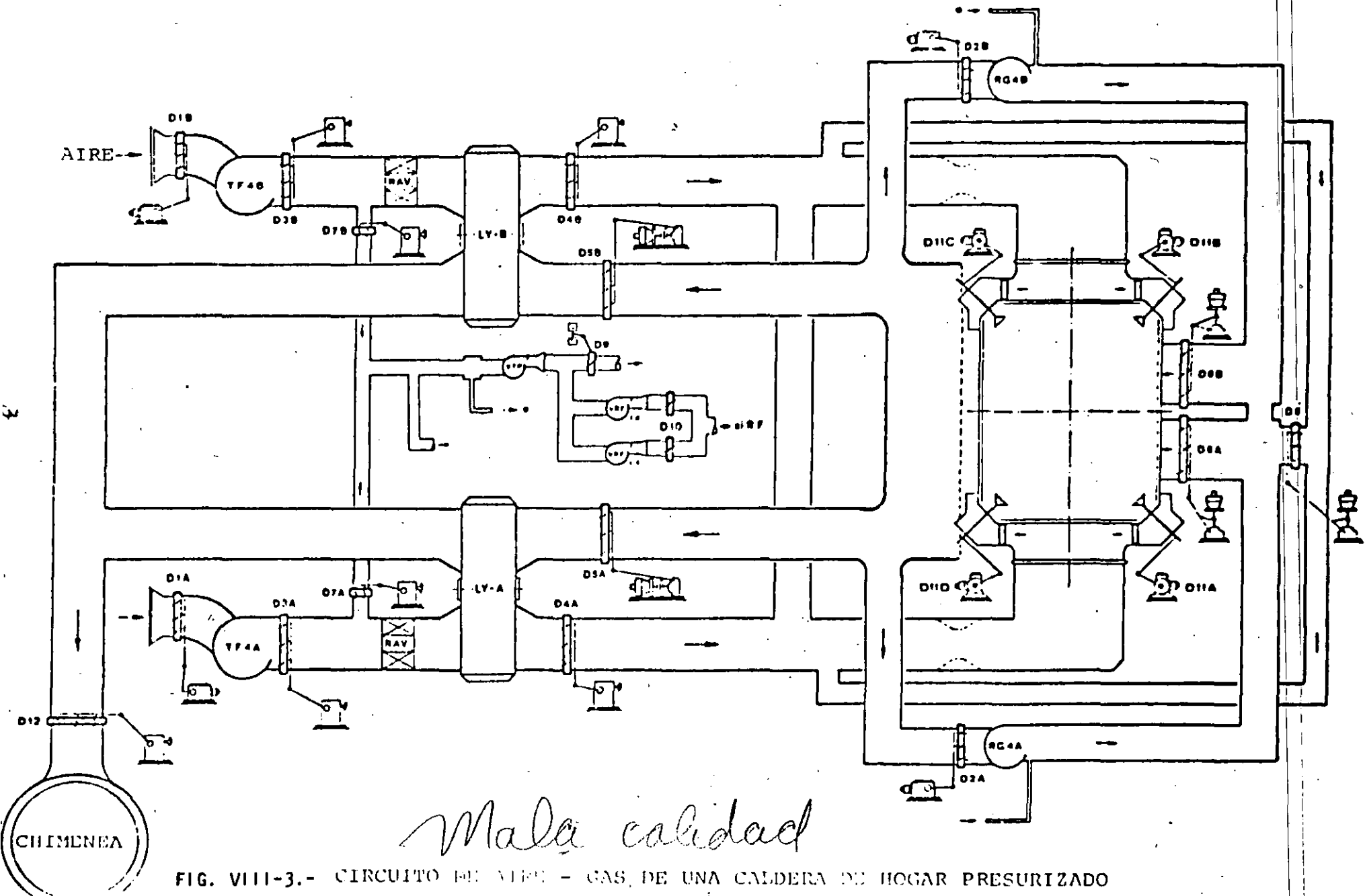


FIG. VIII-3.- CIRCUITO DEL AIRE - GAS, DE UNA CALDERA DE HOGAR PRESURIZADO

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 inoxidables, 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 contituídos por un) sistma 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

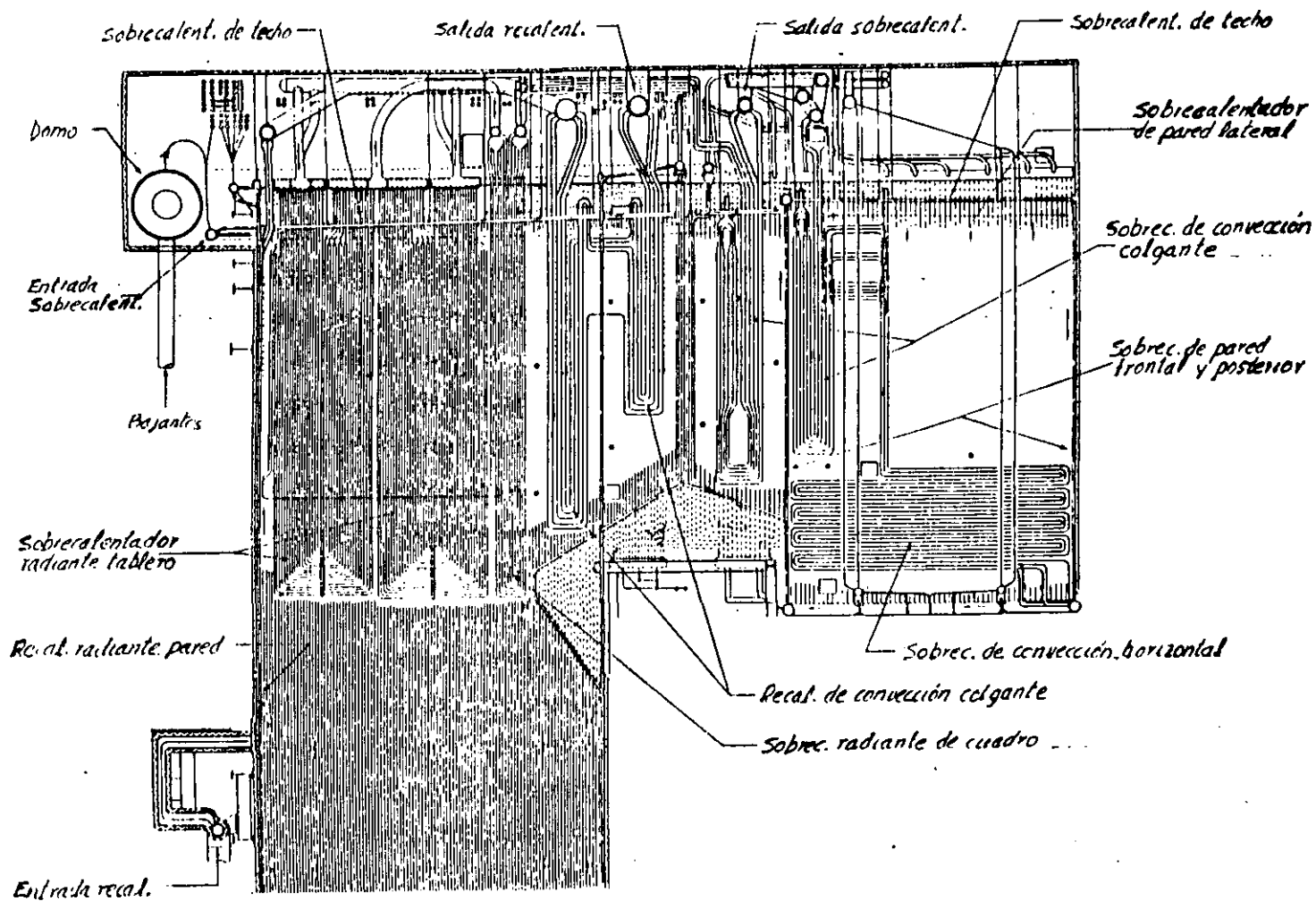


FIG. VIII-5.- ARREGLOS DE SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

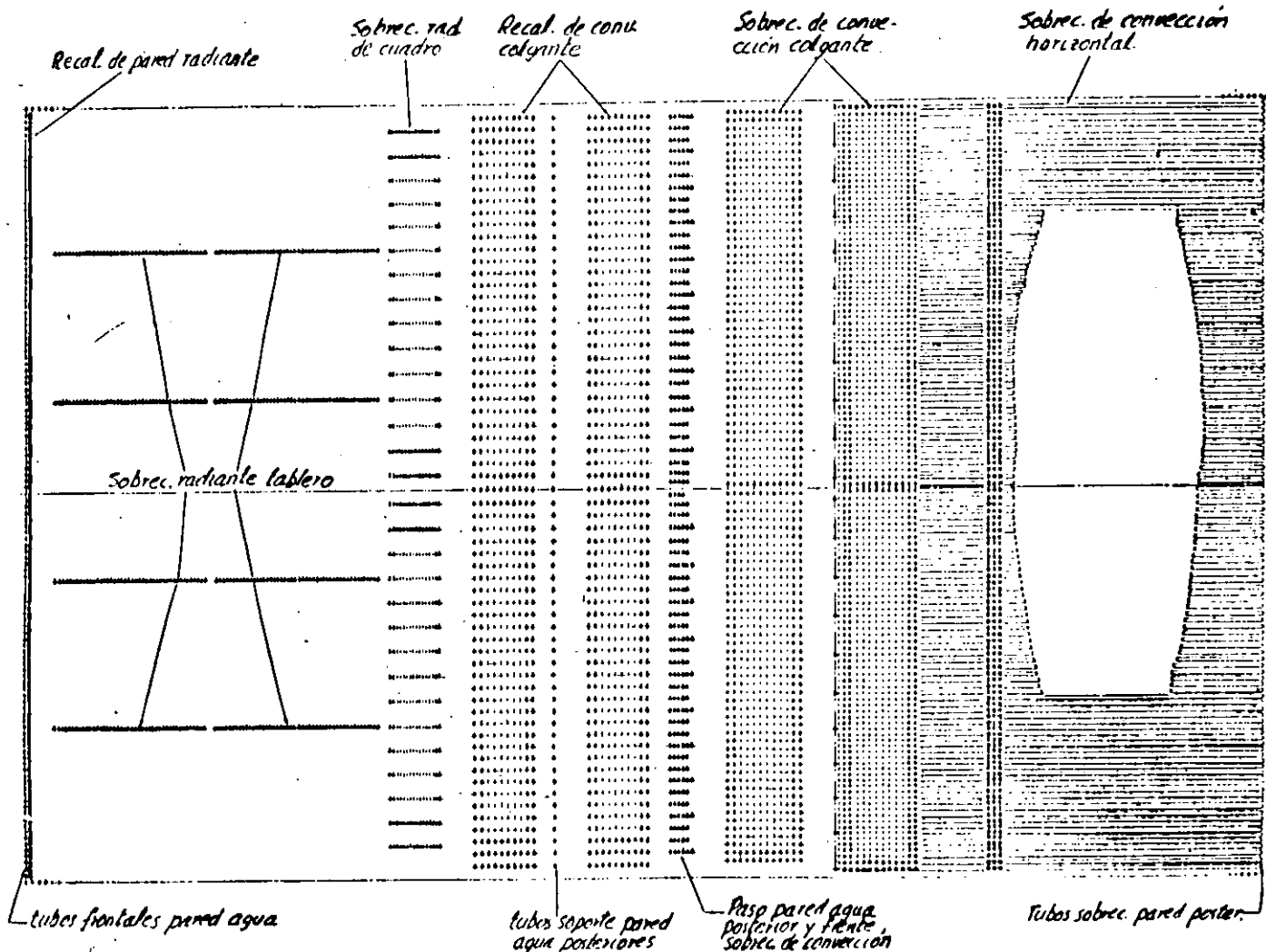


FIG. VIII-6.- VISTA SUPERIOR DE ARREGLO DE PAREDES DE AGUA,
 SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES.

~~serpentinae 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 serpentines montados en paralelo; en el caso, cuando no es posible una uniformidad de la resistencia hidrodinámica en los diferentes serpentines, se montan diafragmas de obturación parcial en las secciones de entrada.

El doblado de los tubos para fabricar los serpentines 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 serpentines 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 previene 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.

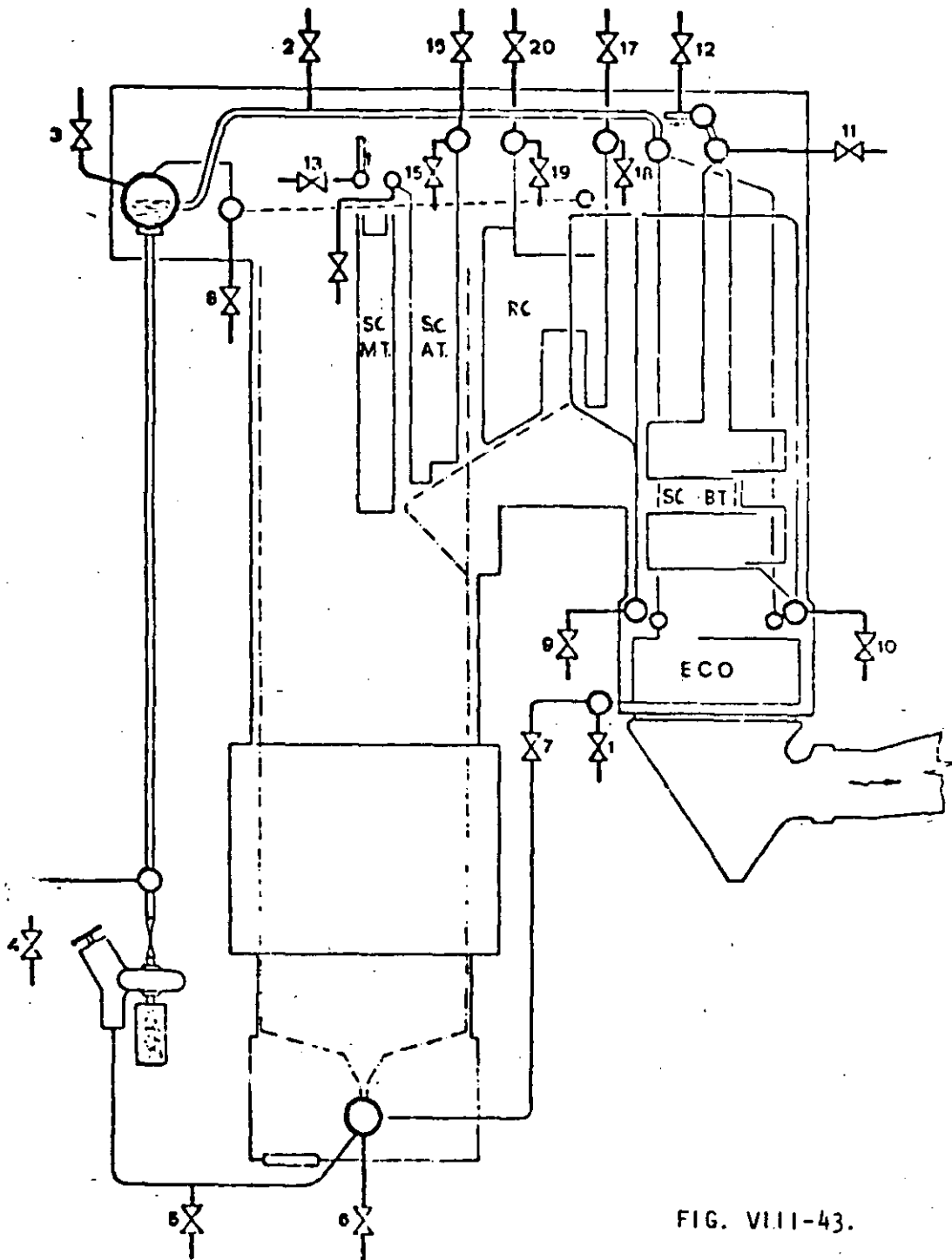


FIG. VIII-43.

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**

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

CIRCULACION DEL AGUA

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

I. - FUNDAMENTOS TEORICOS

Para la producción continua de vapor en el sistema hervidor, es necesario una circulación constante de agua en las pantallas y fascículos para que el vapor formado en las paredes de los tubos sea reemplazado con nuevas cantidades de agua que a su vez se evaporará.

La circulación de agua puede ser natural o forzada. En todos los casos la cifra que caracteriza la circulación es un coeficiente de recirculación "n" definido para cada tubo o ensamble de tubos con la relación entre flujo de agua introducido W_a y el flujo de vapor producido W_v en la siguiente forma:

$$n = \frac{W_a}{W_v}$$

En los casos de calderas de circulación forzada o de un paso, el agua introducida en la caldera es integralmente vaporizada en tal forma que el coeficiente de recirculación es $n = 1$ constituye evidentemente el valor más pequeño que puede tener este coeficiente.

En el caso de calderas de circulación controlada, una bomba de recirculación asegura el flujo de agua en el circuito en el sistema hervidor-domo separador con un coeficiente de recirculación a la carga nominal "n" que varía de 4 a 12, pero con valores más usuales de 8 a 10.

El problema más complicado es cuando la circulación de la caldera se provee en forma natural, es decir, con circulación natural; en este caso el flujo de agua introducida en cada tubo no está asegurada por medio de una bomba, sino que se hace por diferencia de presión que se origina a causa del calentamiento más fuerte de una rama del circuito y en consecuencia el coeficiente de circulación es desconocido. Cuando este no se verifica por un cálculo adecuado hidrodinámico puede ocurrir que en algunos tubos aparezca falta de circulación y que se produzca sobrecalentamiento local de vapor seguido por una de--

gradación térmica del material de los tubos. El coeficiente de recirculación normal en las calderas de circulación natural es de 10 a 40 y en algunos casos en calderas pequeñas puede alcanzar cifras de 100 a 400. El sistema más simple de circulación natural es el formado por dos tubos unidos a un tambor en la parte superior como el mostrado en la Fig. 11.1. Al tubo descendente (2) llega un flujo de calor menor que al tubo elevador (1) (en el caso de que el domo se coloque fuera del paso de los gases no va a llegar flujo de calor al tubo descendente); debido a la mezcla de agua de vapor formado en la columna (1) el peso específico P_{1g} del fluido en esta columna va a ser menor que el peso específico P_{2g} del fluido de la columna (2) y en consecuencia en el punto de unión (3) la columna (1) va a ejercer una presión estática menor que la ejercida por la columna (2). La diferencia entre las dos presiones estáticas es el elemento que propicia la circulación y la velocidad de circulación se va a establecer con los valores de la caída de presión dinámica debida a la circulación cuando sea igual a la diferencia de presión estática más arriba.

La presión estática ejercida en el punto 3 por la columna del fluido (1) va a ser:

$$\Delta P_{st1} = \int_0^H \rho_{x1} g dx$$

En vista de que ρ_{x1} es variable en toda la longitud de la columna porque tiene una proporción diferente de agua y vapor en una sección. La presión estática ejercida en el punto (3) con la columna 2 va a ser:

$$\Delta P_{st2} = \int_0^H \rho_{x2} g dx$$

En donde:

ρ_{x2} puede ser también variable si al tubo 2 llega un flujo de calor o puede ser constante con masa específica del agua de saturación en el caso de que la columna 2 sea exterior a la caldera.

Para explicitar las relaciones del tipo anterior es necesario determinar los valores de la masa específica dentro de una sección cualquiera x de un tubo en que existe una mezcla de agua saturada y vapor; si se designa a la sección total del tubo como s , la velocidad del flujo de agua como w , la masa específica del agua como ρ' ; el flujo de agua como Gx y la sección parcial del tubo por el fluye agua como s_w , la relación de continuidad da la siguiente ecuación:

$$s_w \rho' w = Gx$$

En el resto de la sección del tubo $(s - s_w)$ va a circular un flujo de vapor Dx con una masa específica ρ'' y con una velocidad relativa con respecto al agua de w_r ; la relación de continuidad para esta porción del tubo va a ser:

$$(s - s_w) \rho'' (w + w_r) = Dx$$

La masa específica de la mezcla de agua-vapor ρ_x en la sección será:

$$\rho_x = \rho' \frac{s_w}{s} + \rho'' \left(1 - \frac{s_w}{s}\right)$$

En tubos verticales largos de presiones medias y altas puede considerarse que la velocidad relativa de las burbujas de vapor en el agua es nula, es decir, $w_r = 0$.

Llamando G al flujo de agua que entra en la sección inicial del tubo, para cualquier sección se obtiene:

$$Gx + Dx = G$$

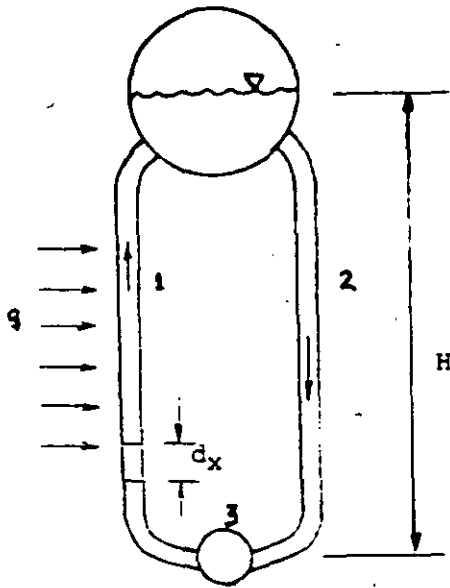


FIG. 1 ESQUEMA DE CIRCULACION NATURAL.

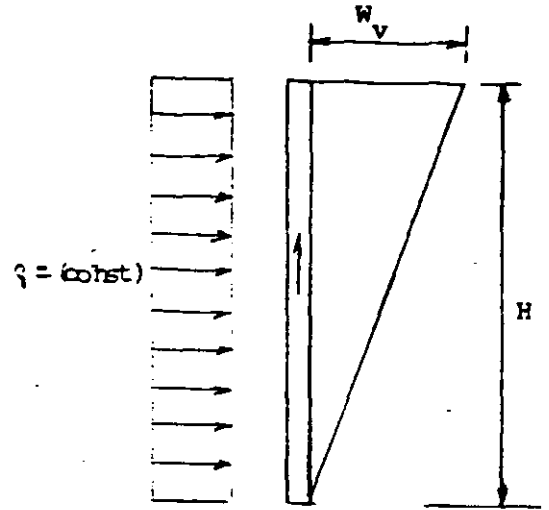


FIG. 2 VARIACION DE FLUJO DE VAPOR EN TUBO.

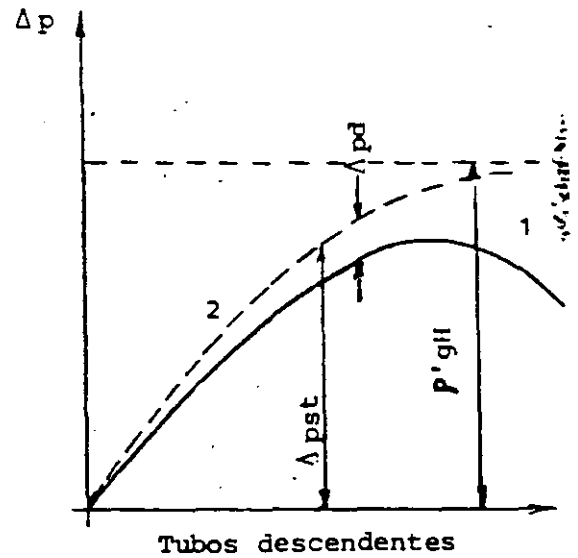
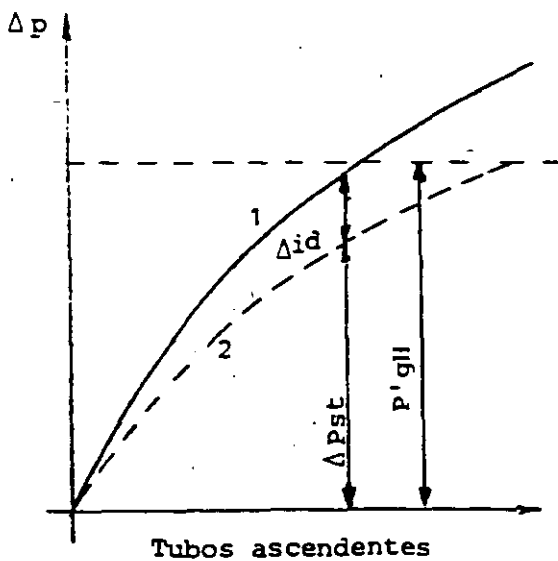


FIG. 3 DIAGRAMAS DE CIRCULACION EN TUBOS EVAPORADORES

2.- TIPOS DE CIRCUITOS AGUA-VAPOR

Los diferentes tipos de circuitos de agua-vapor, que se han desarrollado en las calderas, tienen el objetivo de asegurar una circulación eficiente de la mezcla agua-vapor, en los tubos evaporadores siendo éste, un problema de importancia fundamental en el diseño de los generadores de vapor; la circulación insuficiente en un tubo, crea un estancamiento o paralización de las burbujas de vapor sobre la superficie interna con el consecuente aumento de la temperatura de metal. Esto, además, provoca el depósito en esa zona, de los óxidos que inevitablemente se transportan a la caldera.

Los óxidos, tienden a depositarse en la zona de estancamiento del vapor y en las zonas de mayor evaporación, dando inicio al fenómeno de corrosión e incrustación y por tanto, en breve tiempo el sobrecalentamiento del metal y a continuación la rotura del tubo.

Si la circulación es particularmente ineficiente, se tiene el riesgo de una fuerte disminución del coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo y agua, con relación al de diseño y como el tubo está expuesto a la flama, se alcanzan temperaturas prohibitivas para la misma vida del tubo.

El análisis de todos los factores que influyen la circulación es complejo y las soluciones adoptadas para su perfeccionamiento en el diseño de calderas son sustancialmente diferentes y pueden agruparse en cuatro tipos principales:

- . Circulación Natural (Fig. XI-12)
- . Circulación Controlada (Fig. XI-12)
- . Circulación Forzada (Fig. XI-13)
- . Circulación Combinada (Fig. XI-14)

Enseguida, se hace una breve discusión de éstos cuatro tipos de circulación.

CIRCULACION NATURAL

Este tipo de circulación, es el que ha sido descrito en la sección anterior.

CIRCULACION CONTROLADA

En las calderas que funcionan a presión elevada (más de 150 kg/cm^2), es muy difícil realizar la circulación natural, puesto que a esas presiones se reduce la diferencia de peso específico entre el agua y el vapor que constituye el "motor" de la circulación, aumentando el peligro de que alguna parte de la caldera no tenga circulación, con las consecuencias de sobrecalentamiento y rotura de tubos.

Aunque en teoría, se puede obtener circulación natural hasta unos 200 kg/cm^2 de presión, con tubos de bajas pérdidas de carga por fricción, únicamente se podría obtener una relación de circulación (flujo de agua / flujo de vapor producido) de 6, contra una relación mínima de 8 requerida por seguridad, en virtud de que existen muchas condiciones de funcionamiento real, que se apartan de las condiciones ideales de diseño.

Para resolver el problema anterior, se refuerza el mecanismo de circulación, instalando una o más bombas en el circuito de vaporización, y de esta forma se asegura que se le imprime al agua, la presión necesaria para vencer la resistencia del sistema de tuberías, asegurando la circulación constante del fluido y evitando el peligro de sobrecalentamiento. A la bomba se le denomina bomba de circulación de la caldera (BCC) y al sistema de circulación, "circulación controlada".

~~La instalación de la bomba se efectúa en los tubos de bajada (down - - comers) del domo superior, que van a los colectores de alimentación - del esquema de vaporización, mediante un cabezal de succión de las bombas.~~

El refuerzo requerido de la bomba, es solamente el necesario para sustituir el de la circulación natural y vencer la resistencia del circuito, es decir, se trata de valores del orden de 2.5 a 3.5 atmósferas, - siendo suficiente un solo impulsor de bomba centrífuga, como el mostrado en la Fig. XI-15.

La fabricación de ésta bomba, debe ser muy precisa, para garantizar - una alta disponibilidad en las condiciones del medio de alta presión y temperatura; el motor eléctrico está sumergido en el agua a la misma - presión de la bomba, únicamente aislado (de la bomba) por medio de un manguito largo sobre el eje. El motor eléctrico tiene un circuito de - enfriamiento, para evitar daños al aislamiento que soporta como máximo unos 80°C; en la flecha tiene un impulsor auxiliar para la circulación del agua de enfriamiento hacia el motor y a un cambiador de calor de - superficie externo. En la Fig. XI-16, se muestra un esquema de protección del circuito de enfriamiento del motor de la bomba.

Las ventajas de la circulación controlada, son principalmente las siguientes:

- Al poder admitir en el circuito de vaporización una caída de presión, puede reducirse el diámetro de la tubería, que a igualdad de condiciones de operación, representa un espesor menor; la reducción de materiales significa una notable reducción de costos de fabricación.
- Se puede obtener una protección sin riesgo con una relación de circulación de 4; se puede disponer mediante orificios calibrados del

gasto óptimo a cada tubo, con relación al calor que absorbe y al trayecto que sigue.

- . La circulación activa, asegura una buena uniformidad en las temperaturas de los tubos, siendo posible la construcción de paredes de tubos soldados sin el peligro de tensiones anormales debidas a excesiva diferencia de temperatura en tubos adyacentes.
- . La circulación, es independiente del desarrollo de la combustión, y por lo tanto, se asegura también durante los arranques y los paros de la caldera.

Entre las desventajas de la circulación controlada, que es necesario considerar, están las siguientes:

- . Un trabajo más preciso en la fabricación de los tubos, en función del menor espesor.
- . La inclusión de la bomba, representa no sólo un aumento en el costo inicial, sino también un mayor costo de operación, debido al consumo de energía eléctrica.
- . Mayor indisponibilidad parcial o total de la caldera, en caso de trabajos o mantenimiento de la bomba.

CALDERAS DE CIRCULACION FORZADA

En este tipo de calderas, se elimina el domo superior o de vapor, y en condiciones normales de funcionamiento, el fluido recorre en una sola vuelta el circuito de vaporización. La circulación se obtiene por el impulso comunicado al agua, por la bomba de agua de alimentación, dismin-

sionada para vencer la resistencia interna del circuito de la caldera.

Existen diversos tipos de calderas de circulación forzada, que atendiendo al mismo principio de funcionamiento, difieren entre ellos por la solución constructiva adoptada; entre éstos, se distinguen los siguientes tipos:

- . Caldera Benson (Alemania)
- . Caldera Sulzer (Suiza)
- . Caldera UP (E.U.A.)

La falta de domo, representa alguna dificultad, por los cuidados en la zona de vaporización y por la eliminación de las impurezas contenidas en el agua; la solución es diferente según el tipo de caldera.

En la caldera Sulzer, el inconveniente se supera incluyendo un separador de humedad entre la zona de vaporización y el sobrecalentador, con lo que, el sistema tiene una neta distinción de dos circuitos y la posibilidad de aplicar una purga continua para la eliminación de las impurezas.

En las calderas Benson y UP, no existe la distinción de zonas, y la zona de vaporización, ocurre según la relación que exista en un momento dado, entre el calor suministrado a la caldera y la carga de agua que la atraviesa; no existiendo la posibilidad de purga continua, el agua de alimentación debe ser de muy alta calidad.

En las calderas de circulación forzada, el sostenimiento de una circulación eficaz a bajas cargas, es prácticamente irrealizable, por lo que, no es posible el funcionamiento abajo de cierta carga, que generalmente se fija por los fabricantes en alrededor del 33% de la capacidad nominal.

Cuando la carga en la turbina es menor del 33%, interviene el "circuito de arranque" para mantener el valor mínimo, descargando el vapor sin pasar por la turbina y recuperándolo en algún punto del ciclo térmico; - otra de las funciones del circuito de arranque, es la de permitir efectuar una circulación preliminar del agua de la caldera, durante la elevación de presión, hasta que se alcance el grado de pureza necesario en el agua de alimentación.

Las Ventajas de Esta Caldera Son:

- . Mejoramiento de eficiencia en el ciclo térmico, con las características de presión y temperatura elevadas del vapor.
- . La eliminación del domo de vapor

Las Desventajas de la Circulación Forzada, Son las Siguietes:

- . Necesidad de un complejo circuito de arranque, con alto costo de inversión inicial y alto costo de calorías perdidas, durante la operación a cargas inferiores al 33% de la nominal.
- . La notable pérdida o caída de presión, entre la entrada al economizador y la salida del sobrecalentador final, que requiere de la bomba de alimentación características muy especiales (alta disponibilidad, potencia y costo).

CALDERA DE CIRCULACION COMBINADA

La necesidad de obviar el inconveniente del circuito de arranque en las calderas de circulación forzada, llevó a desarrollar un diseño, que permita obtener presiones elevadas de operación, sin el requerimiento del 33% de carga mínima. Las calderas de circulación combinada, satisfacen -

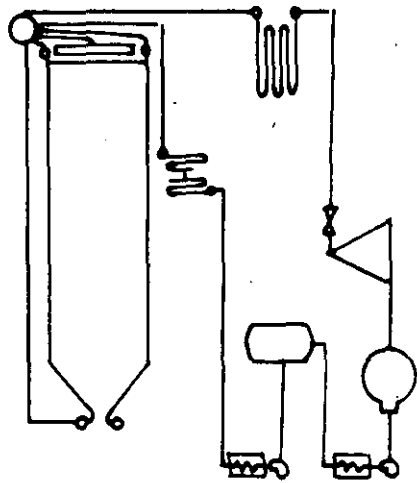
ese requisito, y es la función de dos sistemas de circulación: forzada y controlada.

La bomba de circulación de la caldera, similar a la descrita anteriormente, se instala entre el economizador y la sección de vaporización, y succiona de una esfera de mezcla de capacidad pequeña, que se conecta a través de una válvula de no retorno a la salida de los tubos vaporizadores. (Fig. XI-17).

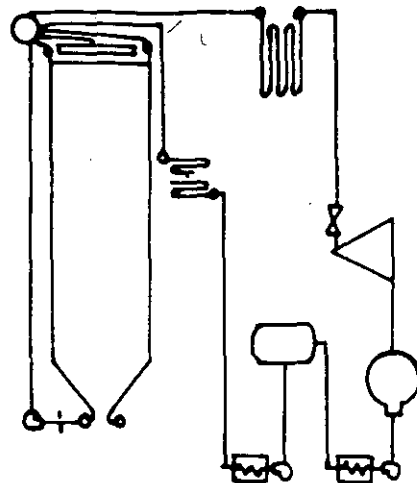
Cuando la carga requerida de la caldera, tiene un valor inferior al mínimo, una parte del fluido que sale de la sección vaporizadora, regresa a la esfera y se recircula con la bomba, asegurando el flujo suficiente en el vaporizador. Cuando la carga alcanza un valor entre 60 y 70% de la nominal, la válvula de no retorno se cierra y la bomba de C.C., funciona prácticamente en serie con la bomba de alimentación. Este sistema, requiere también un circuito de arranque, pero de más baja capacidad (alrededor del 10% de la carga nominal) y con mucho menor costo de instalación.

La diferencia fundamental entre la caldera de circulación combinada y la circulación forzada, consiste en el hecho de que, en la primera, el fluido a la entrada del sobrecalentador, puede alcanzar la temperatura requerida para el arranque, recirculándolo en la caldera, sin necesidad de expanderlo fuera de ella. Un arranque de este tipo, tiene el grave inconveniente, de que las impurezas presentes en la caldera, recirculadas continuamente, terminan en la turbina.

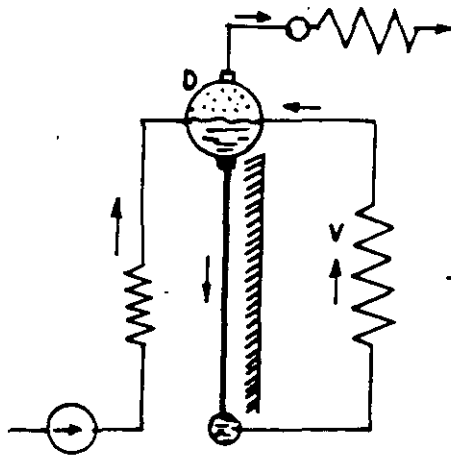
Para evitar el problema anterior, y para permitir el re-arranque en caliente de la turbina, también en las calderas de circulación combinada se dispone de un circuito de "by pass" del sobrecalentador, pero más sencillo y dimensionado para un 10% de la capacidad nominal.



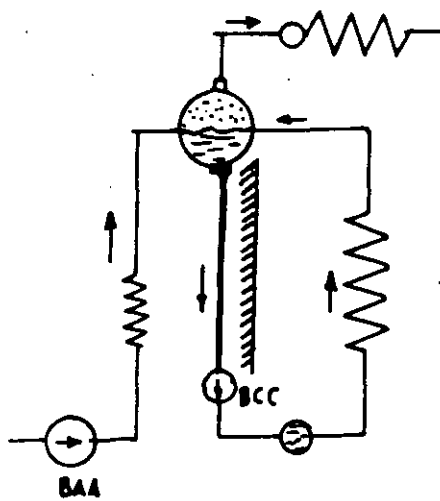
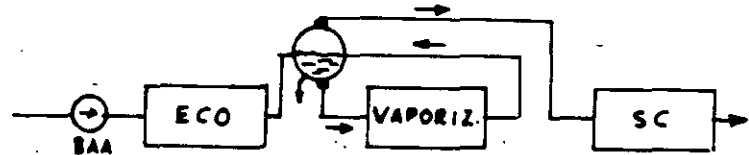
Circulación natural



Circulación controlada



Circulación natural



Circulación controlada

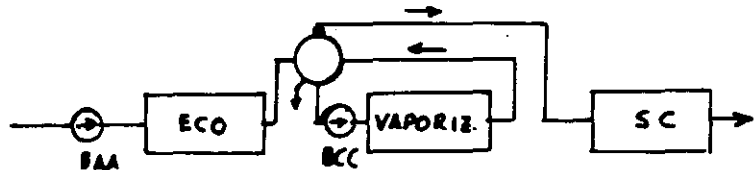


FIG. XI-14.- ESQUEMAS DE SISTEMAS DE CIRCULACION DE AGUA

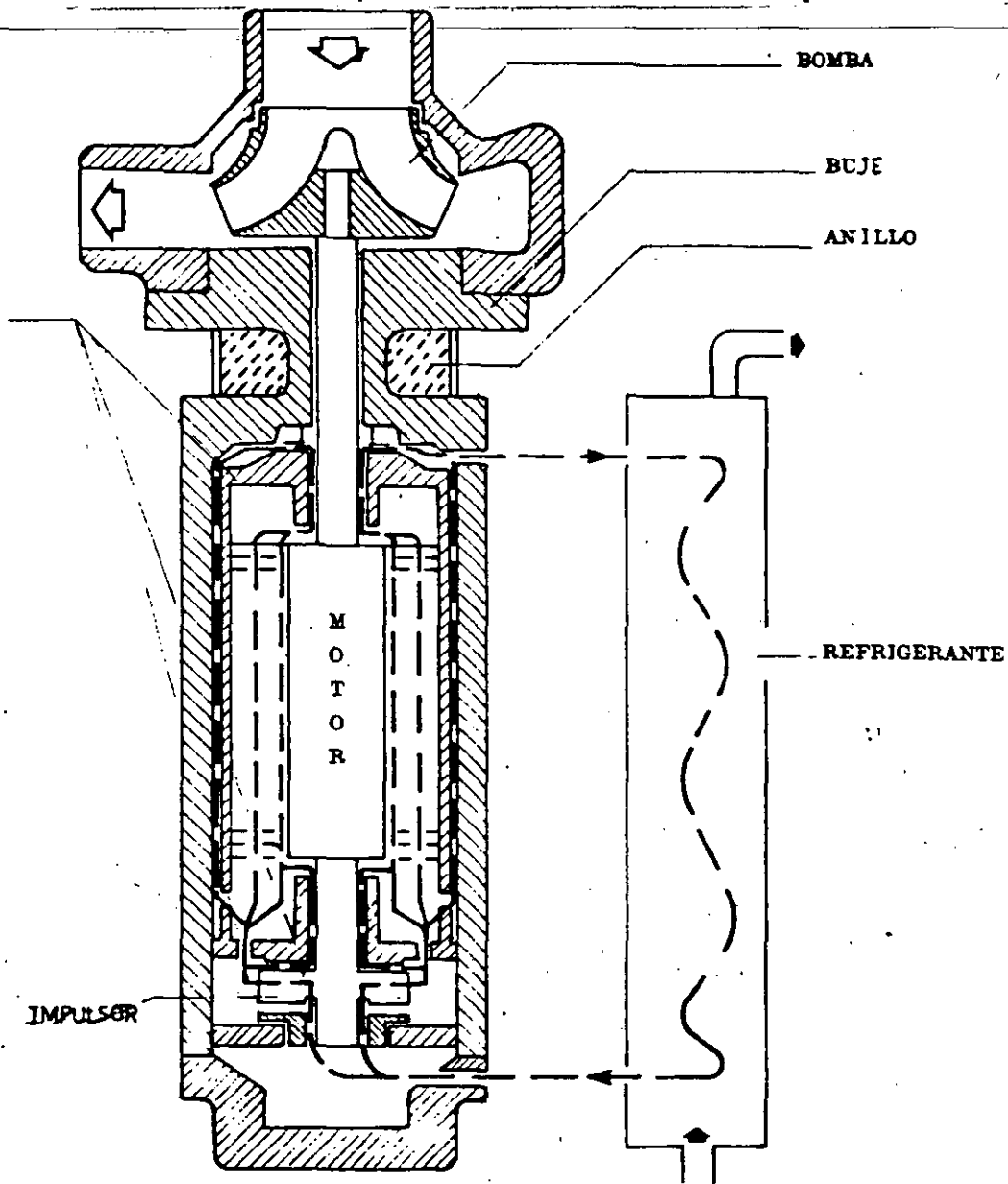


FIG. XI-15.- SECCION DE UNA BOMBA DE CIRCULACION DE CALDERA

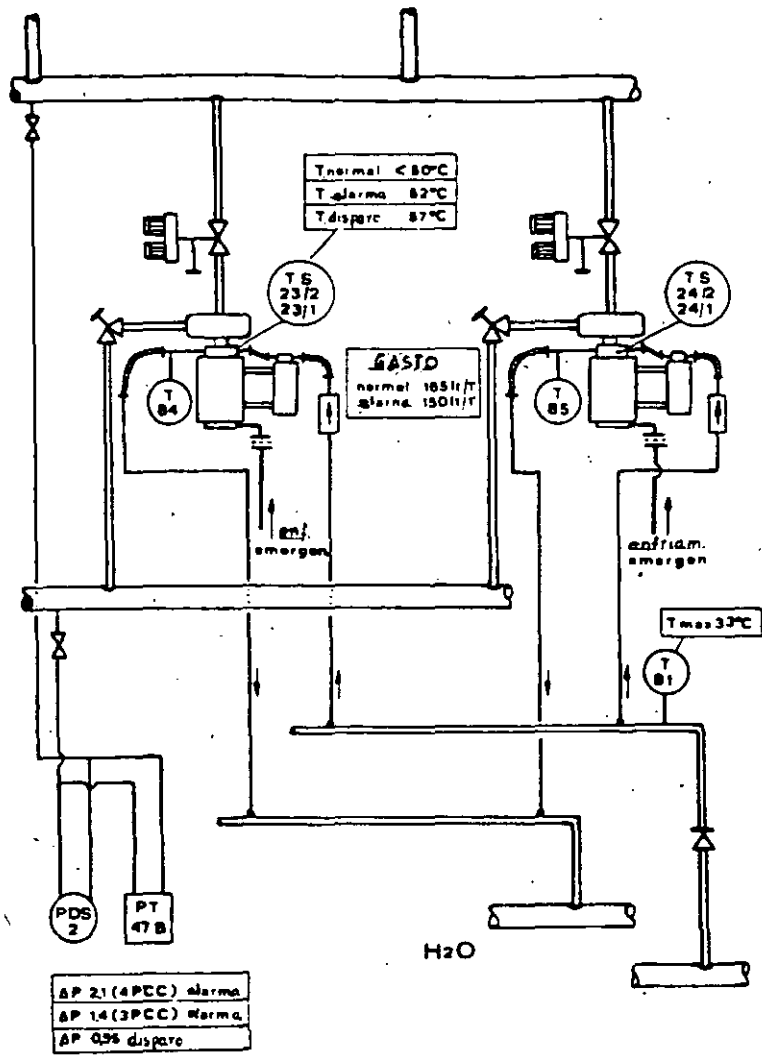


FIG. XI-16.- CIRCUITOS DE BOMBAS DE CIRCULACION DE CALDERA

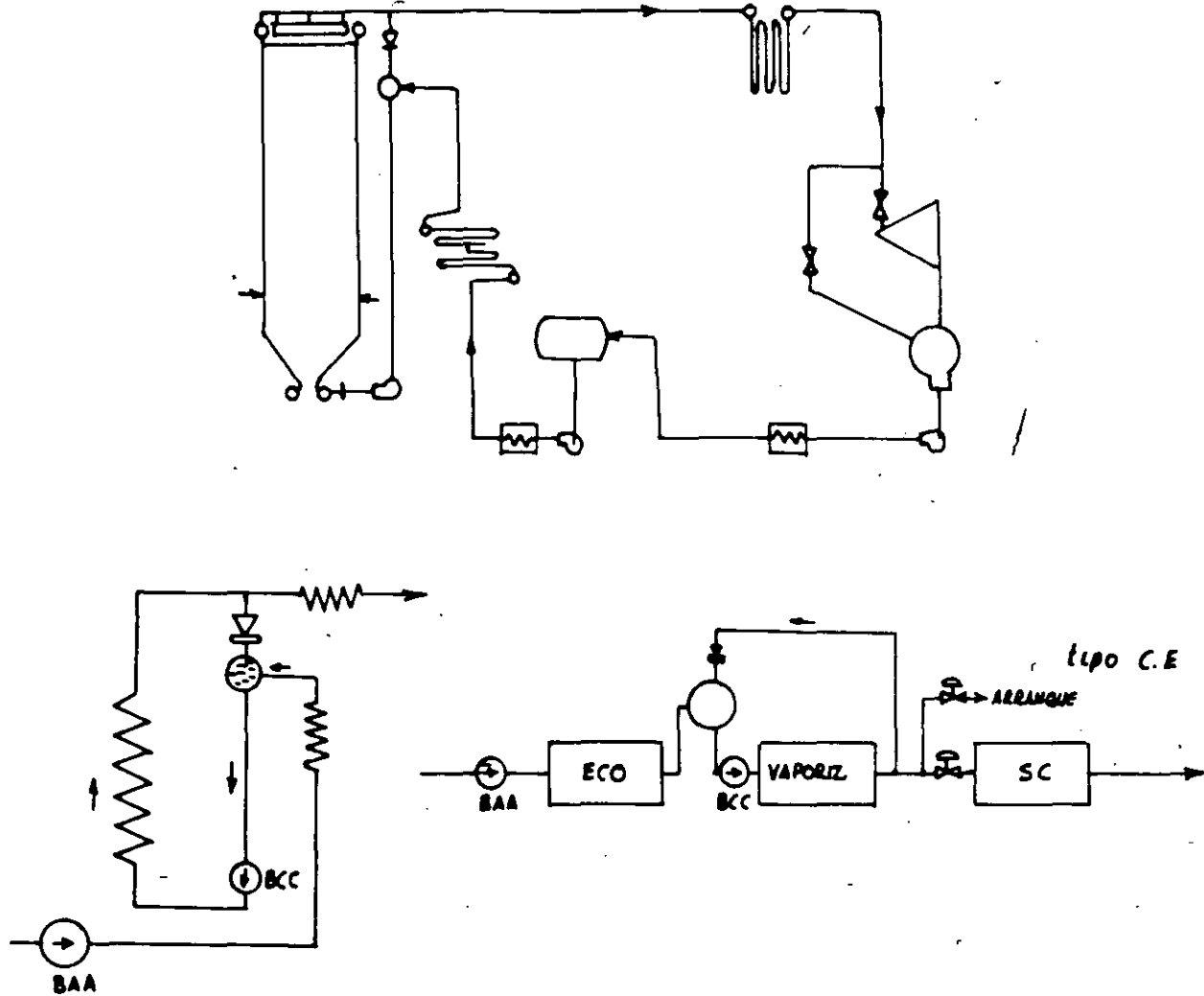


FIG. XI-17.- ESQUEMA DE CALDERA DE CIRCULACION CONTROLADA

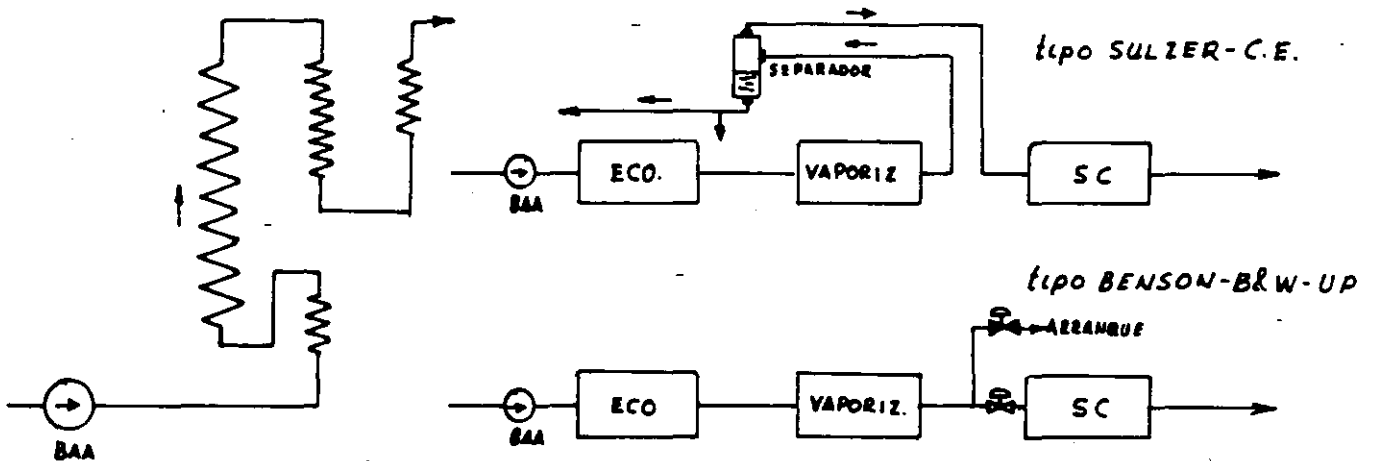
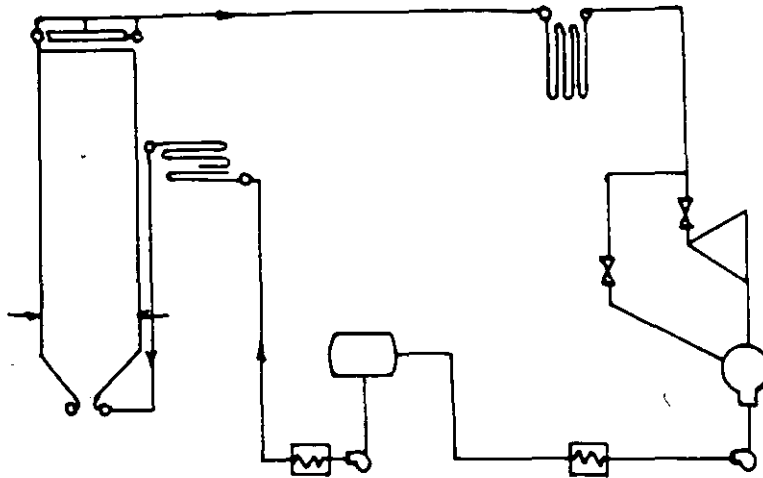


FIG. XI-18.- ESQUEMA DE CALDERA DE UN PASO (ONCE TROUGH) O CIRCULACION FORZADA.

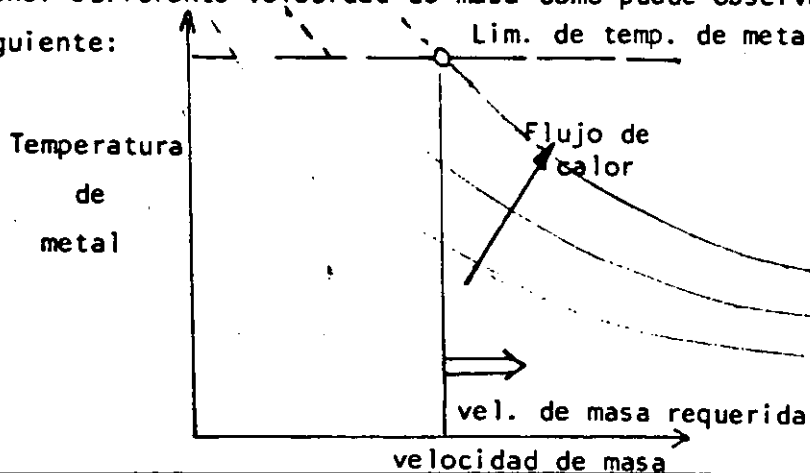
3.- CRITERIOS DE CALCULO DE LA CIRCULACION (DE AGUA) EN LA CALDERA

El hogar consiste en paredes de tubos enfriados con agua que forman la cámara de combustión de sección rectangular; los principales objetivos del hogar son:

- . Proveer suficiente volúmen para la combustión estable del combustible.
- . Absorber calor de los productos de combustión
- . Evaporar el agua suministrada al hogar

El calor se transfiere a las paredes del hogar por radiación directa - que es un medio efectivo de transferencia de calor. Por otra parte, - los tubos de las paredes del hogar son recipientes a presión calentados en los cuales fluye agua y/o vapor a alta presión, por lo tanto, - es necesario obtener un flujo de fluido suficiente en los tubos de las paredes del hogar para bajar la temperatura del metal de los tubos a un límite permisible.

La temperatura del metal de los tubos de las paredes se determina por el régimen de absorción de calor, la velocidad del agua y/o vapor (expresada como "velocidad de masa"), etc.; con objeto de mantener la temperatura del metal de los tubos dentro de los límites permisibles, se debe mantener suficiente velocidad de masa como puede observarse en la figura siguiente:



La velocidad de masa, se calcula como sigue:

$$G = \frac{W}{n A_i} = \frac{W}{n \left(\frac{\pi}{4} d_i \right)^2}$$

En donde:

G = velocidad de masa dentro de los tubos de las paredes del hogar, en $\text{kg/m}^2\text{s}$

W = Flujo del fluido total en el hogar, en kg/s

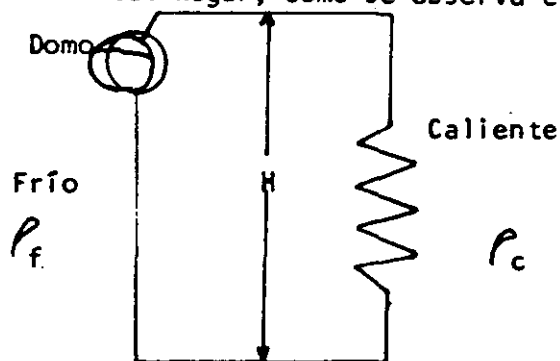
n = Número de tubos de las paredes del hogar

A_i = Área interior de tubo, en m^2

d_i = Diámetro interior del tubo, en m.

De acuerdo con la ecuación anterior, una velocidad de masa más alta puede obtenerse con mayor flujo total, menor número de tubos y diámetro interior del tubo más pequeño.

Como se ha mencionado anteriormente, en las calderas de circulación natural, la fuerza impulsora de la circulación se establece por la diferencia de densidad entre los tubos de bajada fríos y los tubos calentados de las paredes del hogar, como se observa en la figura siguiente.



La fuerza de circulación F_c , es

$$F_c = (\rho_f - \rho_c) H$$

ρ_f = Gravedad específica del fluido frío

ρ_c = Gravedad específica del fluido caliente

H = Altura

Por otra parte cuando un fluido fluye por el interior de un tubo, se produce una caída de presión Δp , que tiene el siguiente valor.

$$\Delta p = \xi \frac{\gamma}{2g} w^2$$

En donde:

ξ = Coeficiente de fricción

γ = Gravedad específica del fluido

g = Aceleración de la gravedad

w = Velocidad del fluido

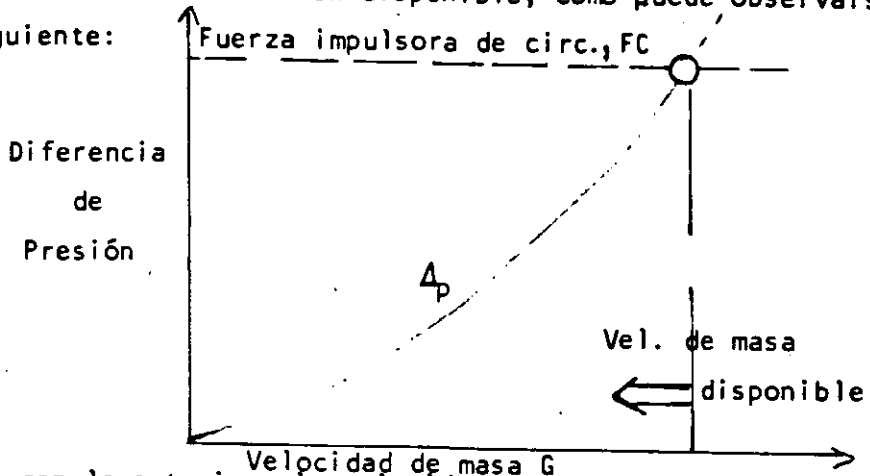
Las pérdidas de presión por fricción en el hogar serán:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \sum_i \xi_i \frac{\gamma_i}{2g} w_i^2 \\ &= \sum_i \xi_i \frac{\gamma_i}{2g} \left(\frac{G_i}{\gamma_i} \right)^2 \end{aligned}$$

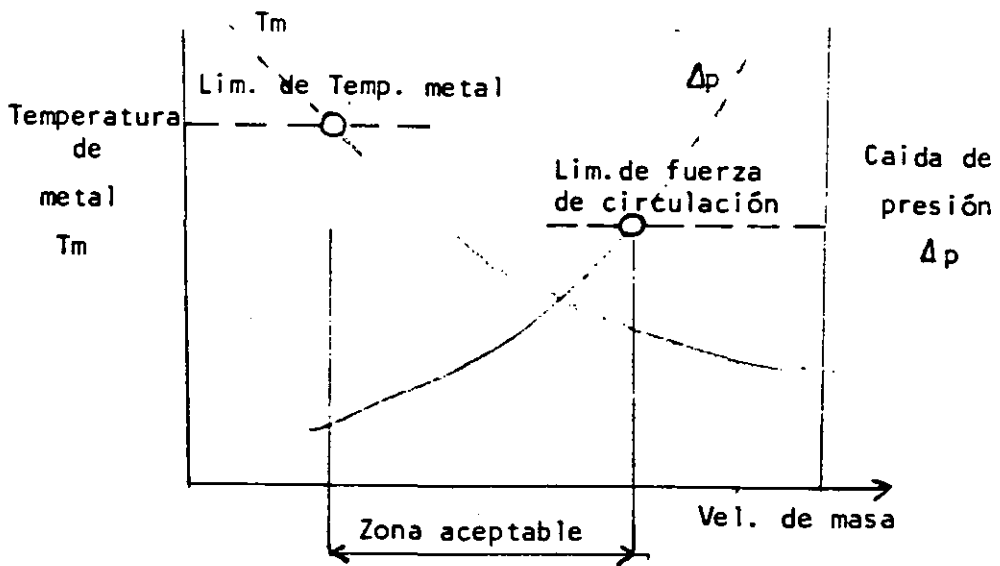
$$\sum_i \xi_i \frac{G_i^2}{2 \rho \gamma_i}$$

$$\sum_i \xi_i \frac{1}{2 \rho \gamma_i} \left[\frac{W}{n \left(\frac{n}{4} d_i \right)^2} \right]^2$$

Las pérdidas por fricción en el interior de los tubos, se incrementan con forme aumenta la masa de velocidad, por lo que, con objeto de obtener una circulación estable, las pérdidas por fricción deben ser igual a la fuerza impulsora de circulación disponible, como puede observarse en la figura siguiente:

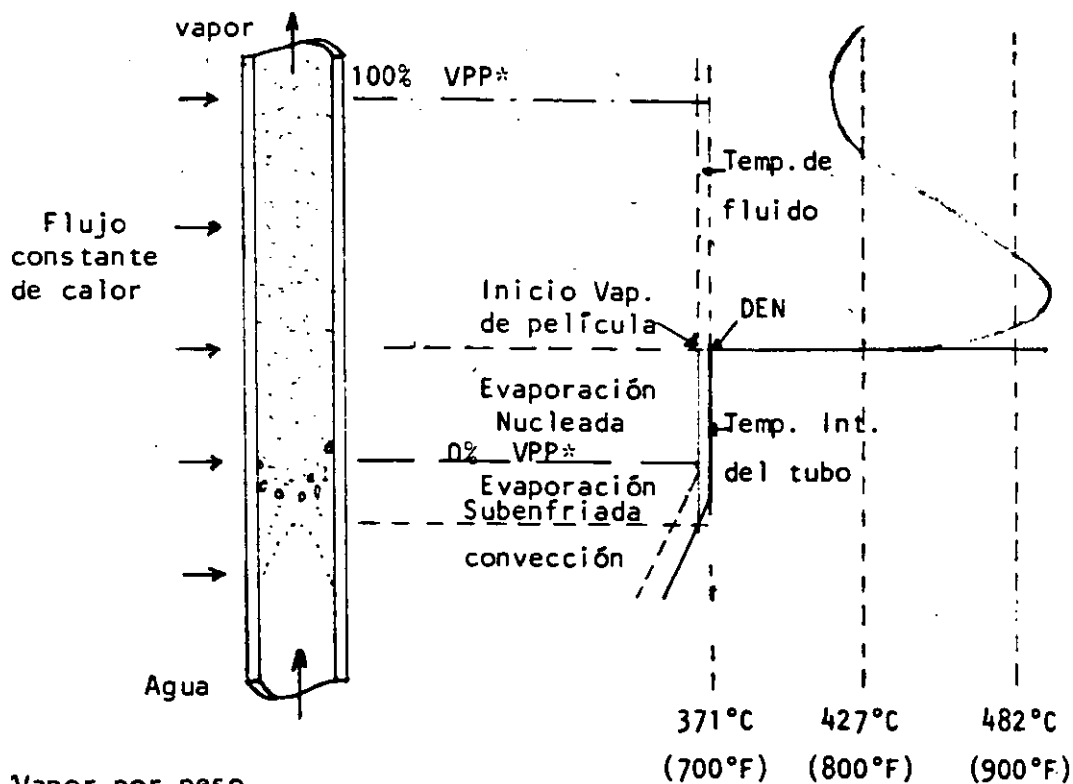


De acuerdo con lo anterior, la velocidad de masa debe ser menor que un cierto valor en la caldera de circulación natural; existe una velocidad de masa óptima para una caldera específica con un número y diámetro de tubos, configuración, etc., que debe ser seleccionada después de cálculos detallados y complejos, como puede apreciarse en la siguiente figura esquemática.



En un generador de vapor, el proceso de combustión radia calor en forma no-uniforme a las paredes de los tubos del hogar, por lo que algunas áreas reciben más calor que otras creando regiones que tienen puntos desviados del patrón de flujos de calor. Condiciones temporales variables de operación debidas a rápidos cambios de carga crean variaciones en la transferencia de calor y en los requerimientos de circulación de agua.

En las calderas de circulación natural, si la variación de los puntos de flujo de calor excede la habilidad del agua en los tubos del hogar de absorber calor, entonces aparece una condición que causa el despegue de la Ebullición Nucleada (DEN); bajo esta condición se forma una película de vapor contra la pared del tubo que evita que el agua alcance la superficie del tubo y lo enfríe, incrementando pronunciadamente la temperatura del metal del tubo que provocará que eventualmente falle el tubo, según la figura siguiente.



VARIACION DE TEMPERATURAS EN TUBOS LISOS

El DEN es una función compleja de la presión, la unidad del vapor y la de velocidad de masa.

Para resolver el problema anterior, existen dos tecnologías utilizadas por los principales fabricantes de calderas:

- . Utilización de bombas de circulación en la caldera para incrementar la relación de circulación y lograr el enfriamiento de los tubos.
- . Empleo de tubos estriados helicoidalmente en la pared interior para generar un flujo centrífugo en el interior del tubo; ésta acción - centrífuga fuerza al agua contra la superficie del tubo para evitar la formación de la película de vapor y el DEN resultante.

Estos tubos estriados, mantienen la ebullición nucleada a calidades de vapor más altas y a menores velocidades de masa que los tubos lisos.



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

INSTRUMENTACION CONTROL O REGULACION Y PROTECCION

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

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	Relevar 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 ₂ (opcional) TV Chimenea (opcional) Detector de humos	Alarma Alarma
Pérdida sum. energía control combustión.	Gas, aceite o carbón.	Relee 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 del 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 sí 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, amperaje).
- . 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 switches límite, switches 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 pulverizador
- . 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).

I.- 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

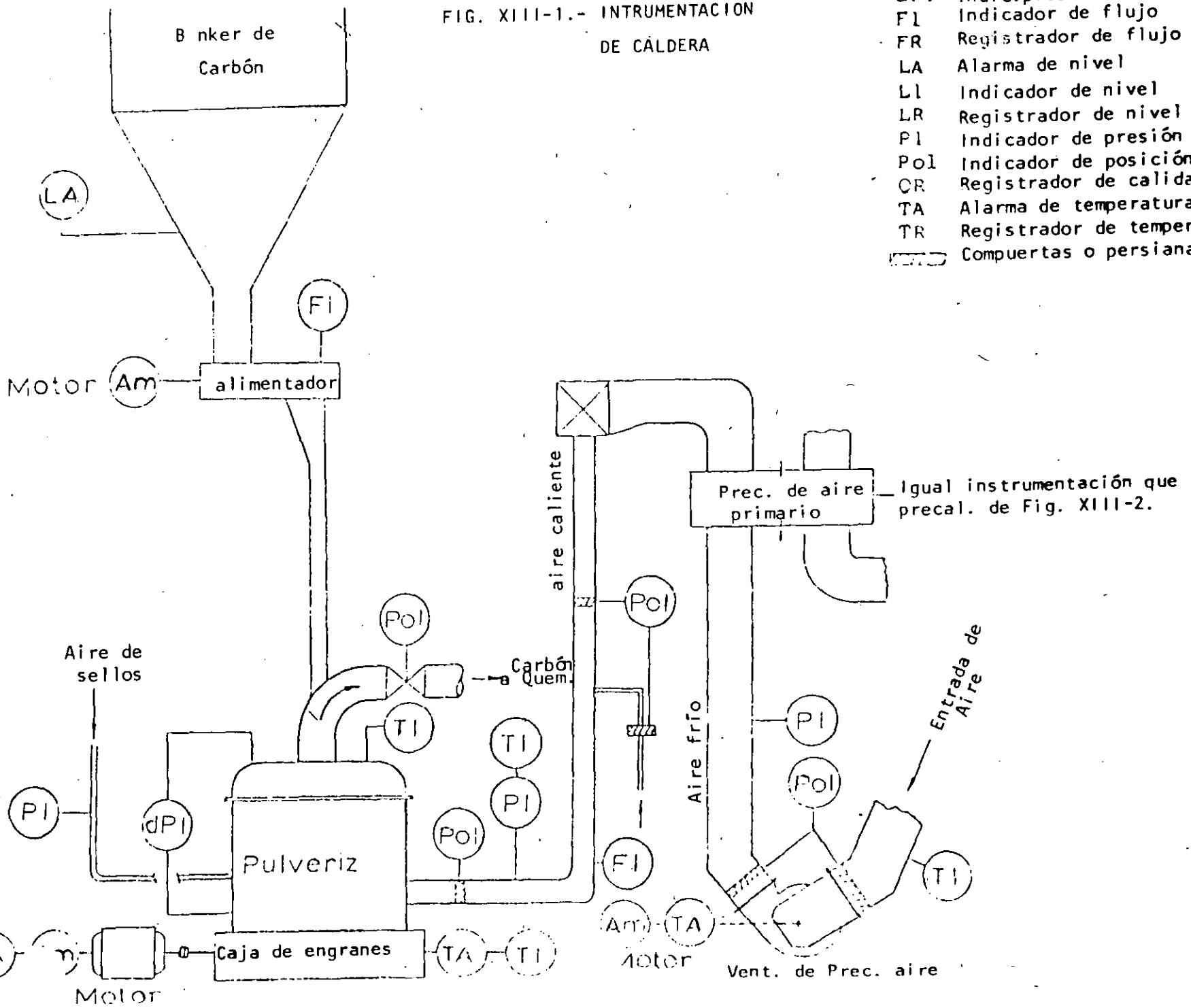
- . Registrador de la calidad de la densidad del humo
- . Registrador de la calidad de la densidad del polvo

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:

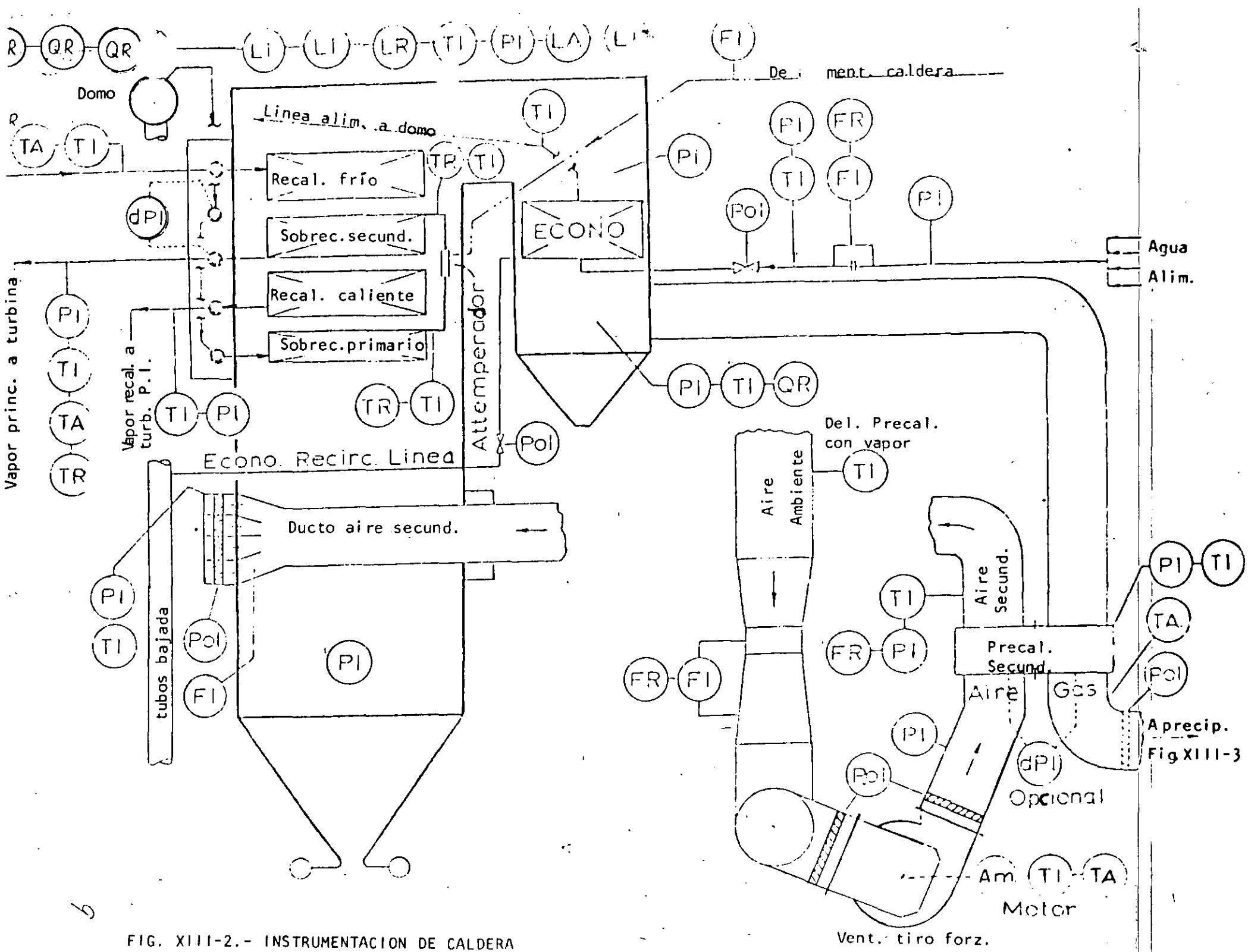
	SALA CONTROL	LOCAL
Temperatura	150	70
Presión	12	12
Tiro	40	6
Flujo	12	6
Nivel	2	6
Velocidad	14	-
Control de Quemadores	24 a 40	24 a 40
Ampermetros y Voltmetros	60	4
Posición de Compuertas y Válvulas	80	-
	SALA CONTROL	LOCAL
Analizadores	5	-
TV	3	-
Estaciones de control autom.	hasta 60	-
	542	128 a 140

FIG. XIII-1.- INSTRUMENTACION DE CALDERA

- Am Ampermetro
- dP) 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
- PoI Indicador de posición
- CR Registrador de calidad
- TA Alarma de temperatura
- TR Registrador de temperatura
-  Compuertas o persianas



Igual instrumentación que precal. de Fig. XIII-2.



Aprecip. Fig XIII-3

FIG. XIII-2.- INSTRUMENTACION DE CALDERA

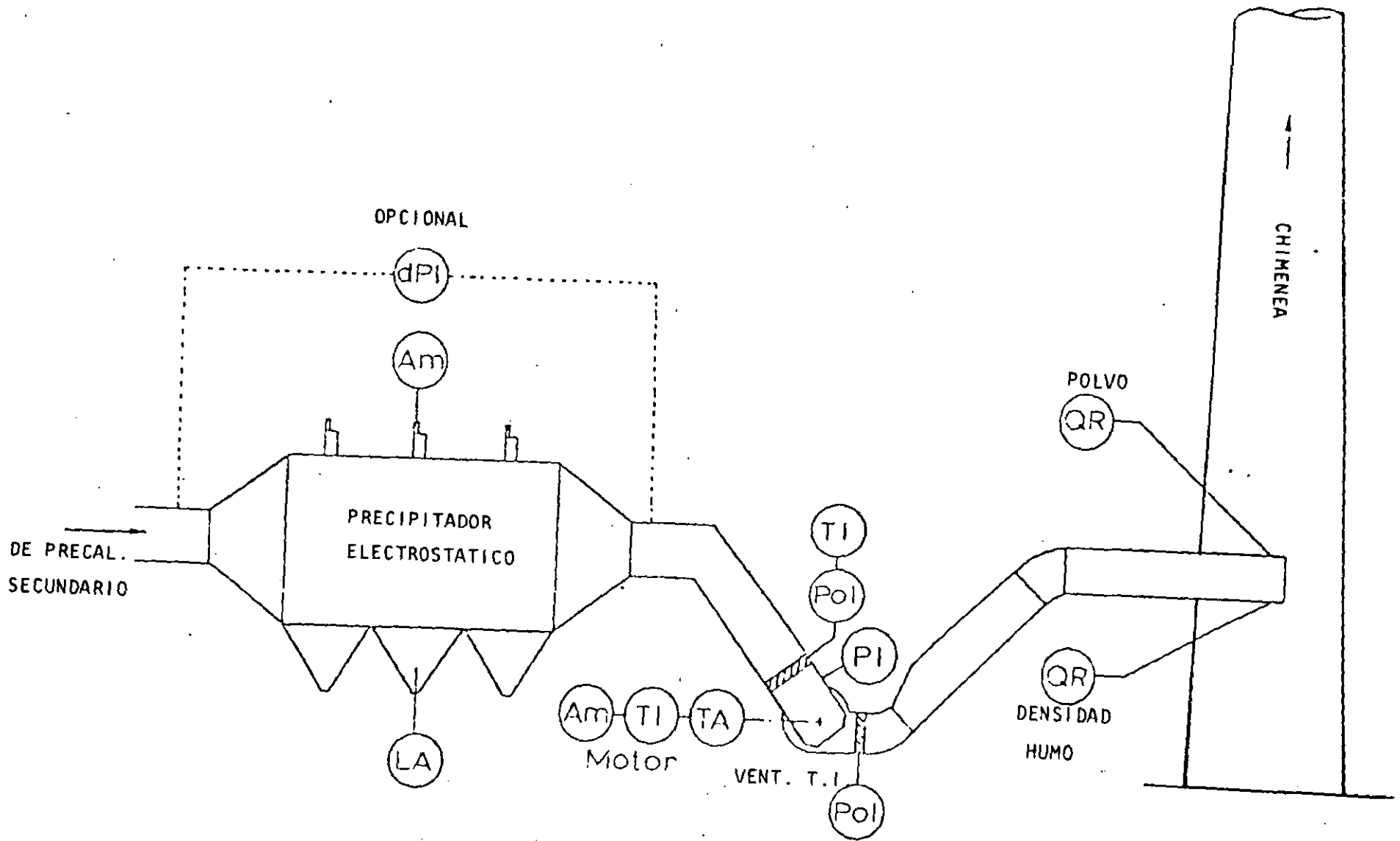


FIG. XIII-3.- INSTRUMENTACION CALDERA

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 estas 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-1, 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)

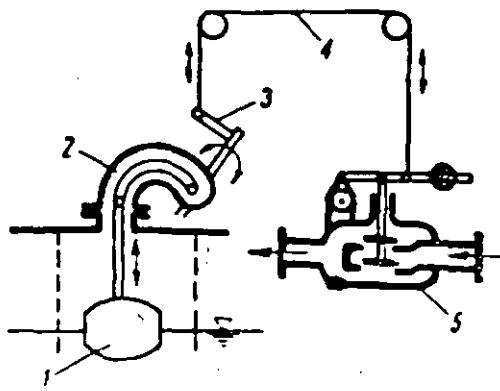


FIG. XIII-4.- CONTROL DE NIVEL SIMPLE

agua caldera
vapor
agua alim.

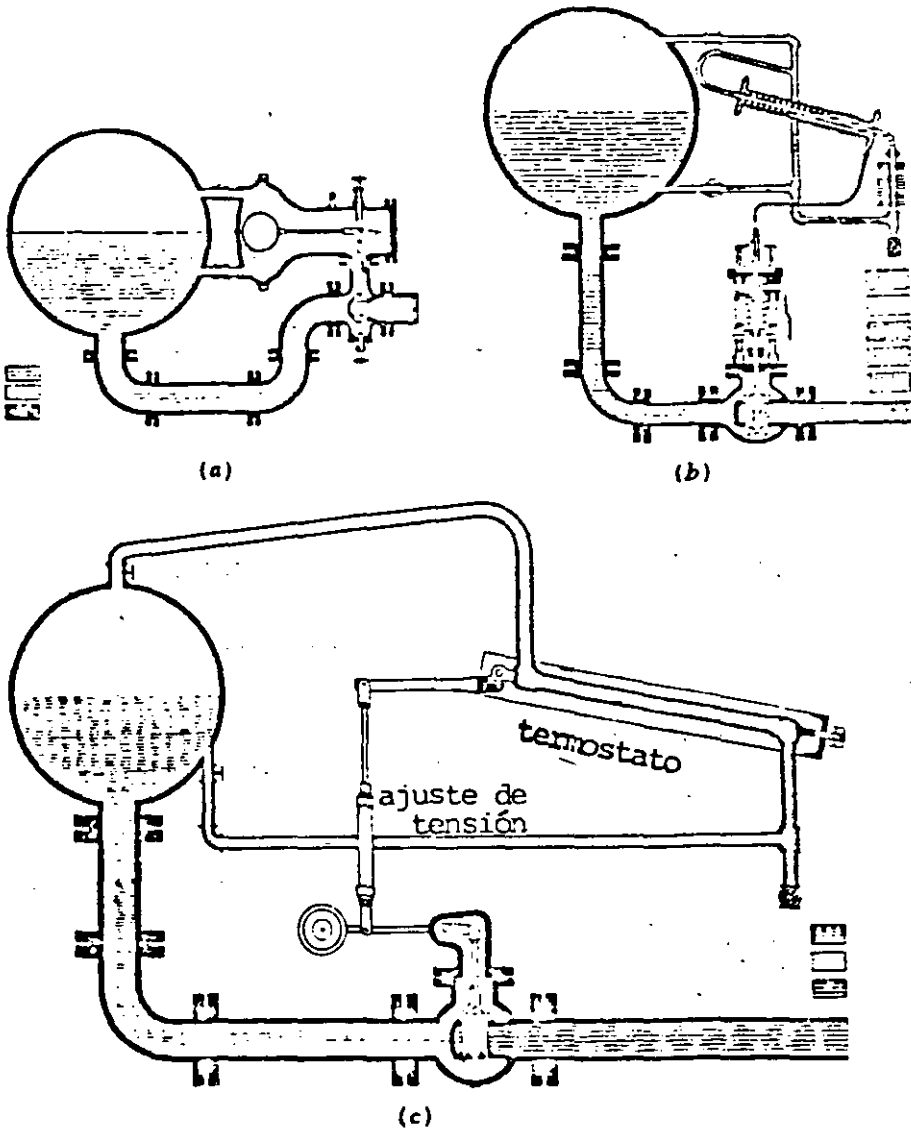


FIG. XIII-5_ TIPOS DE CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACION DE UN ELEMENTO

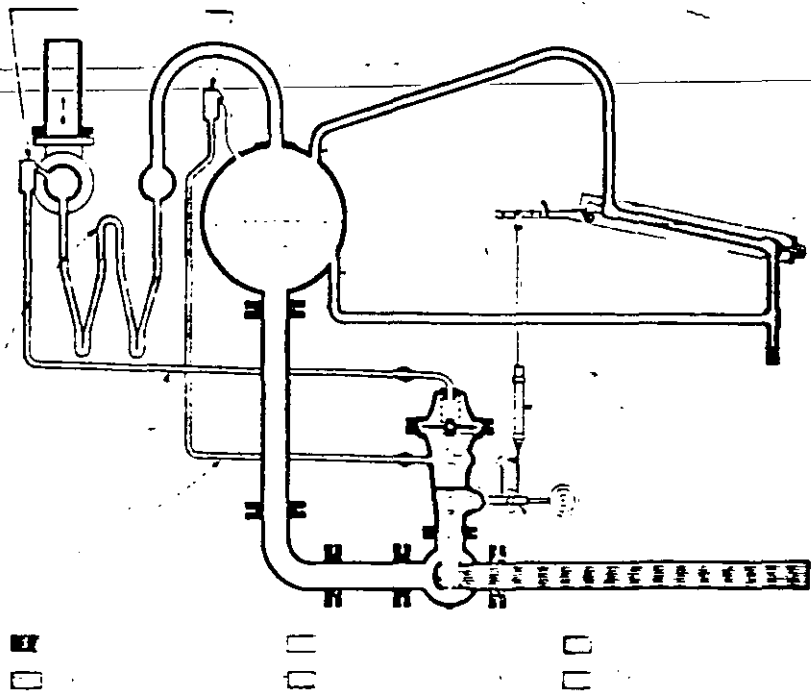
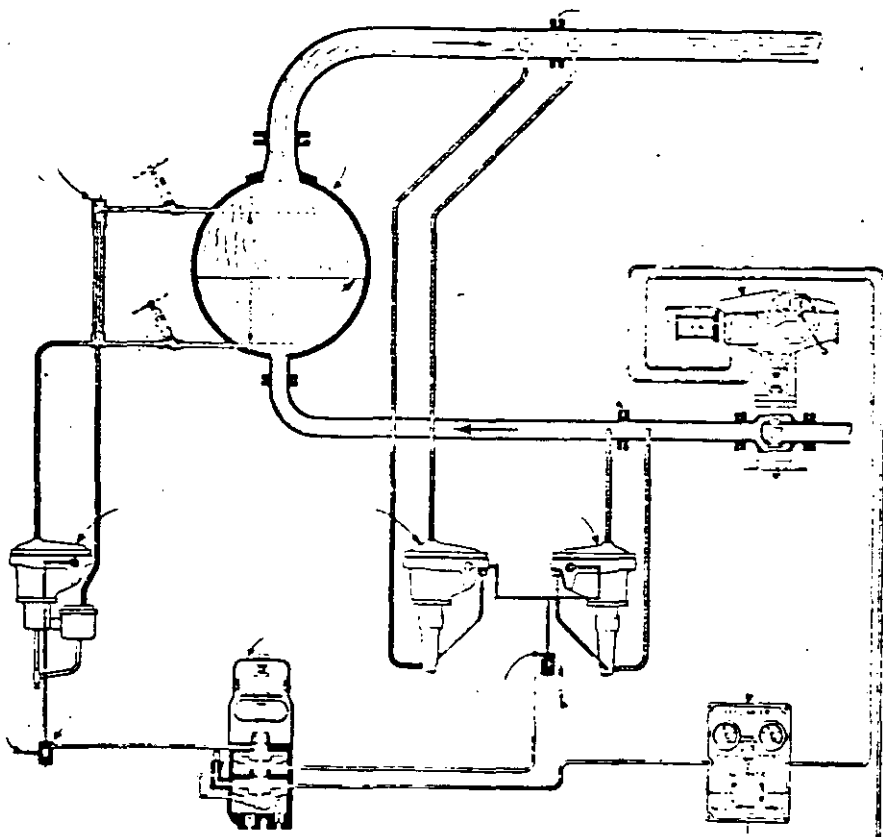


FIG. XIII-6.- CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACION DE DOS ELEMENTOS



REGULACION DE COMBUSTION

La regulación de combustión comprende la regulación de alimentación de combustible, alimentación de aire y la evacuación de gases de combustión (en calderas de tiro balanceado) para mantener una depresión normal en el hogar; estas tres medidas regulables se correlacionan entre ellas y en forma conjunta determinan la carga de funcionamiento de la caldera. La regulación de estas 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; este 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 este 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 dará 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 a 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 más bien O_2); este parámetro puede dar el comando suplementario al bloque de aire para realizar la proporcionalidad aire - combustible.

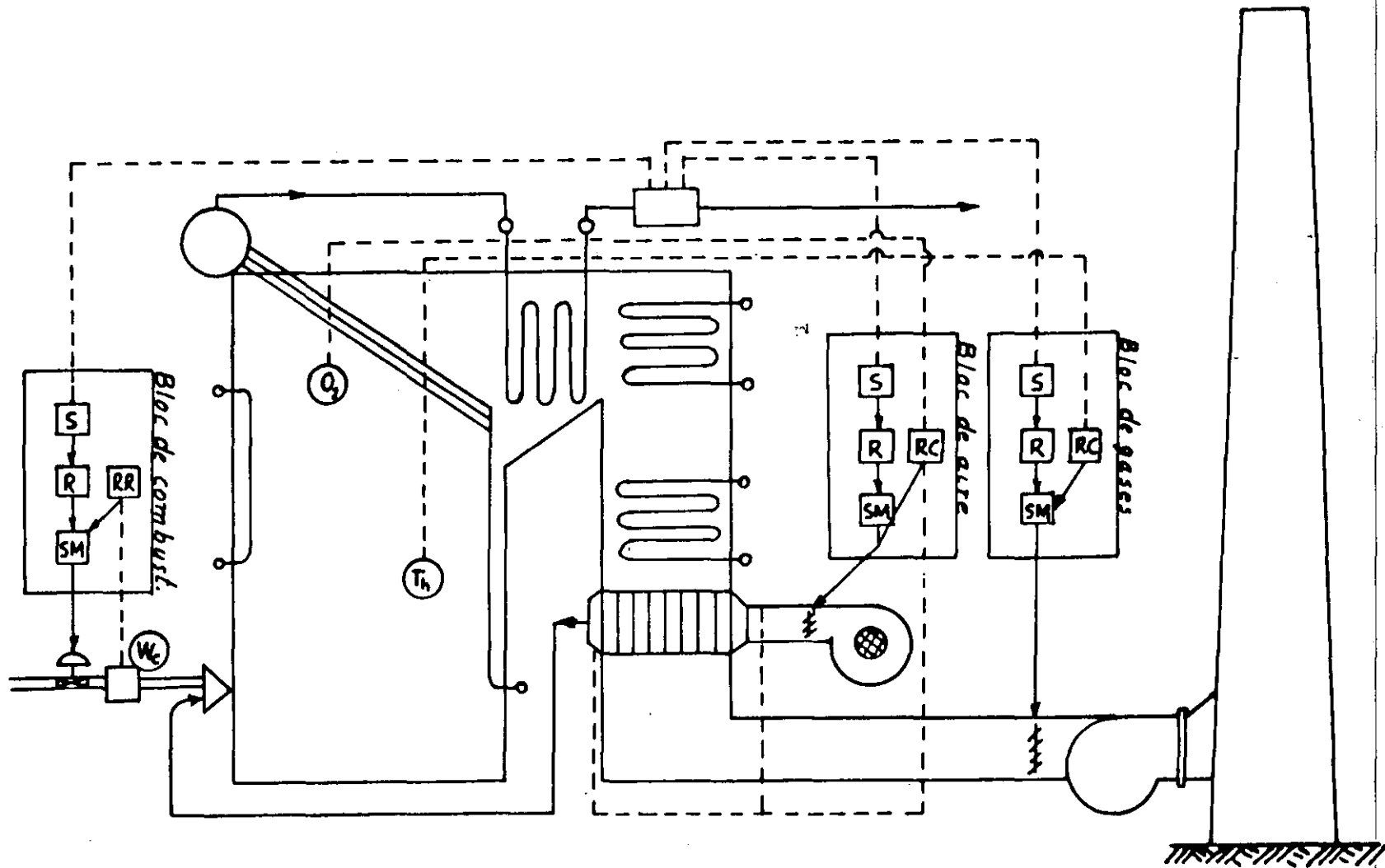


FIG. XIII-8.- ESQUEMA DE AUTOMATIZACION DE COMBUSTION DE UNA CALDERA

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; esta 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 esta 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

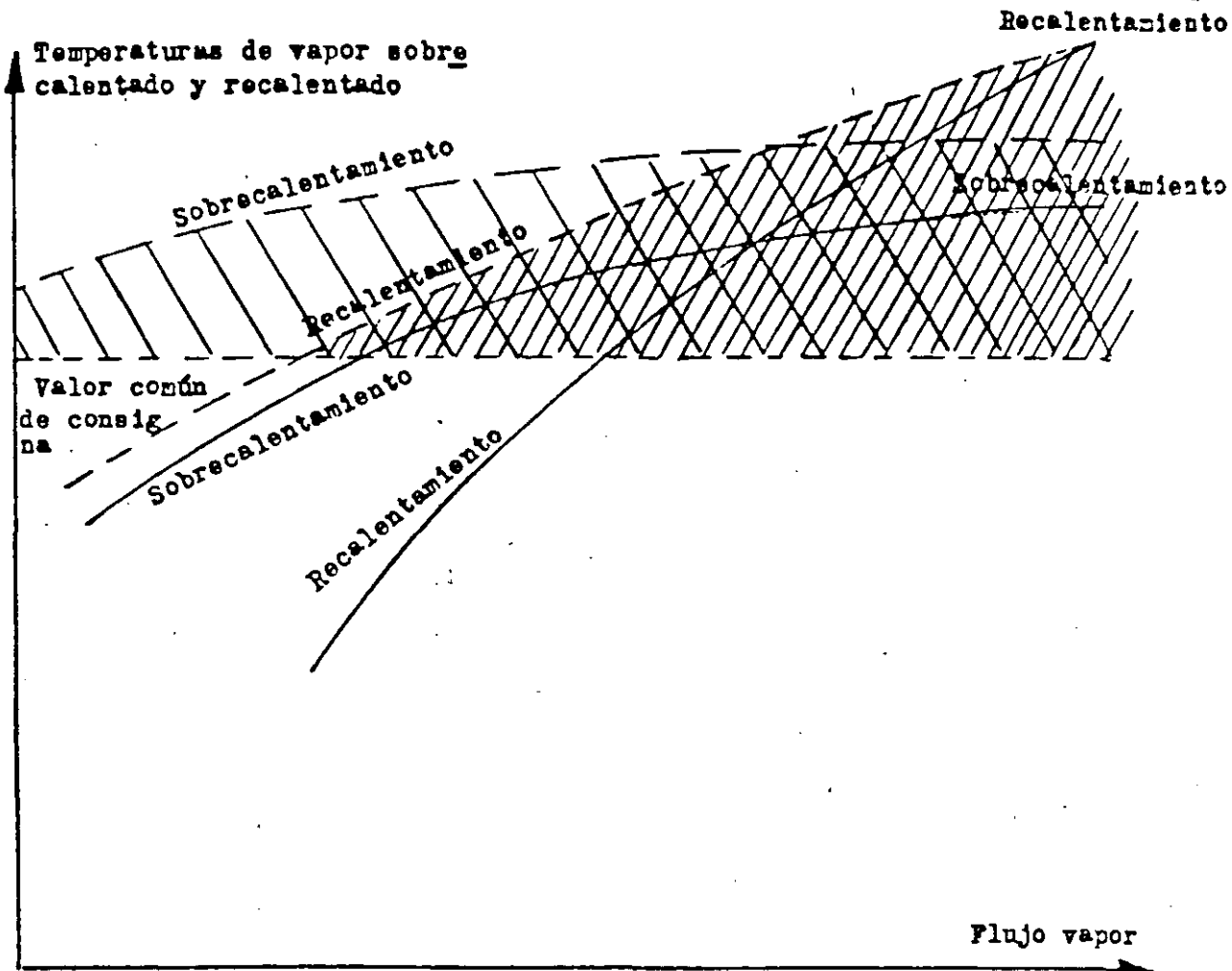
Hay muchos criterios para integrar un sistema de protección, con excepción de los casos de plantas paquetes en los que un diseño se aplica a varias unidades idénticas, cada caldera es un problema particular; debido a esto y a las limitaciones impuestas para el presente trabajo, no se discutirán dichos 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.- CARACTERISTICAS DE LAS TEMPERATURAS DE VAPOR

OTROS FACTORES A CONSIDERAR.- Es obvio que aún cuando se planee e integre correctamente un sistema de protección, no es aconsejable confiar completamente la seguridad de una caldera a los dispositivos que lo integran; parte de esa seguridad está condicionada a los siguientes factores, necesarios en una planta:

UN MEDIO AMBIENTE ADECUADO QUE PERMITA TOMAR DECISIONES Y ACCIONES CORRECTIVAS.- 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 factores inherentes en la configuración del diseño de la planta. Falta de coordinación funcional de los varios componentes del sistema generador de vapor y sus auxiliares, etc.

UN ALTO NIVEL DE COMPETENCIA TECNICA Y DE OPERACION EN EL PERSONAL Y ORGANIZACION DE LA PLANTA.- Con la creciente complejidad de las unidades generadoras 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 competencia técnica en la operación de la planta.

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

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

ASEGURAR LA CONTINUIDAD DE OPERACION DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE.- Puesto que las interrupciones en la alimentación de combustible, 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 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, capacidad 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**

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

CONTROL DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTION Y CALDERA

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

EFICIENCIA DE LA COMBUSTION

En un hogar para quemar combustible atomizado o pulverizado, el combustible se introduce a través de quemadores adecuados en forma finamente subdividida y se combina de inmediato con el oxígeno en el aire para producir calor durante el período de tránsito desde el quemador hasta la salida del hogar.

Para la combustión completa se requiere suficiente oxígeno para quemar todo el carbono y azufre, y además convertir el hidrógeno a agua y el monóxido de carbón a la forma de dióxido, es decir asegurar que todo el calor disponible se extrae del carbono, azufre e hidrógeno. La cantidad teórica de oxígeno puede calcularse del peso molecular de los constituyentes del combustible, lo cual representa la condición estequiométrica de combustión en ese combustible.

En la práctica se ha encontrado que no se obtiene una mezcla íntima de las partículas de combustible, por lo que no es suficiente con proporcionar sólo la cantidad teórica de oxígeno; algo de carbono no se quemará y ocasionará pérdidas debido a carbono en las cenizas y algo se puede quemar sólo monóxido de carbono y no a dióxido de carbono, teniéndose una pérdida por combustión incompleta. Como 1 kg de monóxido de carbono genera cerca de 5,700 kcal cuando se quema a dióxido de carbono, un pequeño porcentaje de monóxido de carbono en los gases de escape puede causar una pérdida considerable de eficiencia; con objeto de evitar estas pérdidas, es necesario introducir en el hogar más oxígeno y por lo tanto más aire del que teóricamente es requerido, refiriéndolo como exceso de aire. Esto debe ser hecho sólo en la cantidad necesaria para asegurarse que todo el carbono se queme y no haya monóxido de carbono en los gases de escape; si se proporcionara demasiado aire, este tomará calor del hogar, lo cual representa una pérdida de eficiencia.

Los argumentos anteriores se muestran en la Fig. , en la -

cual puede verse que hay una posición práctica que da las mínimas pérdidas de calor, conocida como punto de óptima eficiencia de combustión para una caldera; esta es la interrelación aire-combustible y aire-vapor que forman un aspecto importante del control de combustión. El punto óptimo en el diagrama es de aproximadamente 14.5% de óxido de carbono.

Hay muchos otros factores involucrados en el proceso de combustión como se muestra en la Fig. , para el control del suministro de aire y que de una relación correcta de aire-combustible, la planta de caldera debe mantenerse en una condición satisfactoria y minimizada la potencia de auxiliares. El tamaño de las partículas de combustible debe ser tal que intensifique el contacto con el oxígeno, porque el tamaño de dichas partículas es el área disponible para el contacto y quemarse; a pesar del grado en que esto pueda ser hecho, su realización está gobernada no sólo por consideraciones prácticas sino también por la cantidad óptima de potencia de auxiliares requerida para moler el carbón en caldera de combustible pulverizado o bien para calentamiento y bombeo en las calderas que queman aceite-combustible. Si se suministra demasiado aire para asegurar la combustión completa, no sólo hay una pérdida en el calentamiento del exceso de aire sino un considerable incremento en la potencia de auxiliares.

Exceso de Aire

La provisión de la correcta cantidad de exceso de aire es un factor predominante en el ajuste de los controladores automáticos para la eficiencia óptima de combustión.

Para determinar la cantidad de exceso de aire requerida se deben llevar a cabo pruebas cuidadosas en la planta de la caldera y estas pueden estar representadas por el % de dióxido de carbono en los gases, el cual es la base para los factores relacionados involucrados (Fig.). El % de dióxido de carbono cambia (para la misma cantidad del exceso de aire) si el % de carbono e hidrógeno en el combustible cambia durante las pruebas, mien-

tras que el contenido de oxígeno sólo depende del suministro de aire, por lo que los equipos modernos de control incluyen la medición del oxígeno en los gases, lo cual puede ser hecho con mayor sensibilidad que con los instrumentos para el dióxido de carbono.

Para aceite combustible, con la cantidad estequiométrica de aire la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) en los gases de combustión es de 15.5% y 0% de oxígeno, para 12% de CO_2 el exceso de aire es de 30% y la cantidad de oxígeno (O_2) es de 5%, por lo que el % de proporción de cambio es mayor en el caso de oxígeno y esta es la razón por la que se usa en el ajuste de la señal en el control automático de combustión.

En la tabla se muestra para diferentes combustibles que por cada kg de aire teóricamente requerido se liberan aproximadamente 730 kcal (varía ligeramente con el PC del combustible), pero existe una relación estrecha entre el aire suministrado y el calor liberado. Por esta razón también existe una relación estrecha entre el flujo de vapor y el flujo del aire.

Otros factores que deben considerarse en un sistema de control automático de combustión, son los siguientes:

- . Requerimientos de fuegos debidos a cambios de carga
- . Control de flujo de vapor-flujo de aire
- . Control de flujo de combustible-flujo de aire

A continuación se incluyen varias gráficas para la determinación de la eficiencia de combustión y de las pérdidas, además de otros comentarios.

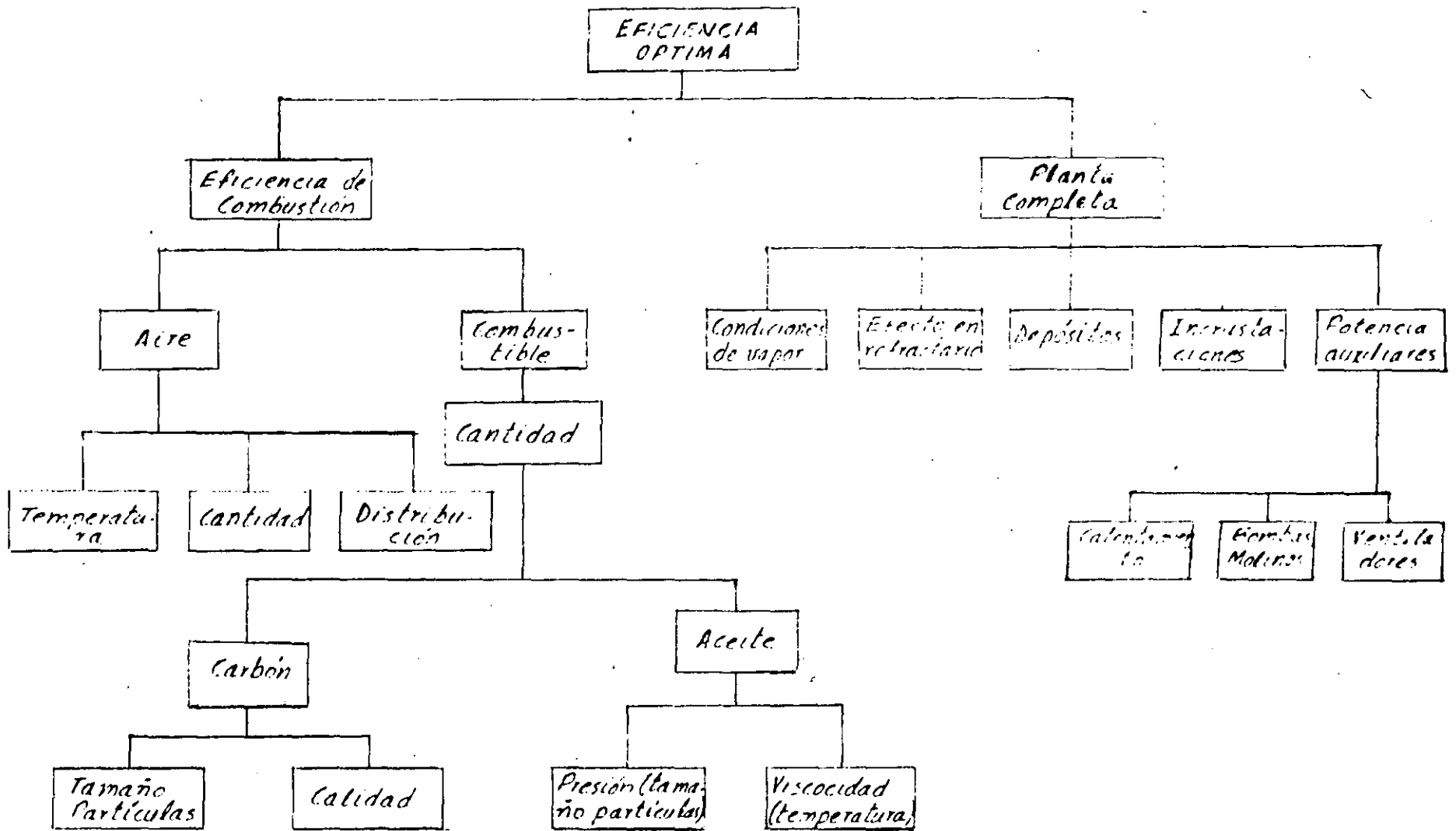


FIG PRINCIPALES FACTORES QUE INFLUYEN LA COMBUSTION

Mala calidad

Instrucciones de Utilización

El gráfico se refiere a un aceite combustible de un poder calorífico inferior de 9.600 kcal/kg.

Datos de partida para el uso del diagrama:

- % de CO_2 en los humos
- Temperatura de los humos en el escape

Con el conocimiento de estos datos se pueden determinar las siguientes magnitudes desconocidas.

- Exceso de aire
- Aire de combustión
- % de oxígeno en los humos
- Contenido térmico de los gases de combustión
- Temperatura de combustión
- Contenido térmico de los gases en el escape
- % de calor utilizable

Con objeto de aclarar el uso del gráfico, se analiza el siguiente ejemplo:

Datos: $\text{CO}_2 = 13\%$
 $T_{\text{humos}} = 360^\circ\text{C}$

A partir del punto representativo del tanto por ciento de CO_2 , se traza una horizontal: en el punto de intersección de esta última con la curva "e" se traza la vertical, con lo que se obtienen los siguientes valores:

Cantidad de aire de combustión	=	12,5 m ³ n/kg aceite
- Exceso de aire	=	18%
- Contenido térmico de los gases de combustión.	=	740 kcal/m ³ n

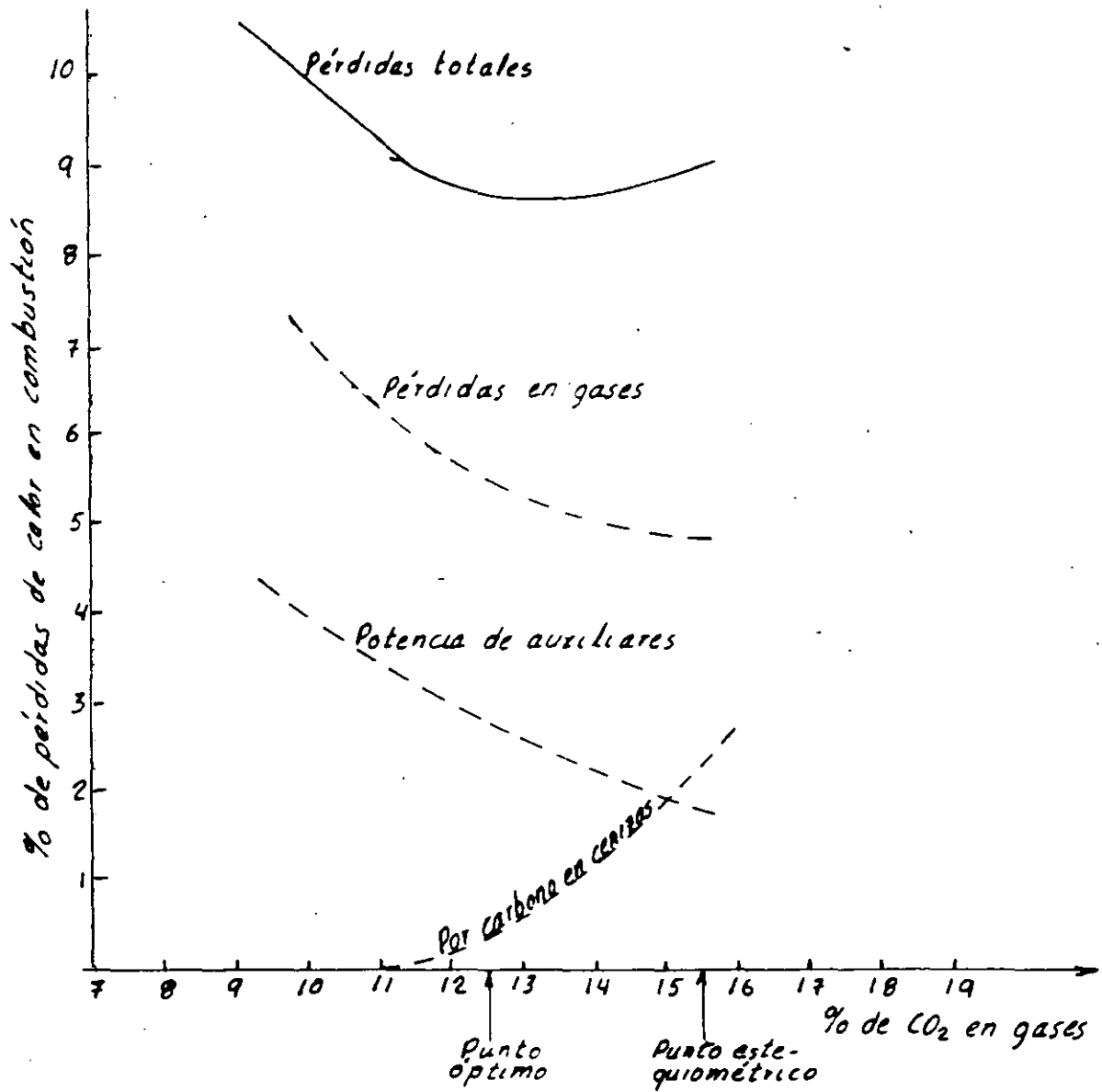


FIG. .- VARIACION DE PERDIDAS EN CALDERA CON EL DIOXIDO DE CARBONO (CO)

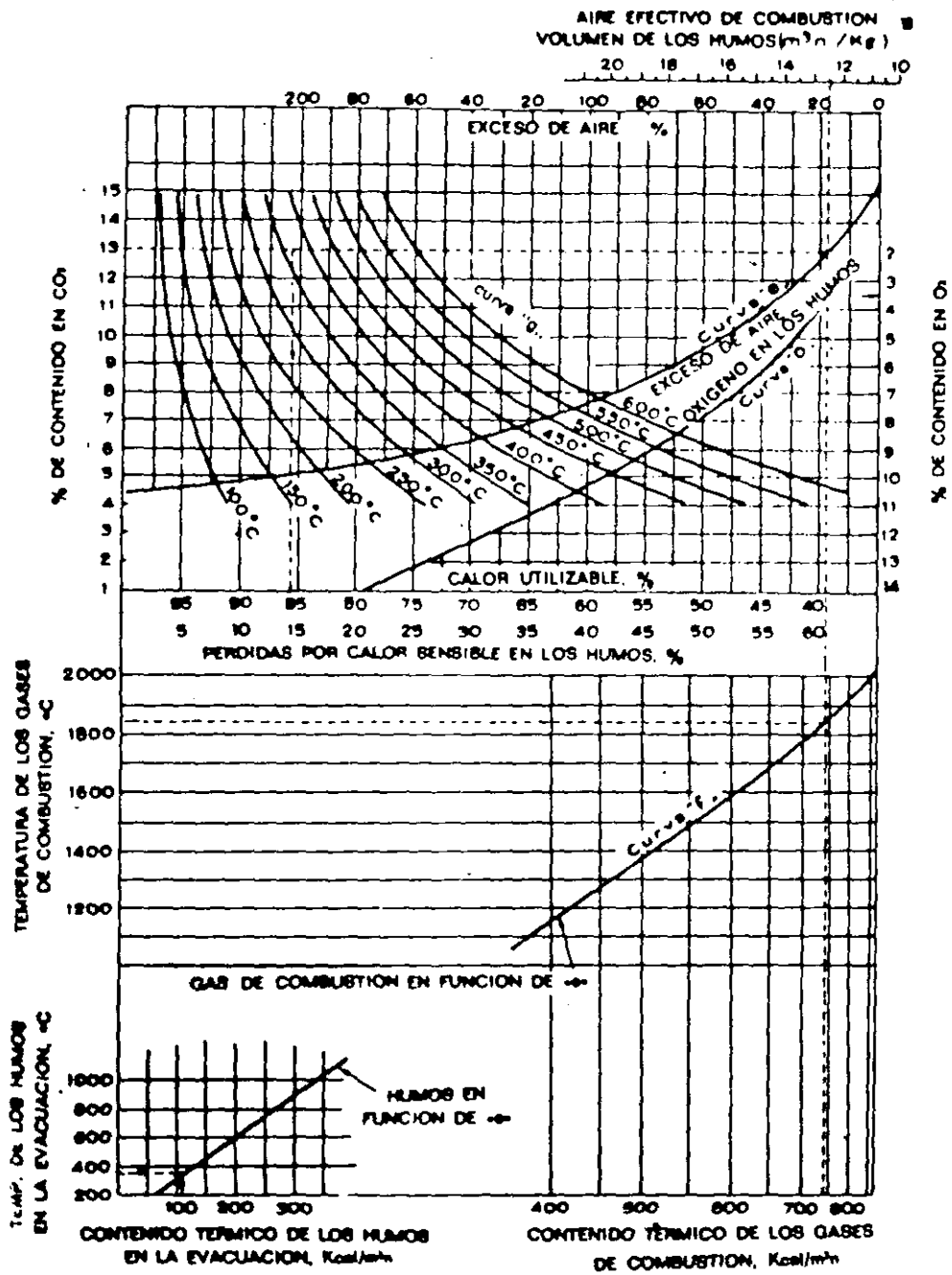
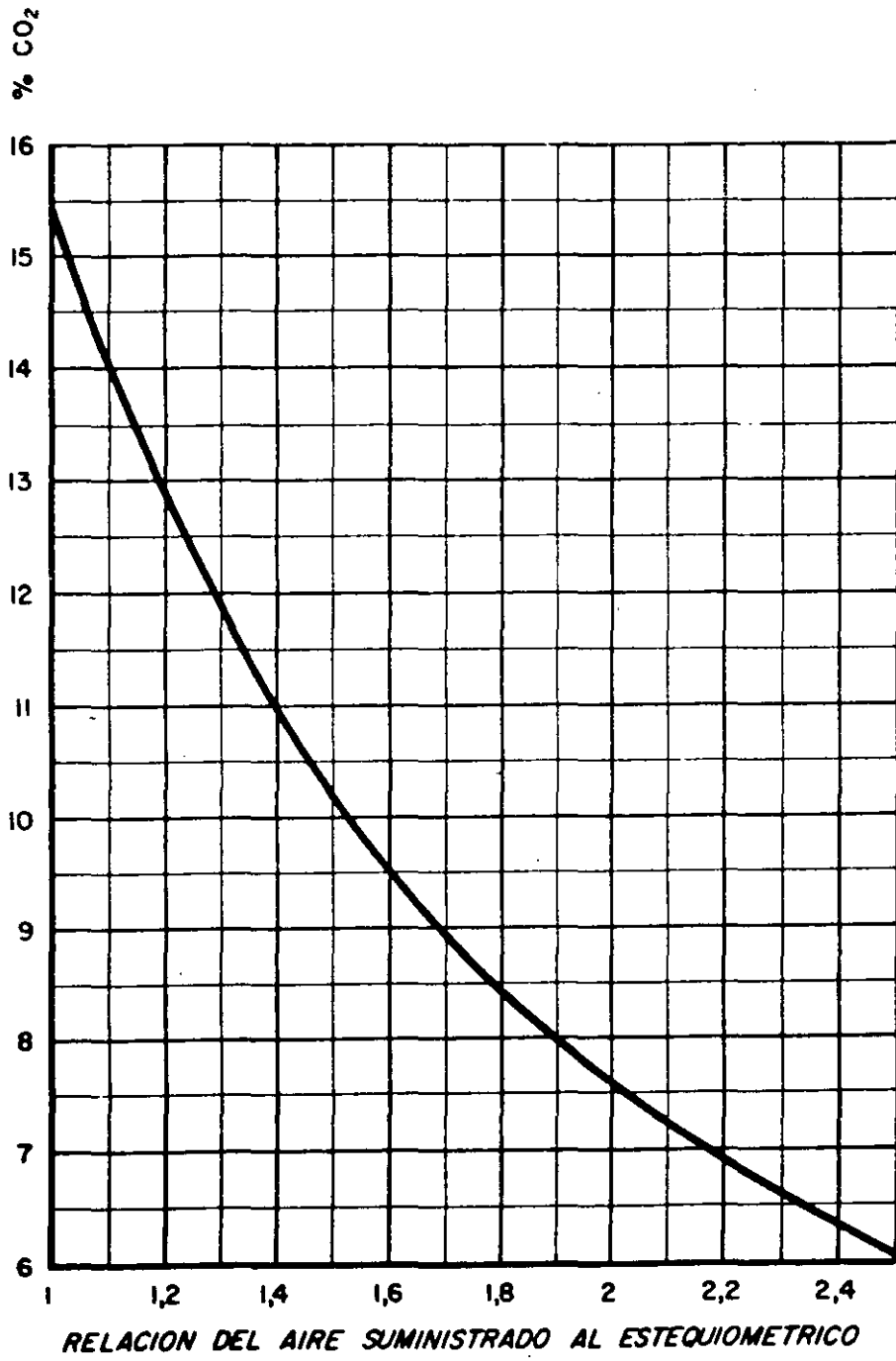
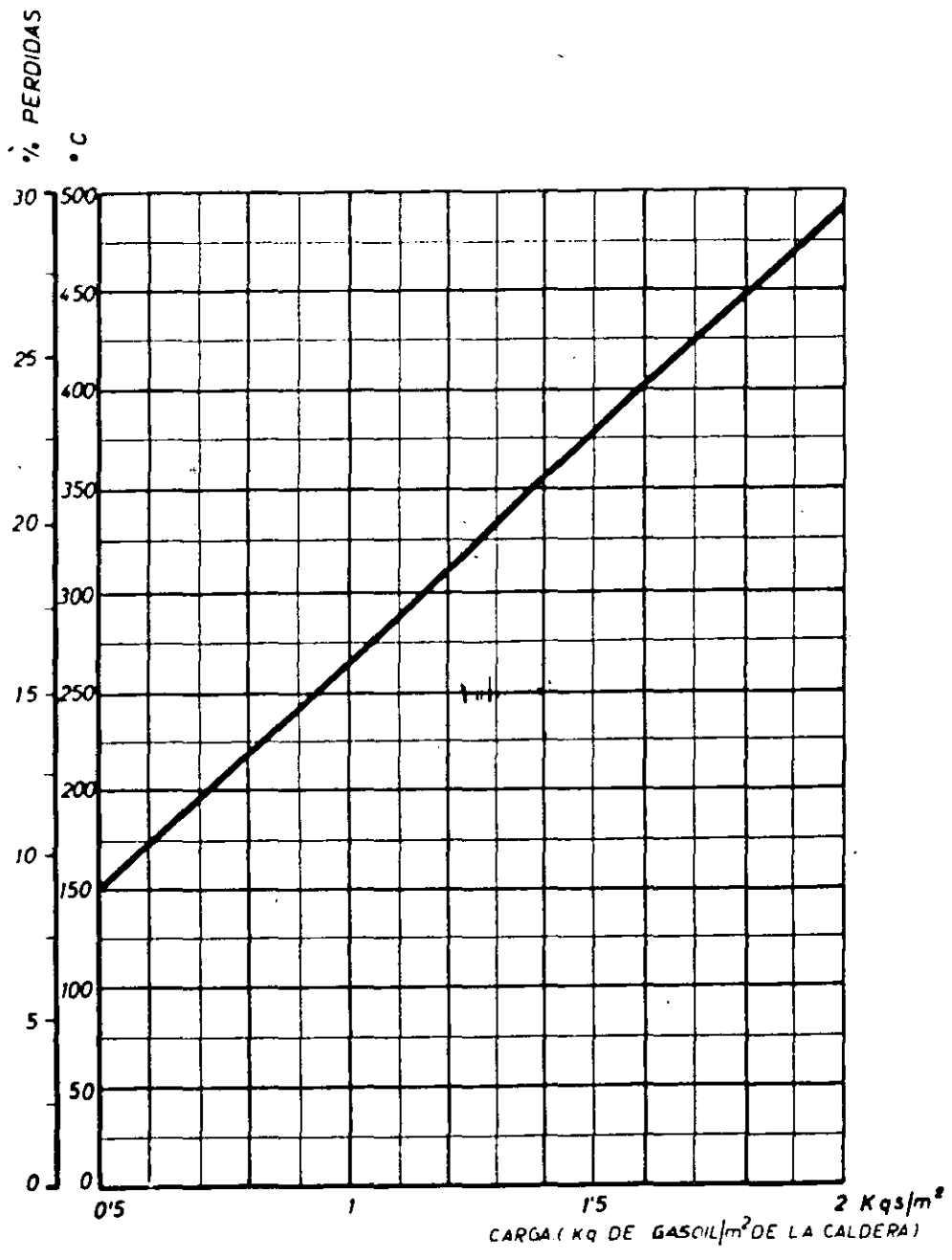


FIG. .- DIAGRAMA DE COMBUSTION DE UN ACEITE COMBUSTIBLE

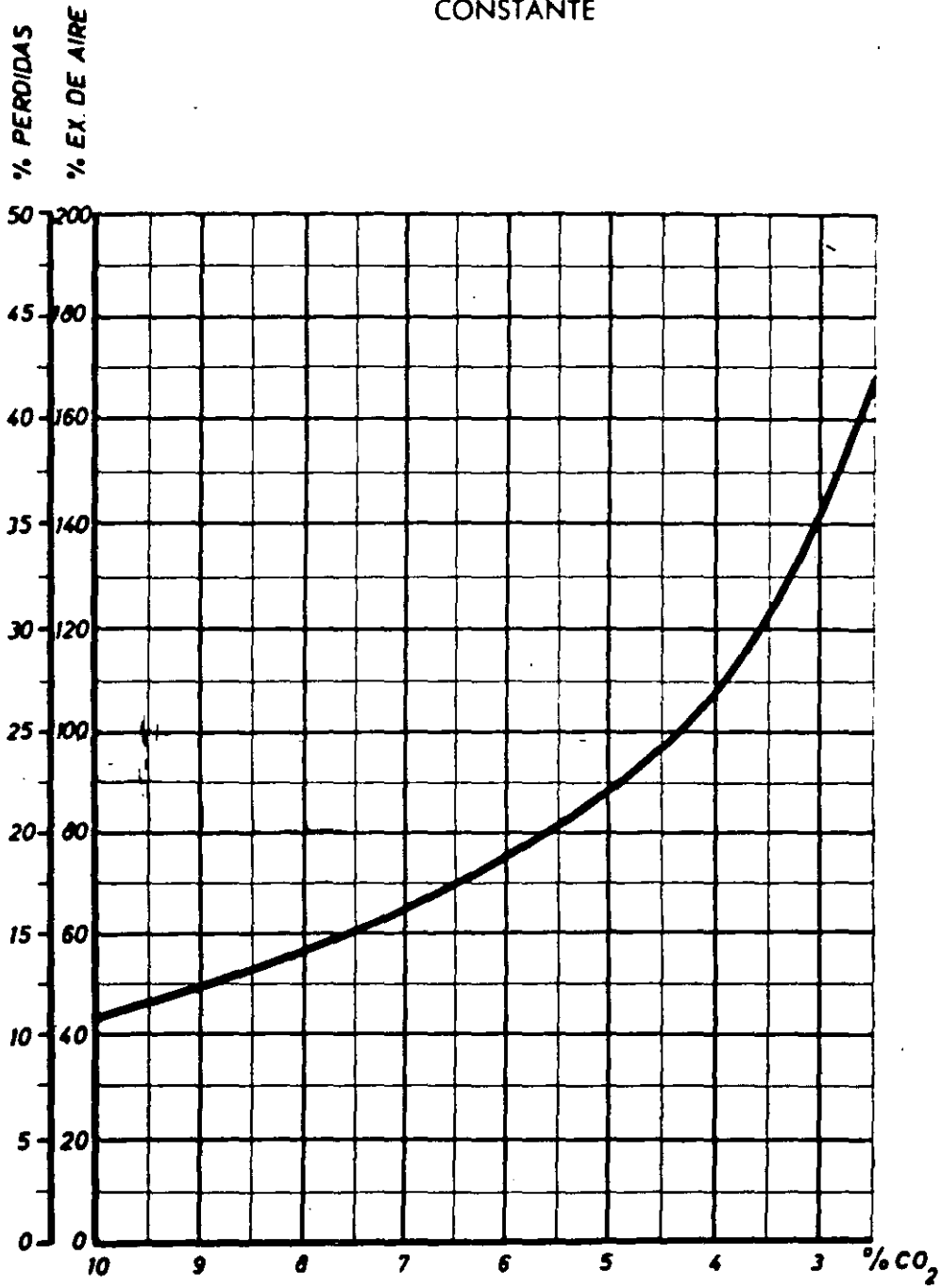
% CO₂ / EXCESO DE AIRE



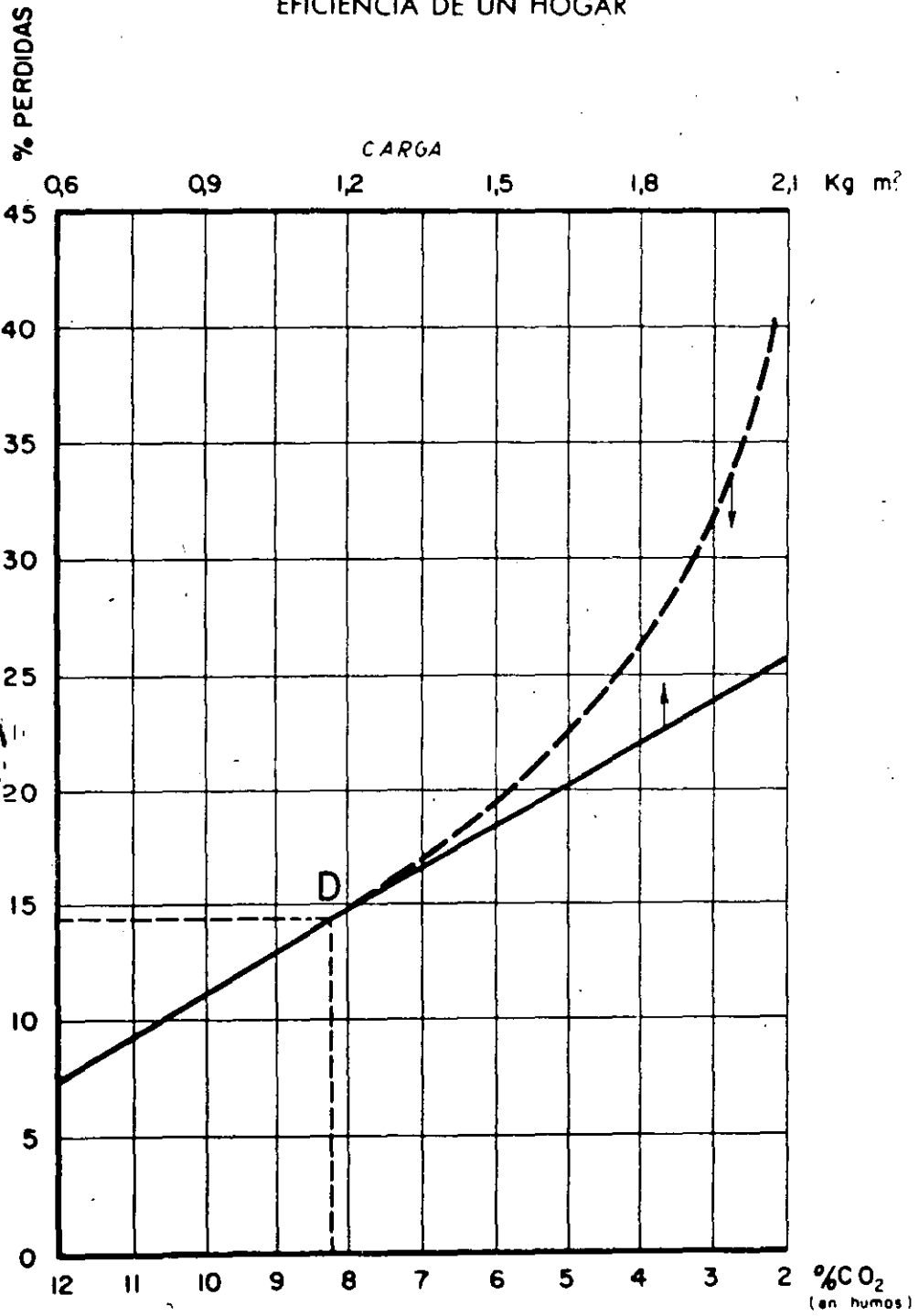
RENDIMIENTO DEL HOGAR EN FUNCION DE LA CARGA



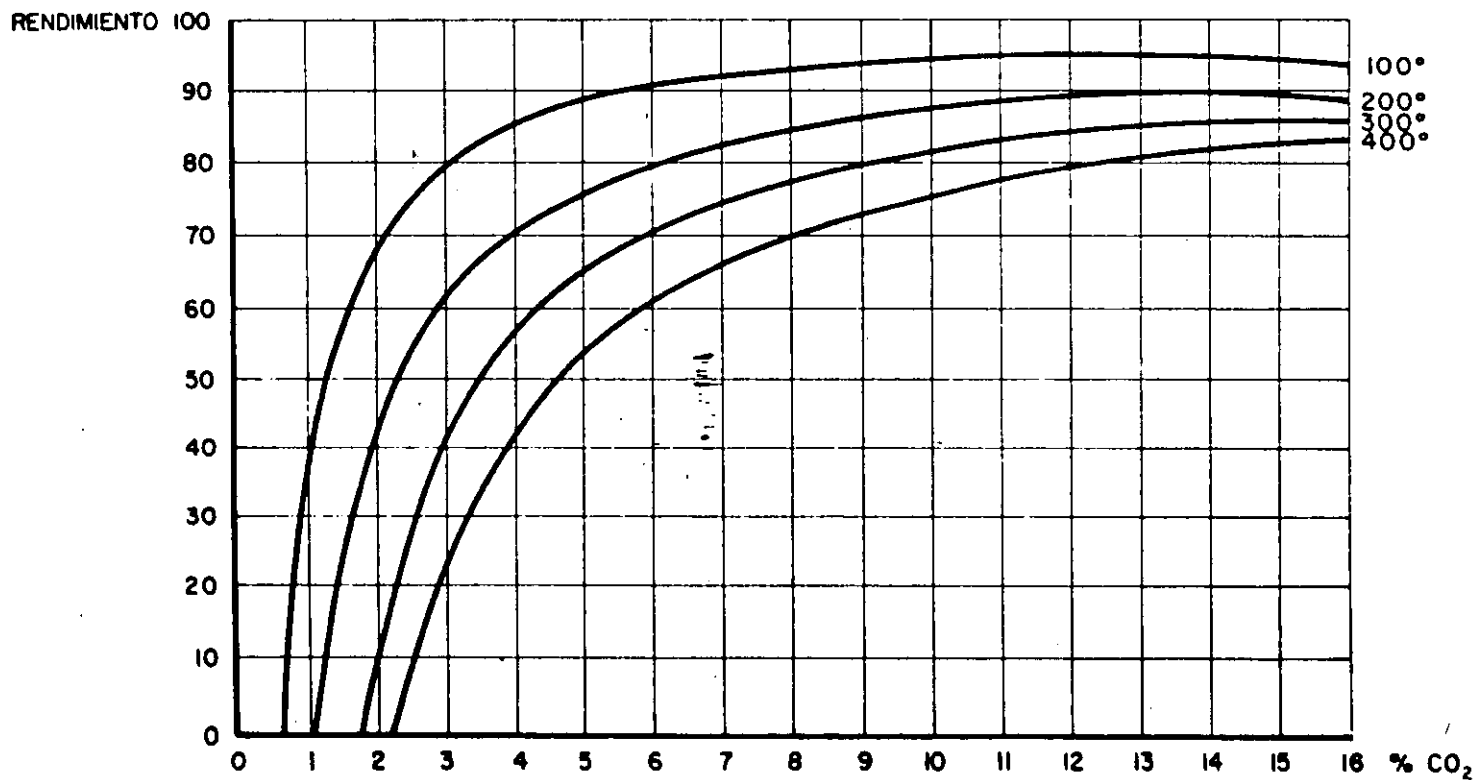
PERDIDAS POR CALOR SENSIBLE DE HUMOS A TEMPERATURA
CONSTANTE



EFICIENCIA DE UN HOGAR



COEFICIENTES DE RENDIMIENTOS EN FUNCION DEL % CO₂ PARA DIVERSAS TEMPERATURAS



Caundo la velocidad de propagación de la ignición es del orden de 1 m/s, llama se estabiliza en deflagración. La deflagración es máxima para la combustión neutra. Si se trata de mezclas muy reactivas, esta ignición se propaga por ondas o choque; cebada de ignición, la primera fracción de mezcla se dilata, comprimiendo a las siguientes, las cuales se calientan por encima del punto de ignición por efecto de la compresión, propagándose a una velocidad de 1 km/s, aproximadamente, con detonaciones bruscas: explosión.

Llama

Esta debe ser luminosa, un poco anaranjada en el extremo; nunca ha de tocar las paredes ya que en la zona de contacto formaría coque; debe circunscribirse tangencialmente al refractario, llenando al máximo el hogar.

La llama nace a 2.3 cm de la ficha y se mantiene a esa misma distancia (*). Si se aleja puede llegar a extinguirse o provocar pulsaciones (presiones-depresiones) con vibración de las puertas de la caldera, de la sala o incluso del edificio por resonancia.

La extinción de la llama puede provenir de:

- Exceso de aire (límite inferior)
- Excesiva velocidad de la mezcla aire-combustible (velocidad superior a la deflagración).
- Pulverización defectuosa
- Tiro insuficiente
- Cámara de combustión excesiva, ante la cual la mezcla combustible-comburente es pobre. El aire tiende a colarse entre llamas y paredes.

Si la deflección de aire no es correcta, la llama puede iniciarse dentro del cono deflector, elevando excesivamente la temperatura del sistema y coquizando el combustible dentro de la línea y la ficha, obstruyéndolos.

*Zona de ebullición

Exceso de Aire.- Teóricamente un kg de combustible líquido necesita 11 m^3 de aire para su combustión, es decir, un poco más de 14 kg de aire por kg de combustible. Prácticamente es preciso dar un exceso de aire (15%) que corresponda con $13-14 \text{ m}^3/\text{kg}$ de combustible.

Contenido en CO_2 : con los combustibles líquidos, el valor máximo del CO_2 para una combustión absolutamente neutra es 15.5%.

Debe analizarse siempre el contenido CO_2 de las instalaciones para dejar en todo caso, un rendimiento óptimo por conjugación de este factor y la temperatura de salida de humos.

Humos: Entre las causas susceptibles de engendrar humos se pueden citar:

a) Modificación de la relación aire-combustible por:

- Aumento de consumo de combustible sin aumento de aire
- Disminución de aire insuflado, permaneciendo constante el combustible.

Este fenómeno se da siempre en salas mal aireadas.

b) Disminución del tiro por:

- Aumento de temperatura exterior o del régimen de vientos
- Entradas secundarias de aire en la chimenea
- Falta de aire en la sala de calderas, produce depresión y anula el tiro.

c) Pulverización defectuosa por:

- Viscosidad excesiva: Falta de temperatura en el fuel-oil ($70-100^\circ\text{C}$ para los de pulverización mecánica; $50-70^\circ\text{C}$ para los de emulsión).
- Presión insuficiente
- Obstrucción de la ficha, de los filtros o deterioro de la ficha, por trato inadecuado.

d) Defectuosa mezcla de aire./combustible.por:

- Velocidad insuficiente del aire
- Estabilizador de llama mal colocado
- Contacto directo de la pulverización con las paredes del refractario.
- Ficha demasiado atrasada, respecto al deflector

Color del humo: Por regla general y con buenos combustibles (gas-oil-petróleo), las instalaciones con quemadores de calidad no producen humos visibles.

El fuel-oil y con refractario frío, produce humos grises (Escala Ringelman número 2).

Temperatura del Humo: Siempre superior al "punto de rocío ácido"; para calderas de calefacción central oscila entre 200 y 300°C.

Esta temperatura aumenta excesivamente cuando:

- El consumo del combustible es superior al normal (30 kg por m³ de hogar o un kg de aceite/m²/caldera).
- Las superficies de las calderas están cubiertas interiormente por incrustaciones calcáreas y exteriormente por hollín o cenizas.
- Si el porcentaje de CO₂ aumenta o la llama es demasiado larga y la temperatura se toma cerca de su final.
- Si el tiro es excesivo
- Si la caldera es excesivamente corta

Al reducirse el CO₂ el volúmen de los gases aumenta en la misma proporción del exceso de aire.

INDICES DE OPACIDAD DE LOS HUMOS

Escala Ringelman: La comparación y tabulación de los humos se hace por transparencia. Esta escala sólo afecta a humos visibles y su graduación del transparente al opaco tiene por expresión el gris de una cartulina perforada que va del blanco al negro.

Su color sirve para humos procedentes del carbón, pero al aplicarlo a otros combustibles de hidrocarburos, puede entrañar -- errores de apreciación sensible, ya que por producir partícula. finísimas no son captadas a simple vista por el ojo humano y só lo su concentración, aglomeración o reacción con la atmósfera, permiten en ciertas condiciones metereológicas su detección - visual.

El índice No. 2 es el máximo tolerable y ya indica que: Sala de calderas (comburente), chimenea (evacuación), quemador (combustión), hogar (reacción) no están adecuados simultáneamente para un proceso de combustión estequimétrica.

No obstante, este índice es usado y debe conocerse, puesto que no se necesitan aparatos ni conocimientos especiales para sacar con él consecuencias.

Generalmente, para hidrocarburos su numeración del 1.12 coincide con el tanto % de suspensiones en peso de combustible no quemado.

Escala Bacharach: Esta escala, también de opacidad, se logra - filtrando un volumen constante a través de un filtro de papel - especial. Este papel se ennegrece al depositarse sobre el orificio filtrante las partículas contenidas en el humo. El papel - se pasa por la escala tipo para su comprobación y tabulación. Si no se ennegrece más del No. 2 la suspensión carbonosa es pequeña, se puede considerar como aceptable e ideal. Nunca debe - rebasar el No. 4.

Ejemplos comparativos:

<u>Escala Ringelman</u>	<u>Escala Bacharach</u>
Tubo escape auto = 0	Escape auto - 7
Humo cigarrillo = 1	Humo cigarrillo - 3

ESCALA RINGELMAN DE HUMOS

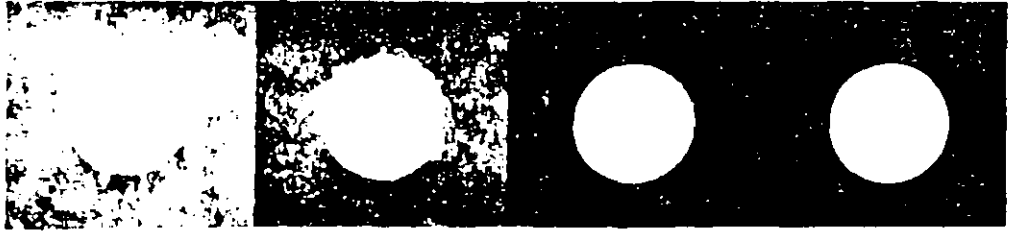


FIG. 10.1

Esta escala debe proporcionarsela el instalador (a usted) en un cartón perforado para que observe el humo de la chimenea a través de los agujeros y determine su número. Si es superior al 2, después de los primeros 20 min. (refractorio caliente) debe revisar la instalación y la combustión.

Desde la intersección de la vertical con las curvas "o" y "f" se trazan dos horizontales, a partir de las cuales se obtienen los siguientes valores:

- Contenido en O_2 - = 3,4%
- Temperatura de combustión = 1840 °C

En el punto de corte de la primera horizontal trazada con las curvas "g" que corresponden a las temperaturas de los humos en el escape para el valor obtenido de 360°C (intermedio entre la curva de 350°C y la de 400°C), se prolonga la vertical obteniendo los dos valores siguientes:

- Calor utilizado = 86%
- Pérdidas por calor sensible en los humos = 14%

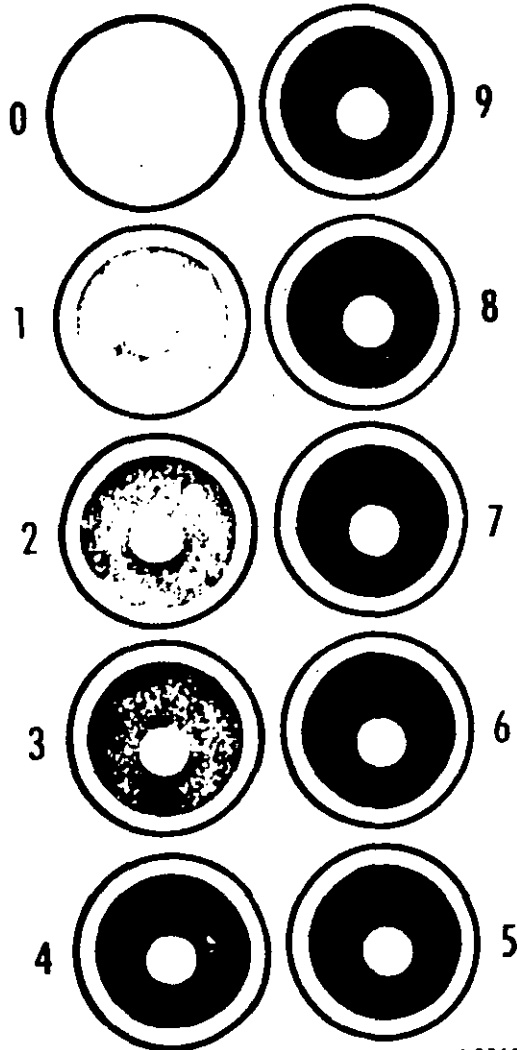
Finalmente, en la parte inferior izquierda del diagrama, a partir del punto de la curva "e" correspondiente a la temperatura de 360°C se determina sobre el eje de las abscisas el valor:

- Contenido térmico de los humos = 115 kcal/m³n

BACHARACH

OIL BURNER SMOKE SCALE

DEVELOPED IN COOPERATION WITH
SHELL DEVELOPMENT COMPANY



This scale is based on a test fuel gas volume of 2250 cubic inches per square inch of filtering area, which is equivalent to 6 full strokes for models R2B and RAC Testers and 10 full strokes for Model RCC Tester. For motor operated smoke meter see instructions for sampling period.



Bacharach Industrial Instrument Co
Pittsburgh 8, Pa.

SCALE No
BR776
MILWAUKEE, WIS.



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

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

O P E R A C I O N

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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 ENCENDIDO DE LA CALDERA.

NO.	PARTE	OBSERVACIONES CONDICIONES
1	Caldera	Llenar a un nivel que haga innecesarias las p. gas durante la elevación de presión, siendo éste de dos cistales. Comprobar bombas de agua de alimentación.
2	a).- Sistema aceite combustible b).- Sistema gas combustible	En servicio. Circulando aceite combustible a temperatura controlada y a la presión mínima. Atomizadores limpios en su posición. Vapor de atomización disponible a 10.5 Kg/c Las dos trampas de vapor de adelante y de atr en servicio. Cuando los quemadores estén en su posición, abrir la válvula de aislamiento de vapor. Comprobar que todas las válvulas de los cuer dores estén cerradas y los venteos estén abier Compruebe la presión usando los venteos. Abra las válvulas de aislamiento en cada niv de quemadores. La presión del gas controlada a 3 Kg/cm ² . - adelante de las válvulas principales de aislamiento a quemadores.
3	Sistema aire control	En servicio.
4	Sistema agua alimentación A y BP.	Cargado. Disponible suficiente agua desmineralizada. Tener en cuenta las limitaciones de alimenta agua fría al domo caliente.
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 válvula 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 por los drenes los tanques de aire para quitar el agua. Instrumentos en funcionamiento. Gráficas de registradores en servicio.
27	Muestreos	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 precalentadores. Aire de sello a las compuertas del R.G. norma 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 que se automáticamente la protección del quemador (Shutters). 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"> a.- Registros abiertos (algunos pueden no estar disponibles y el sistema continuar funcionando). b.- Válvulas de gas principal y de pilotos en frente y atrás cerradas. c.- Venteos de gas principal y de pilotos en frente y atrás abiertos.

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 al

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

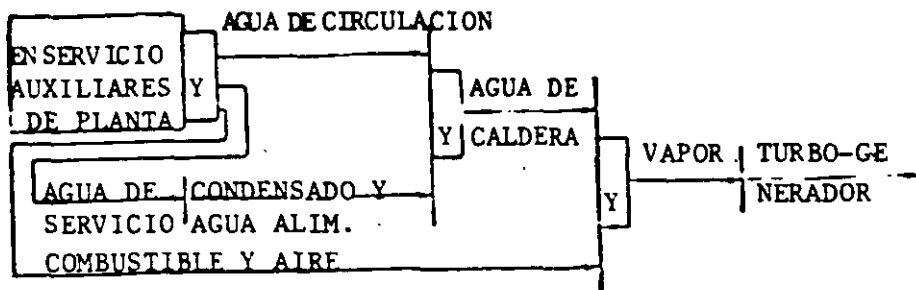


FIG. XVII-1.- DIAGRAMA COMBINADO DE SISTEMAS

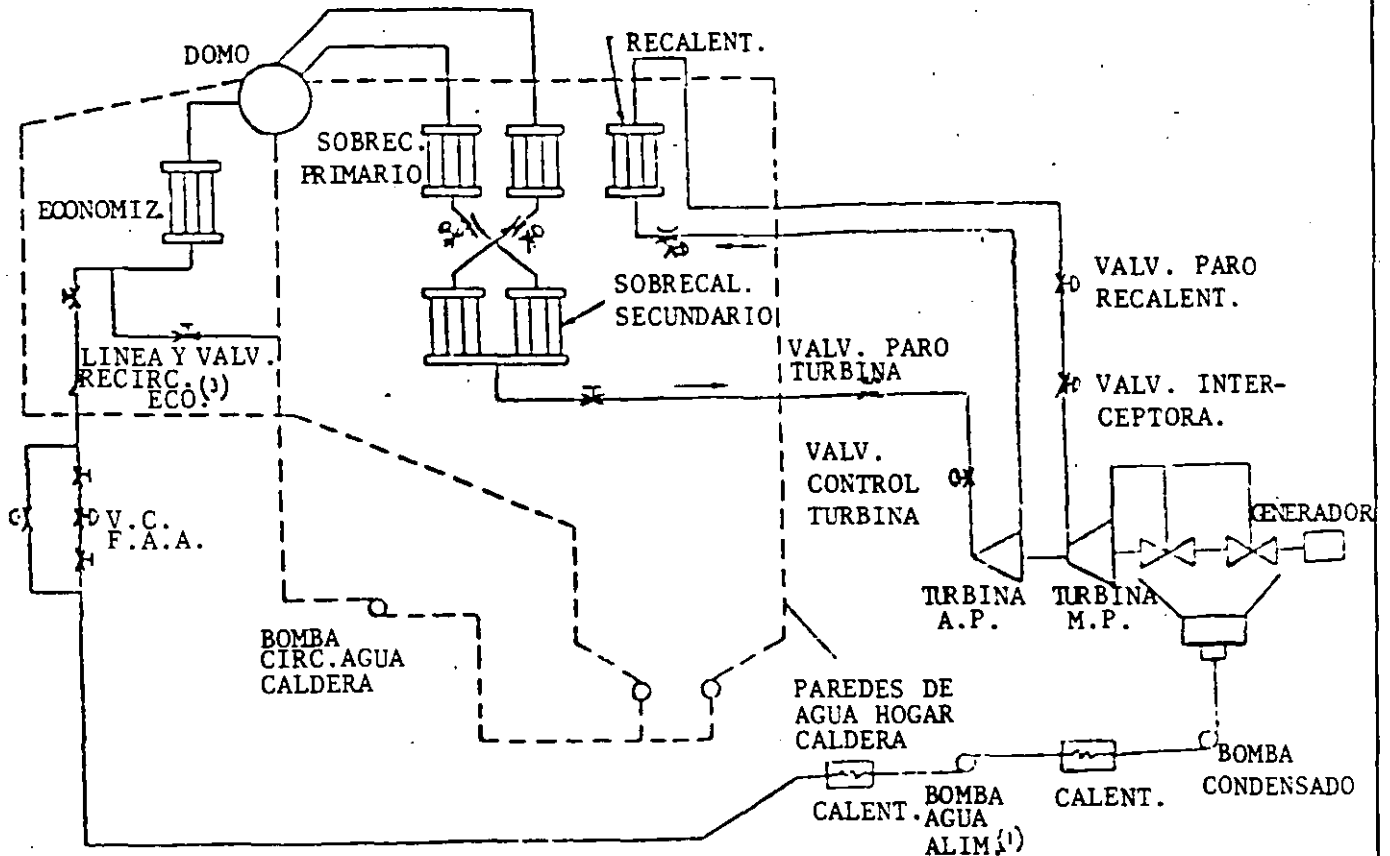


FIG. XVII-2.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL SISTEMA AGUA-VAPOR

VERIFICAS DE PRE-ARRANQUE ESPECIFICS. - PARA CADA CALDERA

DOMOS Y CABEZALES CERRADOS.

VALVS. DRENAJE CALDERA CERR.

AGUA DE SERVEN PUERTAS ENFR. CON AGUA

SELO DE AGUA EN POZOCENZ.

TANQUE DE ESCORIA LLENO.

VALVS. CONTROL Y PARO CALDERA CERRADAS

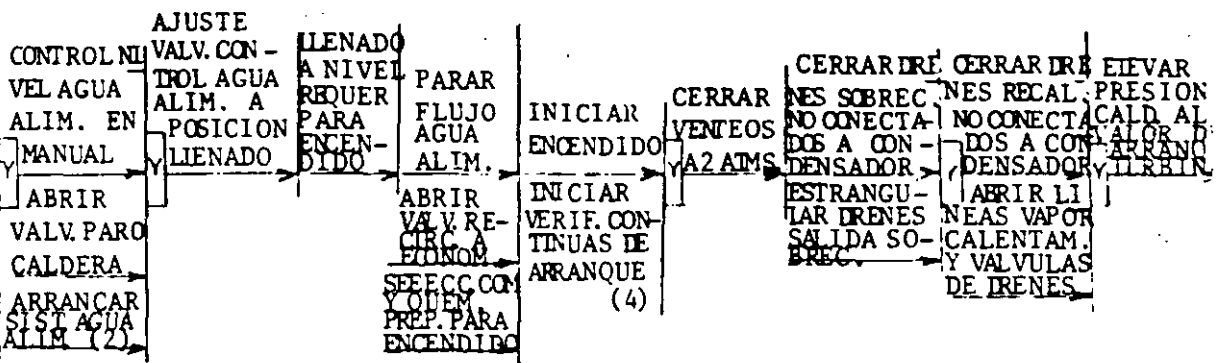
VALVS. DE VENTED ABIERTAS

VALV. RECIRCULACION ECONOMIZADOR CERR.

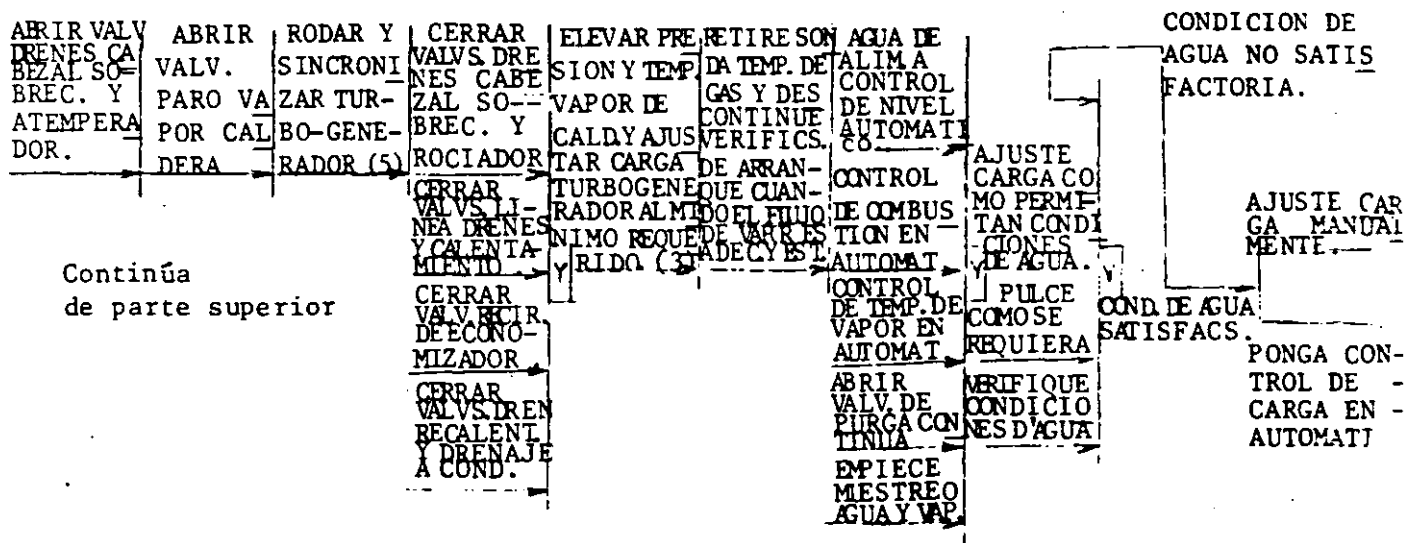
DRENES SOBREC Y RECALENTADOR ABIERTOS

VALVS. AGUA ATEMPERACION A SOBREC Y RECALENTADOR CERRADAS

ALXILIARES DE PLANTA EN SERVICIO (1)



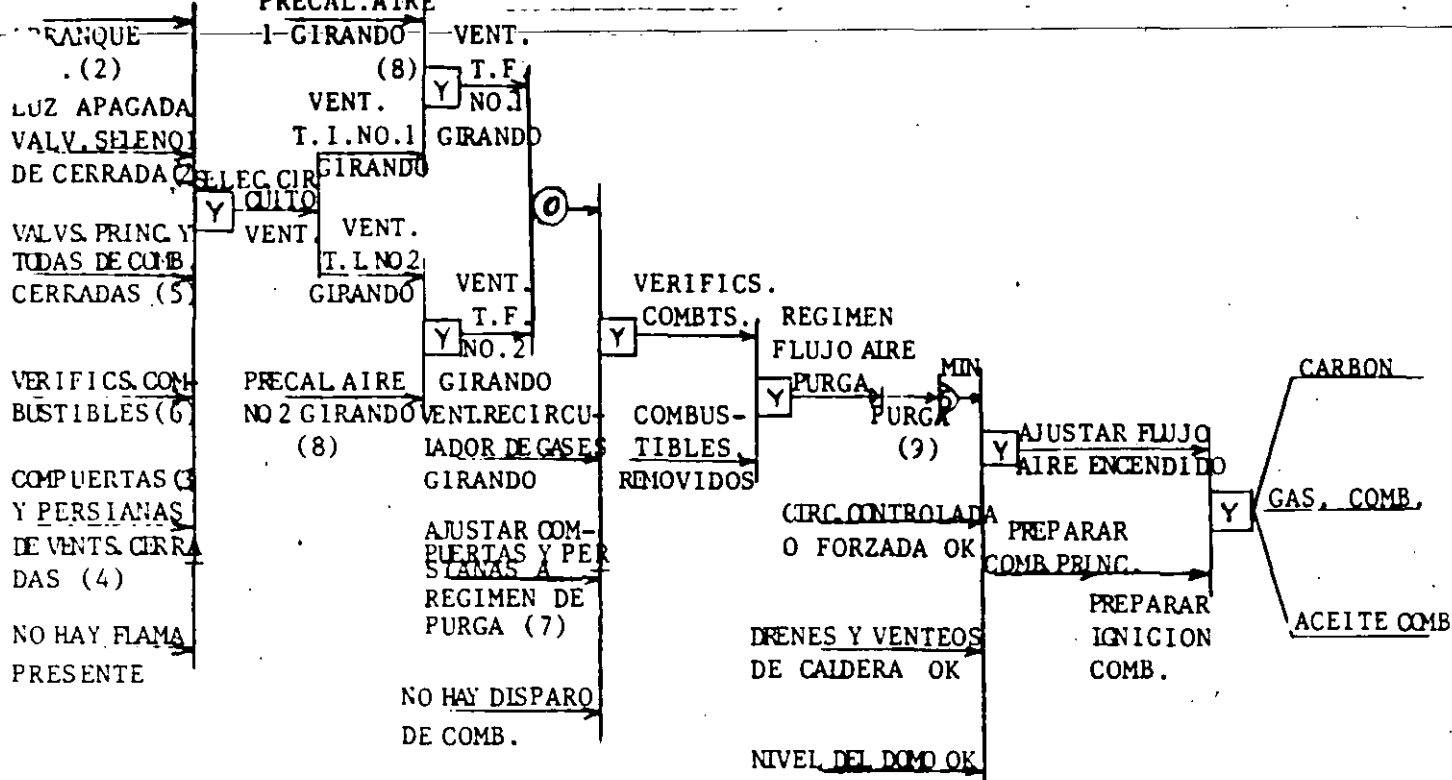
Continúa en parte inferior.



Continúa de parte superior

FIG. XVII-3.- SECUENCIA DE ARRANQUE DEL SISTEMA AGUA-VAPOR DE LA CALDERA

VERIFS. PRE-



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.

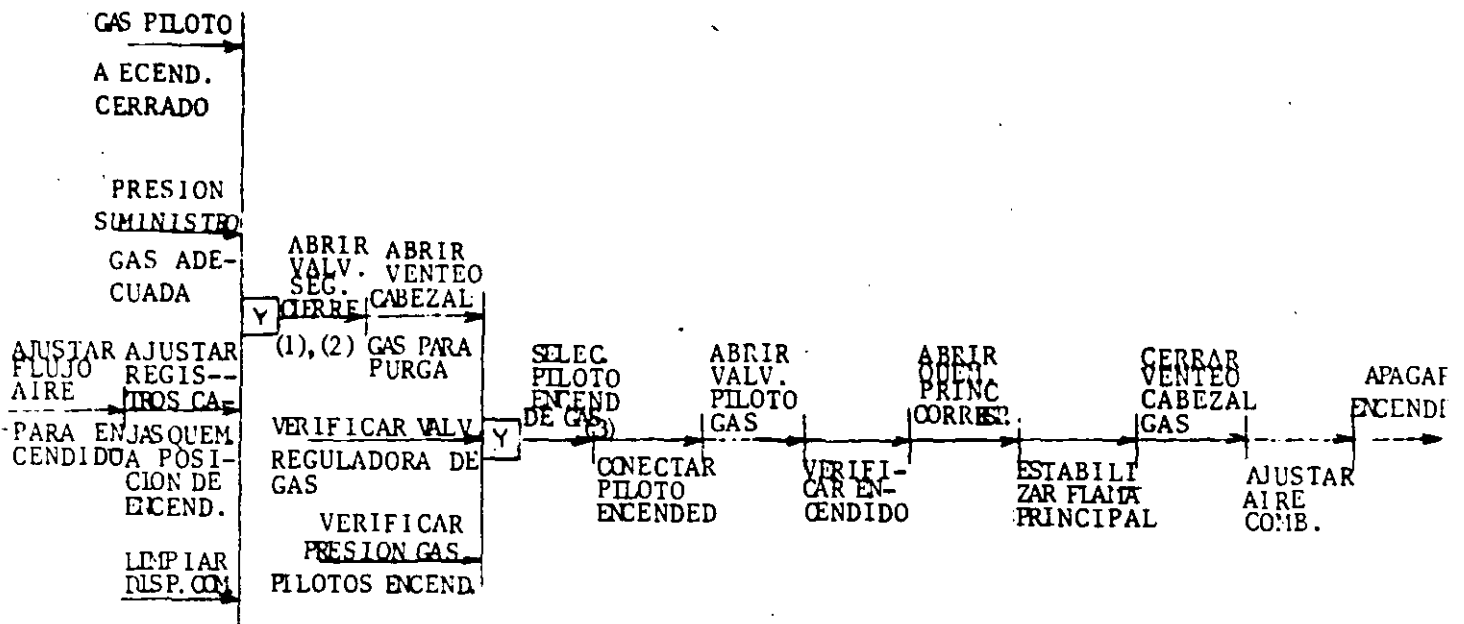


FIG. XVII-5.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DEL SISTEMA GAS COMBUSTIBLE

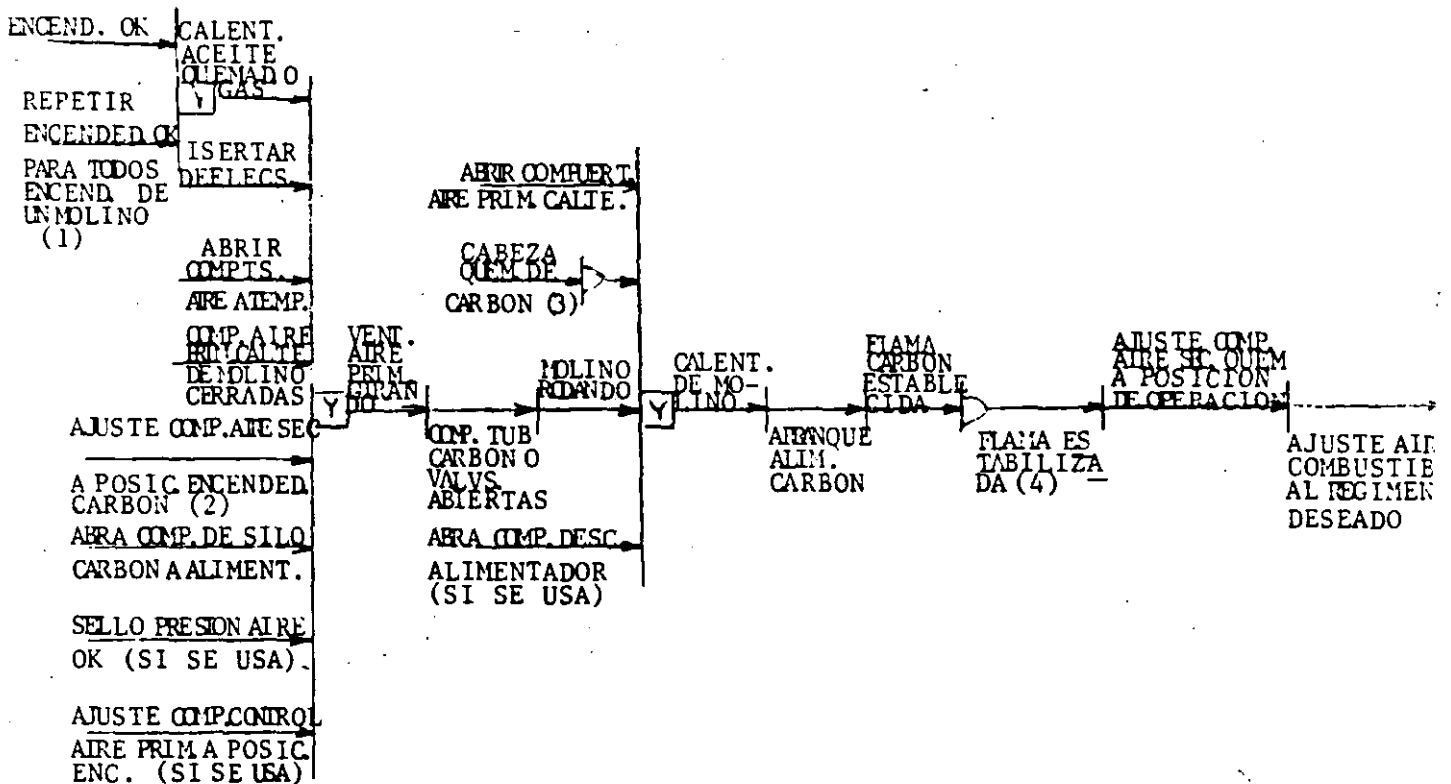


FIG. XVII-6.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DE CARBON PULVERIZADO

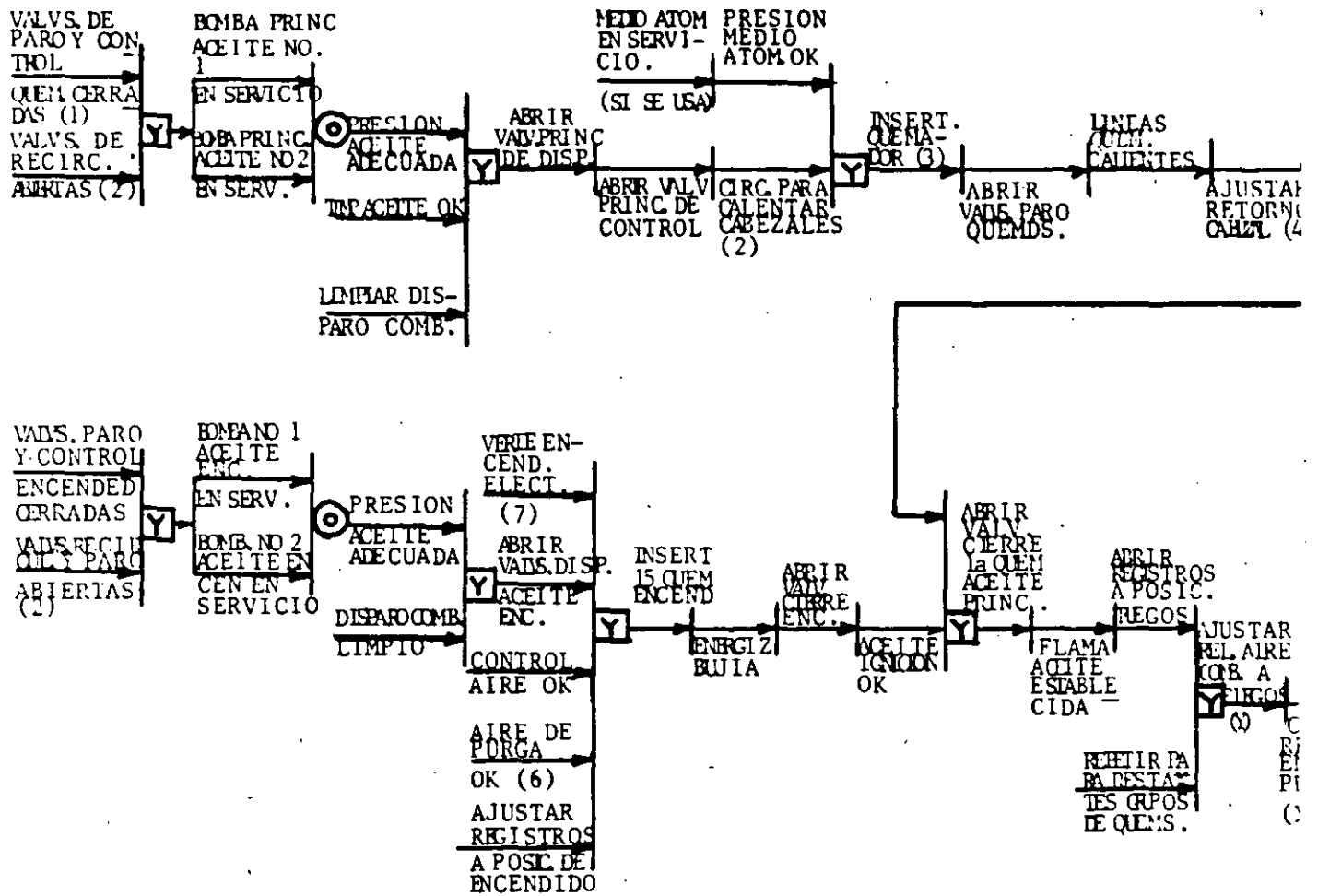


FIG. XVII-7.- SECUENCIA DE ENCENDIDO DE ACEITE COMBUSTIBLE

OPERACIONES PARA ELEVAR PRESION 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 1 T. I.
5	Abrir compuertas control T. I. ligeramente	Obténgase la presión en el hogar recomendable (aprox. 0.25 cm H ₂ O)
6	Arranque ventilador T.F.	
7	Abrir compuertas control T.F. ligeramente	Obténgase 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> <ul style="list-style-type: none"> a. -Menos de $7\text{Kg/cm}^2 - 55^\circ\text{C/hora}^*$ b. -Arriba de $7\text{Kg/cm}^2 - 55^\circ\text{C/hora}$ c. -Arriba de $28\text{Kg/cm}^2 -$ Puede incrementarse la velocidad siendo normalmente la limitación la temp. del metal del sobrecalentador. *Debido a dificultades de circulación ó limitación de esfuerzos en el domo, en algunas ocasiones se requieren menos de 55°C/hora. d. -Temp. diferencial domo-55°C (mas) e. - " metal tubo -550°C f. -Diferencia max. temp. entre bombos circulación cald. en operación y reserva $- 50^\circ\text{C}$
13	Drenes sobrecalentador y recalentador	Ciérrense a 3.5 Kg/cm^2

14	Venteos	Ciérrense a 5 Kg/cm^2
15	Valvs. recirculación economizador	Ciérrense 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 empieza 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 dentro de los valores de control, igualado 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 Precalentador se incendier</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"> a.-Proporcionado incorrecto de superficies de transferencia de calor. b.-Exceso de aire insuficiente c.-Temp. agua alimentación alta d.-Depósitos lado gases en sobrecalentador e.-Falla sistema control temperatura <p>Altas temp. pueden ser causadas por:</p> <ul style="list-style-type: none"> a.-Proporcionado incorrecto de superficie de transferencia de calor b.-Paredes del hogar sucias c.-Exceso de aire excesivo

NO.	OPERACION	OBSERVACIONES
25	Control temp. recalentador	<p>d.-Arranque tarde de atemperador.</p> <p>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>

. 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 (CO , 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 inadmisible 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

M A N T E N I M I E N T O

ING. A. PLANCHU

FEBRERO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

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 fallas 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 férulas en ciertos extremos de los tubos del sobrecalentador o por la colocación de - -

desviadores internos en los cabezales del sobrecalentador. La erosión de los tubos 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 puede usarse 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 deberá 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 ^suceptibles 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, debién dose emplear los métodos más confiables de soldar y probarse radiográ- ficamente o ultrasónicamente estas soldaduras.

/s

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 CO_2 en los gases de combustión a través -- del precalentador siendo esto una indicación directa de la cantidad de fugas; la caída de 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.

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 ta - lerancia incrementan grandemente los esfuerzos y son las causas que an - teceden a fallas.

Debido a las condiciones de polvo y suciedad en que tra - bajan muchos ventiladores debe tenerse mucho cuidado para asegurar la - limpieza del sistema de lubricación y cojinetes porque muchos paros cau - sados 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 indicación 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.

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 de bidos a fugas de vapor, y el trabajo mecánico consiste normalmente en pre venir 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 tram pas 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.

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 buges ; 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 - 15

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.

XII.- INSTRUMENTACION Y CONTROL.-

Actualmente se usa una gran variedad de instrumentación para la supervisión y control de plantas modernas, incluyendo esta instrumentación físicos, electrónicos, nucleónicos, 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 círculos 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

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 planeación 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 al nivel de productividad.

FACTORES MAS IMPORTANTES DEL MANTENIMIENTO

La función del mantenimiento es la de proporcionar un servicio para mantener 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 del 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

cióna el equipo, se midenclaros, 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.

- 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



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADORES DE VAPOR O CALDERAS

CONTROL DE CONTAMINACION DE CALDERAS

ING. M. CASTILLO

FEBRERO 1994

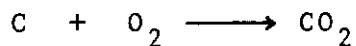
XV.- CONTROL DE CONTAMINACION DE CALDERAS

1.- Origen de Contaminantes

El quemado de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) es la fuente de contaminación del aire más común que proviene de la Industria. Estos combustibles se queman para producir calor; agua caliente o vapor ^{que} pueden tener diferentes usos. (?)
4

Los combustibles fósiles no sólo contienen carbono, hidrógeno y oxígeno, sino también azufre y nitrógeno, además de pequeñas cantidades de impurezas minerales, que juntos son responsables de muchos de los problemas de contaminación del aire por la combustión de combustibles fósiles; cuando éstos se queman en presencia de aire, se efectúa una serie de reacciones complejas que pueden resumirse en la siguiente forma:

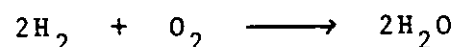
- . El carbono (C) se combina con el oxígeno para formar óxidos de carbono.



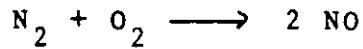
- . Con las condiciones adecuadas, el monóxido de carbono (CO) se oxida y se convierte en dióxido de carbono (CO₂).



- . El hidrógeno combinado con el carbono se oxida y se transforma en agua.

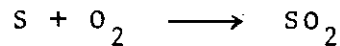


- . A elevadas temperaturas, las cuales ocurren en la flama, tanto el nitrógeno del petróleo como el del aire de combustión reaccionan con el oxígeno para dar monóxido de nitrógeno (NO).

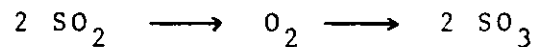


El NO se combina posteriormente con oxígeno en la atmósfera para formar NO_2 .

- . El azufre del petróleo se oxida y se convierte en óxidos de azufre, principalmente dióxido de azufre. (SO_2).



- . Cerca del 1% al 3% del dióxido de azufre formado, se oxida de nuevo a trióxido de azufre bajo condiciones de exceso de aire, requerido para quemar petróleo en forma eficiente.



- . Las impurezas en el combustible son inflamables y producen ceniza, parte de ésta, llevada ceniza volante, se vuelve aerotransportable y se lleva fuera de la caldera por los gases de escape.

2.- Medición de Contaminantes

Mejorar o aún preservar la calidad del aire requiere de la medición de las concentraciones de los contaminantes en la atmósfera. Tal medición sirve para varias funciones vinculadas pero definibles.

- . La medición proporciona los datos necesarios sobre los cuales es posible determinar la relación de los efectos con los niveles de los contaminantes.
- . La medición provee un criterio cuantitativo sobre si los estándares de calidad del aire se están logrando o superando y en que grado.
- . La medición es necesaria para determinar si algunos cambios nocivos en los niveles ambientales globales de los

contaminantes están ocurriendo como resultado de las actividades del hombre.

- . La medición proporciona los datos para determinar el destino de los contaminantes en la atmósfera y junto con la información meteorológica, es un auxilio para modelar y por consiguiente para predecir la relación entre concentraciones, emisiones y condiciones climáticas.
- . Las mediciones de la fuente proveen información acerca de las emisiones y donde es aplicable, si el emisor está logrando el estándar regulador.

En cada una de estas circunstancias, serán diferentes los contaminantes por medir, la duración del programa de medición, la sensibilidad del método requerido y el período sobre el cual se promedia la concentración.

El tiempo de respuesta que se requiere para determinar los efectos sobre la salud humana es una función del tiempo de respuesta del cuerpo a los cambios en las concentraciones de contaminantes en la atmósfera. Respecto a un contaminante como el dióxido de azufre, dicha respuesta es rápida y los picos atmosféricos de corta duración de esta especie pueden ser el factor crítico en la determinación de los efectos sobre la salud; en cuanto a un contaminante acumulativo como el plomo, la respuesta es lenta y el promedio a largo plazo es todo lo que sea necesario. Estas diferencias se reflejan en los estándares de calidad del aire donde éstos son operativos, con un promedio de treinta minutos para el estándar de SO_2 y un promedio de treinta días para Pb.

En el caso de algunas fuentes industriales de contaminación del aire, el registro de gases de desecho que se emiten continuamente es una parte importante del control del proceso, y ha sido una práctica estándar en las grandes plantas procesadoras durante muchos años porque la falta de control puede resultar en una pérdida de producto valiosa. Por ejemplo, las concentraciones elevadas de monóxido de carbono y partí-

culas de carbono no quemado que se encuentran en los gases procedentes de las calderas, representa una pérdida apreciable de calor, mientras que las concentraciones elevadas de dióxido de azufre que se hallan en los gases de desecho de una planta de ácido representa una pérdida del ácido del producto.

Los métodos ideales de medición son los que dan resultado casi instantáneos, los cuales se pueden utilizar entonces para el control del proceso así como también para determinar las emisiones de contaminantes; de manera invariable, estos son los métodos físicos, pues los métodos químicos, aún cuando estén automatizados por completo, requieren varios minutos. Por supuesto, los controles complejos no son comunes en las calderas pequeñas; el hecho de ajustar éstas para combustión óptima requiere de dispositivos de calibración portátiles, los cuales poseen sistemas de absorción química y son de bajo costo. Sin embargo, se requiere cierto conocimiento y destreza considerable para la operación de dichos dispositivos.

En el método químico simple para análisis de gases de combustión (representado por el método Orsat), se obtiene una muestra de gas de la caldera o la chimenea, se pasa a través de un filtro para remover las partículas, y entonces se transfiere a través de una solución de hidróxido de sodio (para absorber el oxígeno) y finalmente una solución pirogalol alcalina⁵ (para absorber al monóxido de carbono). El dióxido de azufre se absorbe junto con el dióxido de carbono. Para determinar el dióxido de azufre en los gases de una caldera, se tiene que tomar una muestra por separado y utilizar un método de análisis independiente del dióxido de carbono, tal como la titulación yodométrica. Los métodos físicos que se utilizan para estos gases son espectroscopía infrarroja para dióxido de carbono, monóxido de carbono y dióxido de azufre; y espectroscopia ultravioleta para dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y otros. Un método sencillo para dióxido de carbono, utiliza

la densidad diferencial (masa molecular relativa CO_2 - 44 comparada con O_2 - 32 y N_2 - 28), o la conductividad térmica.

La materia en forma de partículas que procede de chimeneas, de hornos y calderas se puede evaluar con el diagrama Ringelman clásico. La densidad del humo se compara con el oscurecimiento fraccionado (de 20% a 80%) del papel, al representar los números Ringelman desde 1 hasta 4 (Fig. 4.1). Este método se puede automatizar mediante la medición del oscurecimiento de un haz de luz que brille a través de la chimenea sobre una celda fotoeléctrica. También es posible tomar una muestra de la materia en forma de partículas que circulan por la chimenea, y entonces determinar químicamente su composición así como también medir la concentración de partículas, su calidad y dimensiones por medios microscópicos o bien de otro tipo.

Un aspecto muy importante de las técnicas de muestreo es el asunto de qué tan representativa es la muestra tomada de la fuente. El resultado final de cualquier análisis sólo corresponderá al valor verdadero si la muestra tomada es una muestra representativa. En los húmeros (tubos de calderas y chimeneas), las emisiones pueden variar a través del tiempo conforme ocurren cambios durante el proceso en la planta. Las emisiones pueden variar también en el espacio dentro del húmero como resultado de las interacciones con la pared y los efectos sobre el flujo por obstrucciones y recodos dentro del húmero. Estos factores se deben considerar cuando se toman las muestras, y por lo general implican muestreo en varios puntos a través de dos diámetros del húmero en ángulos rectos entre sí.

⁵En la bibliografía se mencionan muchos reactivos opcionales que tienen gran mérito, en particular como absorbente para monóxido de carbono; sin embargo, éstos son los más comunes y los más fáciles de preparar.

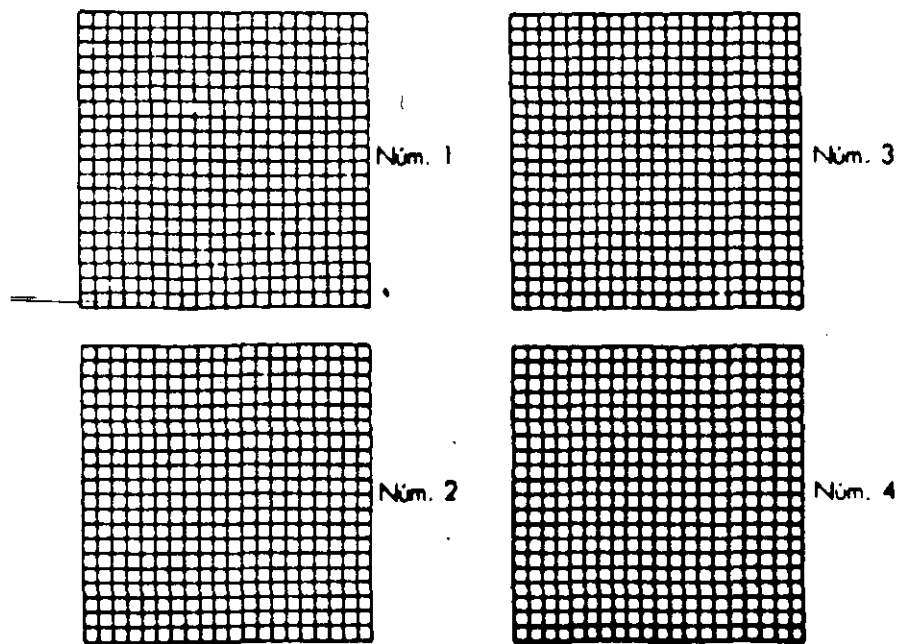


FIG. 4.1.- DIAGRAMA RINGLEMAN ESTANDAR (DE PARKER, A. DIR. INDUSTRIAL AIR POLLUTION, MCGRAW-HILL, REINO - UNIDO, 1978).

La más vasta cantidad de partículas que se transportan por aire se puede colectar conforme éstas caen y salen de la atmósfera; por lo general se depositan dentro de un recipiente cilíndrico de dimensiones estándar, el cual tiene un embudo sobre la parte superior y contiene agua adicional para evitar rearrastre de las partículas. Este método no proporciona resultados que sean representativos de las concentraciones de partículas en la atmósfera, debido a que sólo las partículas más grandes ($> 20 \mu\text{m}$) son lo bastante pesadas como para que se depositen de esta manera sin afectarse debido a los movimientos del viento.

Otro método que se utiliza con frecuencia para determinar los niveles de partículas consiste en arrastrar el aire contaminado a través de un filtro y medir el grado de ensuciamiento, ya sea mediante la medición de la disminución en transmitancia de la luz del filtro (coeficiente de neblina, CDN) o la disminución en reflectancia (unidades de reflectancia de sombra de suciedad, URSS).

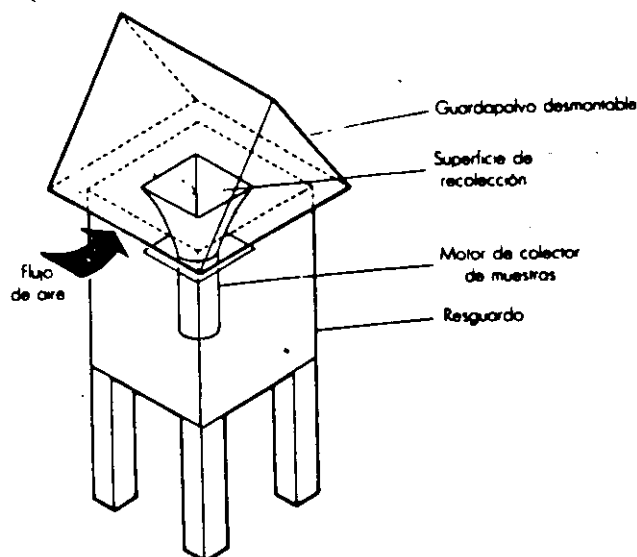


Figura. Colector de alto volumen dentro de un resguardo estándar. El resguardo sirve para reducir la recolección de partículas por encima de $50 \mu\text{m}$.

Una variedad de técnicas analíticas se encuentran asequibles para determinar la concentración de los componentes de interés en las partículas colectadas. Los iones metálicos, tales como plomo, cadmio, mercurio y cinc son los que más comúnmente se determinan mediante absorción atómica después de digestión ácida para extraer los metales de interés.

Los componentes orgánicos de los aerosoles se determinan, primero al obtener la muestra en solución mediante el uso de técnicas de extracción por solventes los cuales no descomponen los compuestos de interés; en seguida, mediante técnicas analíticas estándares para concentraciones raras, por lo general una separación cromatográfica de alguna clase - cromatográfica de capa fina, cromatografía líquida o cromatografía de gases.

CONTAMINANTES GASEOSOS

Los contaminantes gaseosos se pueden cuantificar en la atmósfera de tres maneras principales:

- . Una muestra se puede coleccionar dentro de un recipiente vacío o una bolsa de plástico y transportar de regreso hacia el laboratorio para su análisis (muestreo de captura). Este método indica la concentración del contaminante en la atmósfera al instante en que la muestra se toma, siempre y cuando la muestra sea representativa. El retardo entre tomar la muestra de colecta y hacer la medición real puede resultar en pérdidas de la muestra debido a la absorción preferencial sobre la superficie del contenedor, o por la difusión preferencial hacia afuera del contenedor en el caso de bolsas de plástico.
- . Las muestras se pueden coleccionar y concentrar al mismo tiempo por medio de absorción preferencial sobre sólidos absorbentes, absorción en solución, eliminación de componentes a temperaturas selectas, o alguna combinación de estas tres. Luego las muestras se retornan al laboratorio para

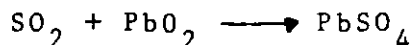
análisis. Aquí los problemas pueden ocurrir como consecuencia de concentrar contaminantes reactivos, lo cual aumenta su oportunidad de reacción antes del análisis.

- Finalmente, las concentraciones se pueden ^{o/c} determinar en forma continua al utilizar una propiedad física del gas que se está midiendo, o una propiedad física del producto de una reacción específica controlada del gas que se está midiendo.

La aplicación de estos planteamientos generales se considera enseguida para casos específicos.

QUIMIOABSORCION

El dióxido de azufre se ha medido durante más de cuarenta años en Inglaterra mediante el método de candela de peróxido de plomo, la cual es básicamente una técnica de quimioabsorción (ansorción con reacción química) que implica la reacción del peróxido de plomo con dióxido de azufre:



Otra adaptación de la técnica de quimioabsorción es el uso de cristales químicamente impregnados, los cuales sufren un cambio de color como resultado de la reacción con el compuesto que se está midiendo. Se encuentran disponibles comercialmente tubos que contienen reactivos específicos para un amplio rango de contaminantes.

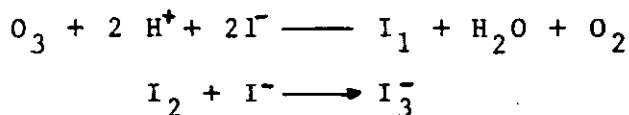
Métodos Químicos Húmedos

Los métodos no instrumentales que más comunmente se utilizan para los gases reactivos son aquellos que implican colección en solución con reacción, los cuales se denominan métodos químicos húmedos o métodos químicos manuales.

Cuando se trata de dióxido de azufre, los métodos húmedos que se usan con más frecuencia son los métodos de peróxido de hidrógeno y de West Gaeke.

Por lo general los métodos húmedos que se utilizan para óxidos de nitrógeno son modificaciones del método Griess-Saltzman; éste implica la recolección en una solución absorbente que contiene ácido sulfanílico y una naftalina, lo cual da una compleja tintura azo rosa con dióxido de nitrógeno - hidrolizado, NO_2 . Entonces el NO_2 se puede determinar mediante la técnica del espectrofotómetro como la tintura azo. El monóxido de nitrógeno, NO , se puede determinar al pasar una corriente paralela de aire a través de un tubo de oxidación que contiene óxido crómico como soporte para convertir el NO en NO_2 previo a la recolección y conversión a la tintura azo. Así la concentración de monóxido de nitrógeno se puede obtener por diferencia.

Los oxidantes totales se determinan en forma manual mediante el uso de yoduro de potasio amortiguado como medio de recolección. El aire, después de filtrarse, se pasa a través de una solución de yoduro de potasio neutral (KI) en un amortiguador de fosfatos, donde se efectúa la siguiente reacción de reducción:



El ion triyoduro (I_3^-) se mide, entonces de manera colorimétrica.

MÉTODOS DE MONITOREO

Los primeros instrumentos automáticos de monitoreo se adoptaron a partir de los métodos químicos húmedos ya descritos. Se colectó una muestra durante un período presente, se realizó una medición, y los reactivos en forma automática se

renovaron para la toma de otra muestra. Uno de los problemas principales con los métodos húmedos para funcionamiento automático es el problema inherente que se relaciona con el almacenamiento de grandes volúmenes de solución, la cual puede ser inestable o se puede evaporar y con ello ocasionar un cambio en la concentración y, por supuesto, se tiene que renovar con frecuencia.

Hasta la actualidad el éxito más grande con métodos de monitoreo continuo ha sido con instrumentación que mide alguna propiedad física del gas de interés, o una propiedad física de un producto de una reacción en fase gaseosa; además, también tiene ventaja adicional sobre los métodos húmedos en cuanto a sensibilidad, seguridad de funcionamiento y requerimientos de mano de obra bajos. Algunos de los instrumentos más comunes de uso casual se esbozan en las siguientes secciones.

Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un fuerte absorbente de la porción infrarroja (IR) del espectro y se hace uso de esta propiedad en los instrumentos IR no dispersivos (Fig. 4.3). Este instrumento consta de una fuente de calor infrarrojo, una celda para muestra a través de la cual se bombea la muestra y una celda de referencia que contiene un gas no absorbente. El detector es un recipiente de dos cámaras que están separadas por un diafragma sensible a la presión y contienen concentraciones iguales de monóxido de carbono. Todas las especies absorbentes de infrarrojo que estén dentro de la muestra de aire interferirán en cierta medida, en particular CO_2 hidrocarburos y agua. En concentraciones atmosféricas normales, el CO_2 y los hidrocarburos no son un problema y se pueden considerar en forma adecuada en el gas de la celda de referencia. El agua causa más problemas, pues es un fuerte absorbente de IR muy variable. A fin de petratar el aire que entra a un contenido de agua constante, o como opción para traslucir todas las bandas de absorción de monóxido de carbono

no que están sujetos a interferencia por agua, se emplea una solución.

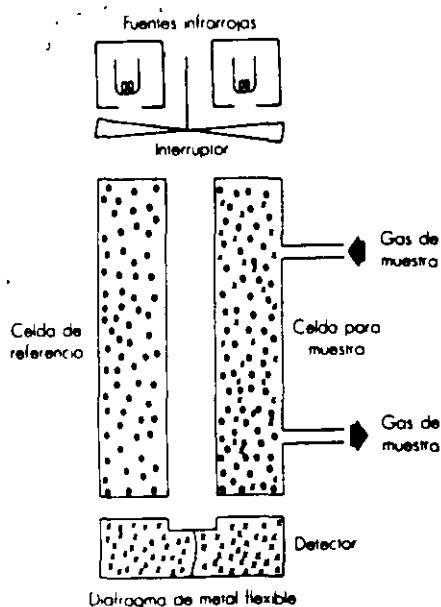


Figura . Analizador infrarrojo no dispersivo de gas para análisis de dióxido de carbono. (De Butler, J. D., *Air Pollution Chemistry*, Academic Press, 1979.)

DIOXIDO DE AZUFRE

Los compuestos de azufre, cuando se introducen en una flama rica en hidrógeno, se reducen y convierten en azufre diatómico, S_2 , el cual se excita en la flama caliente. El azufre diatómico excitado emite luz a una longitud de onda específica (375 nm) cuando retorna al estado basal. La longitud de onda es específica para el azufre y la intensidad de la emisión corresponde a la concentración de azufre. La sensibilidad es elevada y el SO_2 se puede cuantificar hacia abajo a un mínimo de 5 ppb con un tiempo de respuesta de dos a

tres segundos. El método no diferencia entre varios compuestos de azufre en el aire.

Otro método que está probando ser muy satisfactorio para dióxido de azufre consiste en excitar el SO_2 del aire de la muestra mediante el uso de una fuente ultravioleta de alta densidad filtrada para permitir el paso tan sólo de longitudes de onda entre 230 y 190 nm (Fig.).

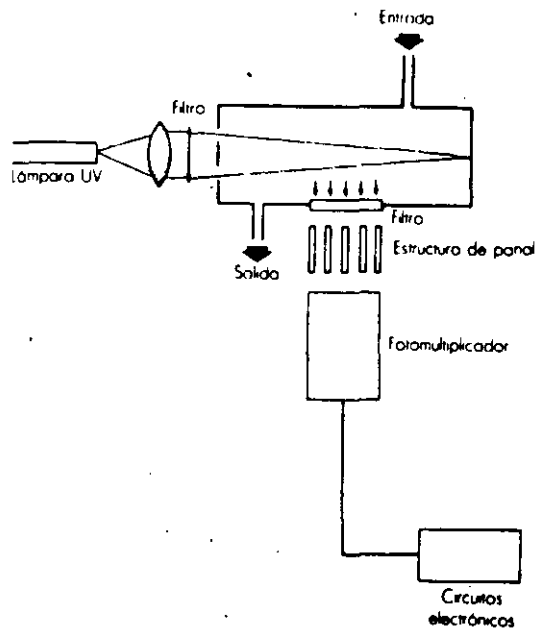


Figura . Analizador de fluorescencia de dióxido de azufre. (De Strauss, W., dir., *Air Pollution Control. Part III*, Wiley Interscience, 1979.)

Oxidos de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno reaccionan con el ozono (O_3) para formar un dióxido de nitrógeno excitado que emite luz al retornar al estado basal. Este fenómeno se denomina quimioluminiscencia porque la emisión se induce mediante una reacción química; al igual que los métodos de emisión de luz - previos, es específico para NO y muy sensible. Hasta 1 ppb hacia abajo (Fig. ...).

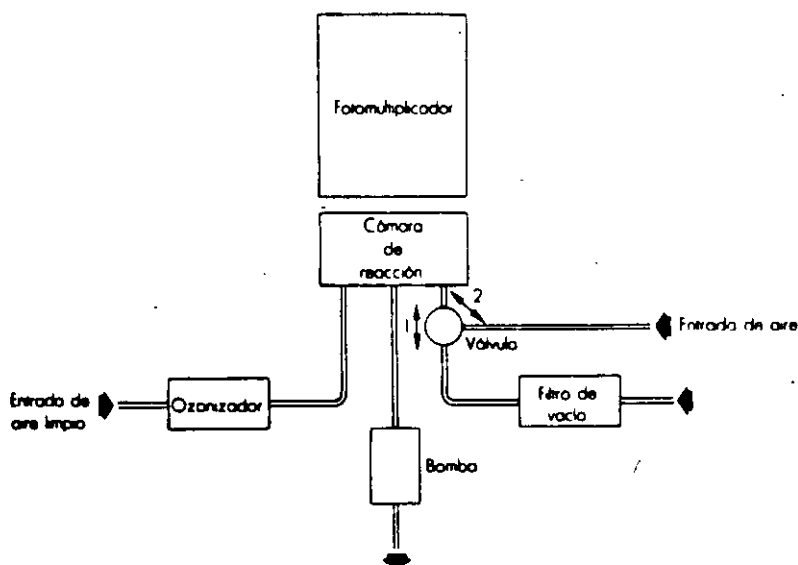


Figura 5. Analizador de quimioluminiscencia de monóxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno se mide mediante sustracción del valor de monóxido de nitrógeno a partir del valor total de óxidos de nitrógeno que se obtiene mediante una conversión preliminar de dióxido de nitrógeno en monóxido de nitrógeno. (De Strauss, W., dir., *Air Pollution Control. Part III*, Wiley Interscience, 1979.)

OZONO

El ozono también se monitorea mediante un método de quimioluminiscencia, y en este caso implica la reacción entre ozono y etileno, la cual resulta en una emisión a 435 nm. El límite inferior de detección para el ozono es 1 ppb, razonablemente bajo las concentraciones ambientales que por lo normal se encuentran de 10 a 70 ppb. No interfieren los óxidos de nitrógeno.

HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos se monitorean mediante el uso de un detector de ionización de flama (DIF) que consiste en una flama de aire/hidrógeno a través de la cual se pasa un potencial eléctrico. Cuando los hidrocarburos se pirolizan en la flama su conductividad se incrementa grandemente y pasa una corriente que es proporcional al número de átomos de carbono presentes. Los instrumentos comerciales, por lo general incluyen un medio de la medición separada de metano, monóxido de carbono e hidrocarburos totales.

CALIBRACION

Todos los métodos analíticos para determinar las concentraciones pequeñas deben calibrar contra estándares necesitan ser exactos

3.- CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AIRE

Por lo general los contaminantes del aire, aún en su fuente, se encuentran presentes a concentraciones muy bajas en los volúmenes grandes de un gas acarreador inerte. Después de su dispersión en la atmósfera los contaminantes del aire experimentan una dilución ulterior, de tal manera que su control es esencial antes de la emisión en la fuente o tan cerca de ésta como sea posible. Esto significa realizar el tratamiento en la planta más bien que en algún depósito central, como puede ocurrir con los desechos líquidos.

Un método para controlar la contaminación del aire que siempre se debería considerar, es cambiar el método de operación de la planta, o sustituir los materiales no elaborados que se utilizan durante el proceso, para eliminar o reducir la contaminación, por ejemplo; mediante la utilización de gas como combustible en lugar de carbón o destilado, o mediante la modificación del proceso de combustión para producir menos CO o NO. Una opción diferente en el cambio de combustible es la tentativa de purificar ese combustible para eliminar su constituyente precursor del contaminante antes de introducirlo a la caldera industrial. La desulfuración y la eliminación de ceniza del carbón es un ejemplo importante de esta propuesta, sobre todo porque el uso del carbón como una fuente de energía en el futuro se va a incrementar conforme declinen los aprovisionamientos de gas y productos líquidos del petróleo.

Si las medidas de control económicamente asequibles son insuficientes para reducir las concentraciones atmosféricas a niveles "seguros", entonces puede ser necesario detener la producción en su totalidad. En ciertas circunstancias, la carga adicional de la industria en áreas urbanas causa concentraciones de contaminantes que exceden los límites aceptables; en estas circunstancias, la reubicación puede ser la respuesta. Así, la electricidad, la cual alguna vez se generó en las ciudades principalmente, ahora se produce con más fre-

cuencia en estaciones de energía que se ubican cerca del su
ministro de combustible.

Así, el control de la contaminación del aire no es sólo un asunto del control técnico de los procesos que generan contaminantes del aire, sino que implica un patrón complejo de factores económicos, planificación urbana y controles legislativos.

Las fuentes de contaminación del aire producen mezclas gaseosas, partículas finas o ambas. La forma clásica de contaminación del aire es el humo, partículas finas de material carbonoso de combustión incompleta y la ceniza, las cuales con frecuencia proceden del equipo de combustión pobre y sobrecargado. En parte esto se puede, y generalmente de manera adecuada, controlar mediante un mejor diseño del equipo de combustión, ajuste cuidadoso de quemadores y prevención de condiciones de sobrecarga causadas, por ejemplo, por cambios repentinos en la demanda⁶. Otras posibilidades son cambiar de combustible o tipo de sistema de combustión.

⁶ En Zurich, Suiza, miles de calderas domésticas que funcionan con petróleo se han ajustado o modificado por orden a las autoridades municipales en su campaña para reducir la contaminación.

Control de Gases

Para que los gases se puedan controlar es necesario removerlos de su ambiente gaseoso ya sea hacia una superficie sólida o líquida, donde se retienen en forma preferencial, o donde reaccionan para sintetizar una especie no contaminante original. Los procesos que se utilizan son variaciones de los métodos que se emplean para coleccionar gases con concentración, es decir, absorción dentro de un líquido (fricción) y adsorción sobre una superficie sólida ya sea con o sin reacción.

Control de Partículas

La primera forma ampliamente reconocida de contaminación del aire fue el humo, partículas finas de carbono que se originan de la ignición incompleta de combustibles, y ceniza inorgánica que procede de la materia no combustible que se encuentra dentro del combustible. Aún las plumas muy espesas de humo pueden representar concentraciones relativamente bajas de 2 o 3 gm^3 , lo cual corresponde al orden de partes por millón por volumen para el rango de densidades que se encuentran en las emisiones. Los reglamentos para el aire limpio en la mayoría de los países requieren una reducción en la concentración de humo a 0.1 gm^3 o aún menos, del orden de partes por diez millones. En el caso del humo, tales concentraciones son aún perceptibles a simple vista.

En términos más generales, el control de partículas contaminantes del aire implica pasar la corriente de gas que contiene las partículas a través de una cámara y permitir que una fuerza actúe sobre las partículas para sacarlas de la corriente de gas. El método elegido depende de varios factores incluso naturaleza de la operación de la planta, si la emisión es cíclica o continua, y si es probable que varíe a diferentes horas del día. Esto es importante ya que algunos colectores de polvo son más adecuados para operación discontinua que otros y algunos colectores son inadecuados para su

uso con emisiones variables. También se requiere información acerca de la naturaleza de las partículas, sus dimensiones, forma, densidad, estado (si es líquido o sólido), composición química y conductividad eléctrica. Para finalizar es necesario conocer las propiedades del gas en el cual las partículas se encuentran suspendidas, en particular su temperatura y composición química. Por ejemplo, las emisiones de temperatura elevada pueden acarrear cantidades grandes de vapores condensables en fase de gas. Los más importantes de estos son agua y vapores ácidos (por ejemplo ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico); su presencia dicta la temperatura a la cual se debe operar el aparato de limpieza de gas y en algunos casos, la resistencia a la corrosión de los materiales con los cuales se fabrica.

Se debiera comprender que cuanto mayor sea la eficiencia de recolección, superior será el costo tanto del colector como de su operación. En general, esta relación es exponencial, el costo aumenta al doble para un incremento en eficiencia desde el 90% hasta el 99% y se cuadruplica para un incremento del 99.9% al 99.99%.

Los contaminantes residuales se liberan hacia la atmósfera, idealmente a niveles que se consideran inofensivos por completo. Esta liberación con frecuencia se realiza mediante dilución al utilizar chimeneas elevadas, las cuales emiten a los contaminantes hacia la atmósfera a una altitud suficiente para asegurar alguna dilución antes de que ocurra un contacto a nivel de la tierra. Los gases efluentes tienen cierta velocidad y, por lo general, son más calientes que la atmósfera. Esta energía cinética y la flotabilidad adicional elevan la emisión sobre la parte más alta de la chimenea, donde la turbulencia y la difusión la mezclan con la atmósfera. Esto diluye al efluente y disminuye la concentración máxima probable a nivel de tierra por medio de una cantidad que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la altura efectiva de la chimenea (donde la altura efectiva es la suma de la altura real, la velocidad de ascensión y la flotabilidad de ascenso de la pluma). La forma exacta que tomará la

pluma y con que efectividad se diluye antes de ponerse en contacto con la tierra es una función de la estabilidad de la atmósfera. En la Fig. . se muestran las plumas características que corresponden a las condiciones de las tasas de declinación que se observan comúnmente.

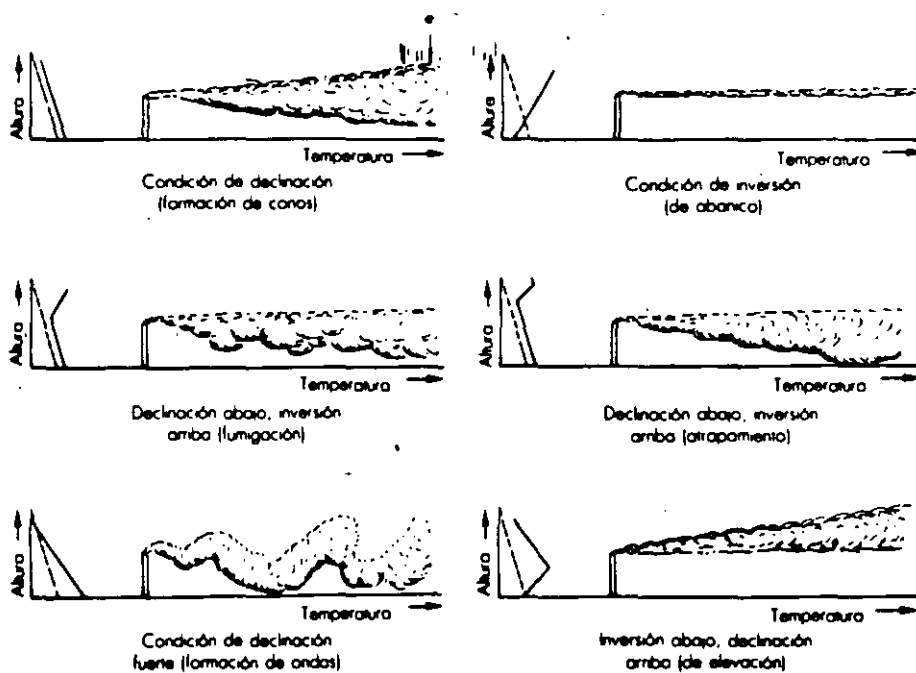


Figura . Tipos de plumas que se asocian con diferentes tasas de declinación. (De Strauss, W., *Air Pollution Control. Part I*, Wiley Interscience, 1971.)

Cuando el terreno no es uniforme, como rara vez sucede, interfieren otros factores. Respecto a las chimeneas, el factor más común es el incremento en difusión hacia abajo que ocurre sobre el lado de sotavento de los edificios. Esto puede afectar las capas de aire, hasta dos veces la altura del edificio (Fig. . . .).

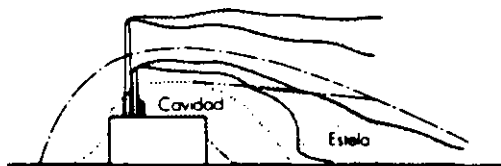


Figura Diagrama para mostrar el efecto de un edificio sobre contaminantes expulsados a diferentes alturas. (De Stern, A. C., Wohlers, H. C., Boubel, R. W. y Lowry, W. P., *Fundamentals of Air Pollution*, Academic Press, 1973.)

En consecuencia, las chimeneas cortas comunes sobre edificios comerciales y residenciales, las cuales son adecuadas para conseguir que se "arrastre" aire a través del fuego en la caldera o sitio de incineración, no son suficientes para proveer una dispersión buena de los gases de desecho. La regla para una dispersión buena es construir la chimenea al menos dos y media veces la altura de los edificios adjuntos o vecinos.



**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

NOCIONES GENERALES

(ANEXO)

ING. MARTINIANO AGUILAR R.

A fines del Siglo XVIII y como consecuencia del desarrollo de la fabricación de la máquina ^{de vapor} de vapor apareció por primera vez la caldera de vapor realizada en la forma de un tambor calentado por el exterior, en donde se hervía el agua y el vapor se recogía en la parte superior y se conducía a la máquina de fuerza. En la Fig. 16 se esquematiza parte del desarrollo de las calderas.

En un principio la evolución fue lenta debido en especial a las dificultades para la obtención de los materiales necesarios como placas y tubos, además de que no se tenía una política económica energética para emplear vapor de presiones y temperaturas elevadas con lo cual se pueden obtener mayores eficiencias en la conversión de energía.

La primera etapa marcada en la evolución de la caldera apareció como una derivación directa de la caldera de tambor calentado, siendo una variedad de calderas mayores con la categoría de volumen grande de agua; este nuevo diseño trajo consigo el contenido en el interior del tambor, del hogar y ^{ductos} ductos convectivos para los gases de combustión en la forma de tubos en el interior del tambor y ^{ductos} ductos convectivos exteriores al tambor. Estas nuevas calderas permitieron la obtención de mayores flujos de vapor y la obtención de un rendimiento más elevado del combustible, además de una ventaja sobre las primeras calderas consistente en una inercia térmica mayor con la cual se tenía una mayor flexibilidad en la operación para las variaciones aceleradas de carga sin regulación continua de los fuegos y además de menor sensi-

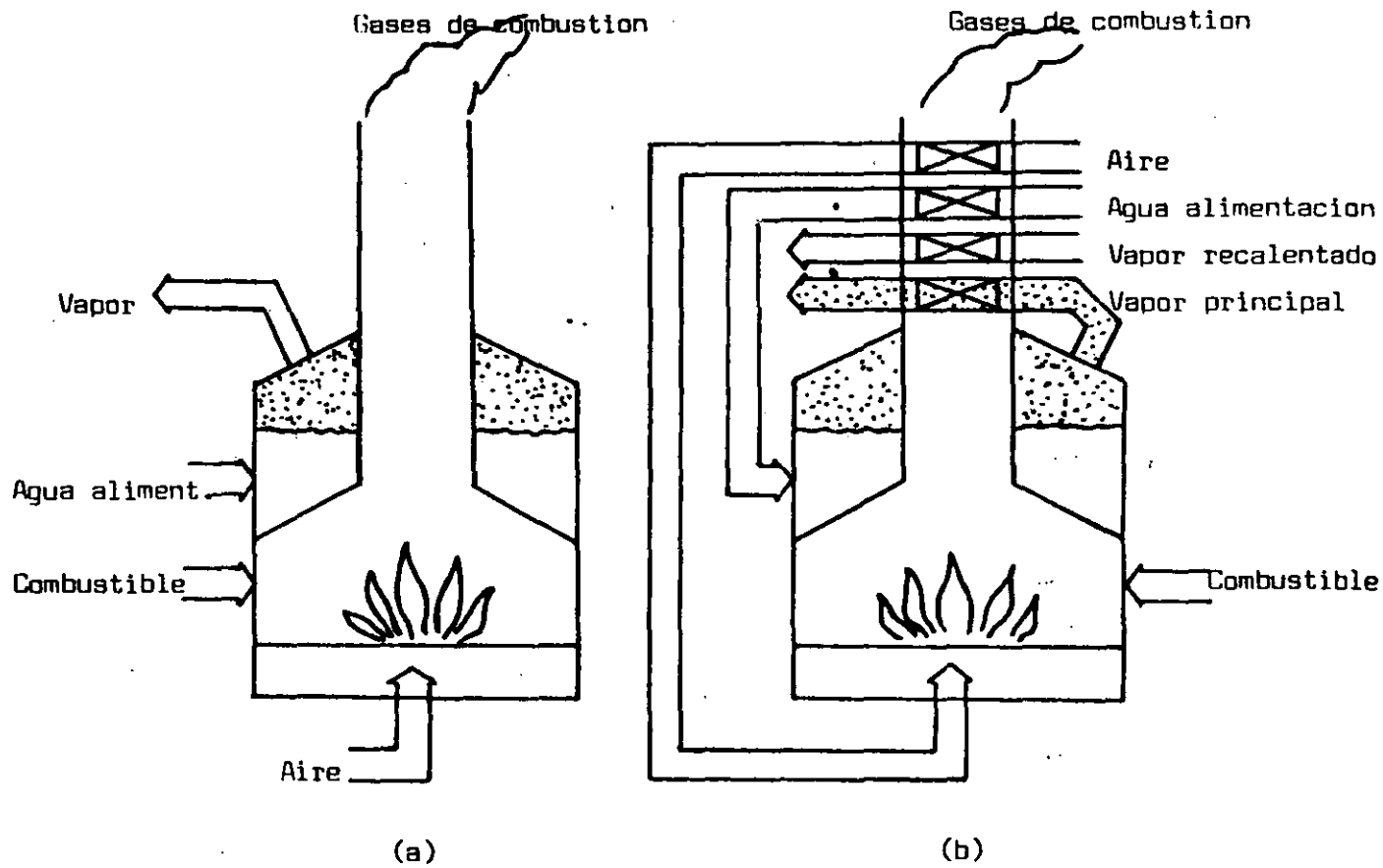


FIG. 16.- ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LAS CALDERAS

bilidad a la calidad del agua de alimentación.

El gran esfuerzo energético del Siglo XX puso a los fabricantes de calderas en el problema de proveer éstas para producir vapor a mayor presión y temperatura, así como mayores flujos por unidades de calderas; estando las calderas anteriores limitadas por la fabricación de tambores de grandes dimensiones, aparece el nuevo principio de fabricación de calderas consistente en la circulación del agua por el interior de los tubos. En estas calderas los gases de combustión fluyen por el exterior de manojos de tubos y el tambor solo tiene el papel de mantener una reserva de agua necesaria para circulación interior y para la separación del vapor de la emulsión que se realiza en los tubos. Debido a que los tubos son de diámetro pequeño permiten el funcionamiento de las calderas a presiones elevadas, y la instalación, no estando limitada por espacio, se pueden tener superficies más grandes de cambio de calor con lo cual se aumenta el flujo de las calderas. En este diseño todo tiene lugar en los tubos, desde la obtención del vapor y el sobrecalentamiento de éste con lo cual se tiene la posibilidad de suministrar vapor a alta temperatura.

El mayor desarrollo energético que requiere unidades

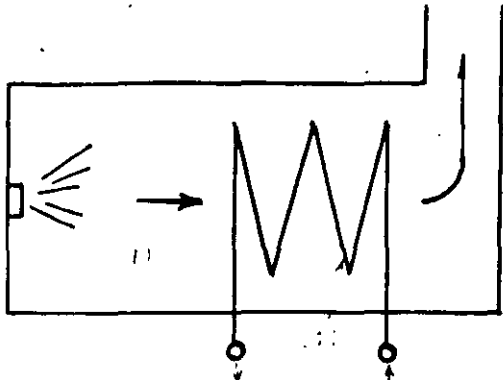
más grandes con parámetros más altos de vapor hacen que se perfeccione la caldera para incrementar el proceso de trabajo, apareciendo la intensificación del proceso de combustión en el hogar y la utilización de hogares estancos para realizar la combustión bajo presión, que permite también aumentar la superficie de cambio de calor por radiación que aumenta la eficiencia por elevar la temperatura en las superficies convectivas. En esta etapa aparece también la intensificación de la circulación interna del agua y de la emulsión con la circulación forzada en lugar de la circulación natural. En este tiempo aumenta la economía agregada a la caldera con lo que se obtiene rendimientos de más de 85% con la utilización de mayores superficies, denominadas recuperadores de calor, como el precalentador de aire y el economizador de agua.

Al mismo tiempo de los progresos anteriores se obtiene también un progreso importante consistente en el paso de la operación manual, que es posible en calderas con inercia térmica grande, a la operación automática total de las calderas modernas que tienen una inercia térmica reducida; la automatización ha contribuido notablemente al aumento del rendimiento de operación.

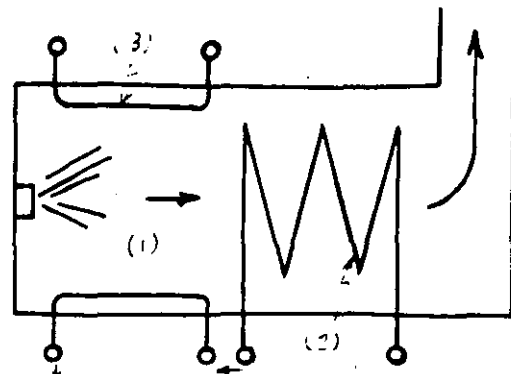
5.- ESQUEMAS GENERALES DE CALDERAS

Desde el punto de vista de fabricación, las calderas tienen diferentes esquemas de principio: las calderas para producir agua caliente tienen una fabricación específica para calentamiento de agua, mientras que las calderas para producir vapor tienen un esquema más complicado en función de los parámetros del vapor producido, sin embargo ciertos elementos son comunes a todas las calderas como el espacio para la combustión del combustible denominado hogar, dispositivos para la combustión, conductos para la circulación de los gases de combustión y la superficie utilizada para la absorción del calor.

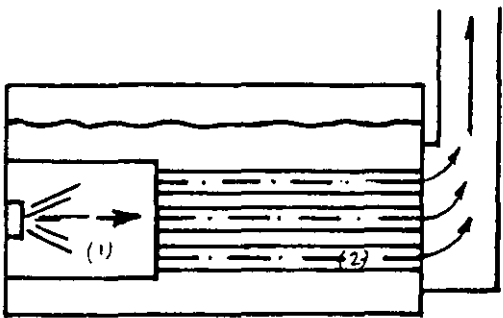
Las calderas para producir vapor saturado pueden tener diferente principio de realización tal como se muestra en la figura 17. c; la caldera más simple está compuesta por el hogar (1) en que tiene lugar el proceso de combustión y tubos de circulación de los gases de combustión que constituyen el ducto convectivo (2). Se observa que el hogar y los tubos convectivos están en contacto con el agua que se vaporizará por el hecho de estar contenida dentro de un recipiente común que tiene agua y que se denomina tambor o domo. Este tipo de calderas se conoce como de gran volumen de agua debido a que requiere un tambor de



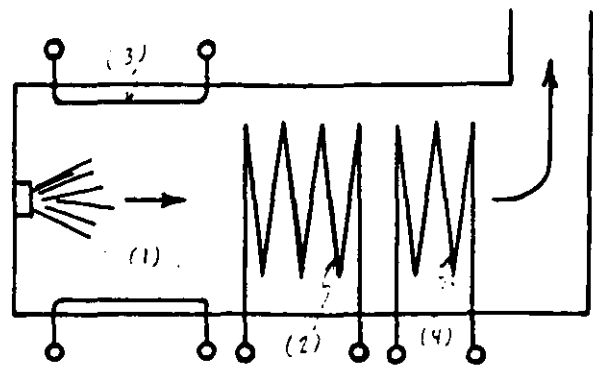
a) Vapor saturada con superficie de convección



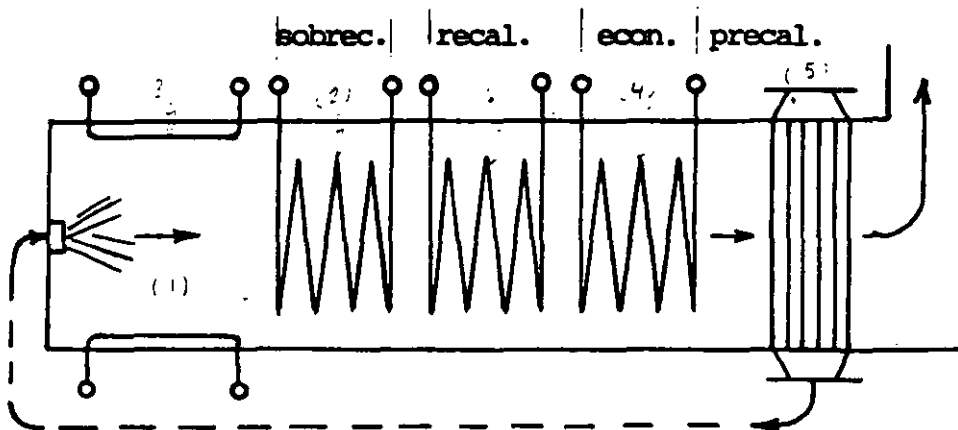
b) Vapor saturada con superficie de radiación en el hogar y superficie de convección.



c) Vapor saturada de gran volumen de agua (tubos de humo)



d) Vapor saturada con economizador



e) Vapor sobrecalentado y recalentado, con economizador y precalentador de aire.

FIG. 17.-ESQUEMAS GENERALES DE CALDERAS

~~gran volumen de agua para contener el hogar y el sistema convectivo.~~

Otro sistema de caldera para producir vapor saturado se muestra en las figuras 17-a y 17-b en donde puede observarse el hogar (1) que puede estar provisto de pantallas de radiación (3) y los gases de combustión fluyen a través de manojos de tubos convectivos (2) formados por tubos en cuyo interior circula el agua que se vaporizará.

Con objeto de alimentar el sistema hervidor con agua de alimentación más caliente se puede emplear el calor de los gases de combustión a la salida de la caldera para precalentar el agua por medio de un aparato llamado economizador (4) tal como se muestra en la figura 17-d.

Otros tipos de calderas se proveen con ciertas superficies auxiliares de cambio de calor llamados precalentador de aire (5) y economizador (4) tal como se muestra en la figura 17-e; el precalentador de aire tiene el papel de producir aire caliente para mejorar el proceso de combustión y la temperatura de los gases en el trayecto de la caldera, reduciendo también la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea, considerándose en consecuencia como una superficie auxiliar de recuperación de calor.

Debe mencionarse que algunos tipos de calderas modernas no pueden funcionar sin precalentador de aire como por ejemplo las calderas de carbón con evacuación líquida de escoria y existen calderas que no pueden funcionar sin precalentador de agua o economizador debido al régimen de sales y a las sollicitaciones térmicas en el domo.

En las calderas para producir vapor sobrecalentado se requiere una superficie suplementaria de cambio de calor llamado sobrecalentador situado en el trayecto de los gases constituyendo una superficie convectiva, tal como se muestran en la figura 1e, en donde también se muestra otra superficie suplementaria para recalentar el vapor después de que éste ha trabajado dentro de la turbina.

De acuerdo con el esquema presentado la instalación de la caldera comprende una serie de sistemas: para alimentación del agua, alimentación de combustible (quemadores y manejo de combustible), alimentación de aire (inyección de aire y precalentador externo), evacuación de los gases de combustión (chimenea y ventilador), evacuación de escoria y cenizas, etc. Asimismo, como componente de las calderas puede considerarse la instalación de automatización para optimizar el funcionamiento y la instalación automática de protección para prevenir el peligro de averías.

6.- TIPOS DE CALDERAS

Existen numerosas formas de clasificación de las calderas, algunas de las cuales se indican a continuación :

- por el fluido que circula en el interior de los tubos :

tubos de humo (horizontales, verticales)

tubos de agua (rectos, curvos)

- por la forma de circulación del agua, en :

circulación natural

circulación forzada

- por la presión de los gases en el hogar, en :

hogar presurizado

tiro balanceado

- por el volumen de agua relativo :

gran volumen

pequeño volumen

- por la colocación del hogar :

externo

interno

- otras clasificaciones incluyen :

estacionarias

portátiles

marinas

paso de gases sencillo

paso de gases con retorno

paso de gases múltiple

domo sencillo

domos múltiples

etc.

De acuerdo con lo anterior, se tiene una variedad grande de tipos constructivos de calderas, la descripción de cada uno de los tipos es bastante extensa por lo que a continuación solo se resumirá la descripción de algunos tipos representativos con lo que se ilustrarán ciertos conceptos constructivos válidos para las demás clases de calderas.

Desde el punto de vista funcional las calderas se destinan, de acuerdo con su finalidad, en calderas pequeñas de calentamiento que suministran agua caliente, agua hirviendo o vapor de baja presión, en calderas para centrales térmicas mayores que suministran como agente térmico agua hirviendo, vapor de baja y media presión en estado saturado o con pequeño sobrecalentamiento y, en calderas para centrales térmicas mayores o plantas termoeléctricas que suministran vapor de presión elevada, normalmente

con bastante sobrecalentamiento, y finalmente calderas para propósitos específicos como móviles, navales, de recuperación, etc.

Desde el punto de vista constructivo, las calderas se pueden clasificar en dos grandes categorías.

Calderas con gran volumen de agua en que el agua está comprendida dentro de un tambor de dimensiones grandes cuyo interior está calentado en su superficie por los gases de combustión y calderas de pequeño volumen de agua en que el agua circula en el interior de un sistema de tubos que recogen el calor de los gases de combustión que circulan en el exterior de los tubos, estando la zona de gases delimitada por muros de tubos o paredes de membrana.

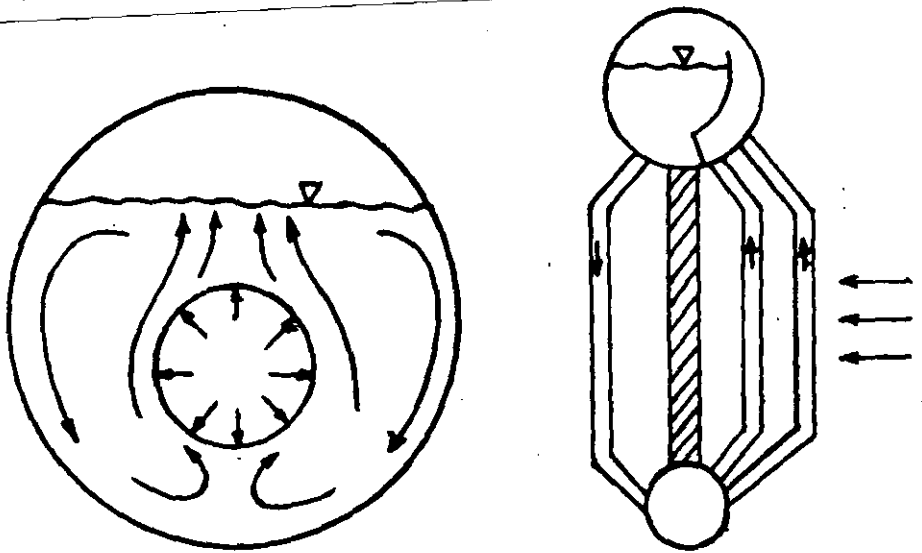
Otro factor importante que determina la solución constructiva de calderas es el modo en que se asegura la circulación de agua y emulsión en el interior del sistema hervidor. Las calderas llamadas clásicas o de circulación natural se basan en la realización dentro de un circuito de diferentes presiones estáticas entre dos columnas con contenido diferente de vapor en emulsión. En la otra categoría de calderas llamada de circulación forzada, la circulación del agua se asegura con una bomba especial colocada en el circuito de agua; si la bomba se coloca a la entrada del agua por el economizador, hervidores y sobrecalentador se puede eliminar el domo de agua y la cal-

dera se denomina de un paso, circulación forzada o de circulación única, pero si la bomba tiene solo el papel de activar la circulación por el sistema hervidor, entonces la caldera se denomina de circulación controlada.

En las calderas de circulación natural, la circulación en el interior se asegura por el movimiento natural del agua en el proceso de calentamiento; en la Fig. -18 se muestra la producción de la circulación natural dentro de un espacio grande (a) y dentro de un sistema de tubos (b). El contacto con la superficie calentada del flujo térmico genera una circulación ascendente y el circuito se cierra por la circulación descendente en la superficie sin calentamiento.

CALDERAS DE GRAN VOLUMEN DE AGUA.

El elemento constructivo de las calderas con volumen grande de agua es un tambor de gran diámetro (de 1 400 a 2 500 mm) en cuyo interior se haya la superficie de cambio de calor. En la Fig. -19 se muestra el esquema de este tipo de construcción en donde se observa un espacio tubular de la flama (1) que tiene el papel del hogar y los tubos de humo (2) que tienen el papel de parte convectiva. En el cuerpo de la caldera se haya el tubo para la flama central que constituye el domo de gases y dos mano



a. Gran volúmen de agua

b. Pequeño volúmen de agua
(tubos de agua)

FIG. 18 CIRCULACION NATURAL

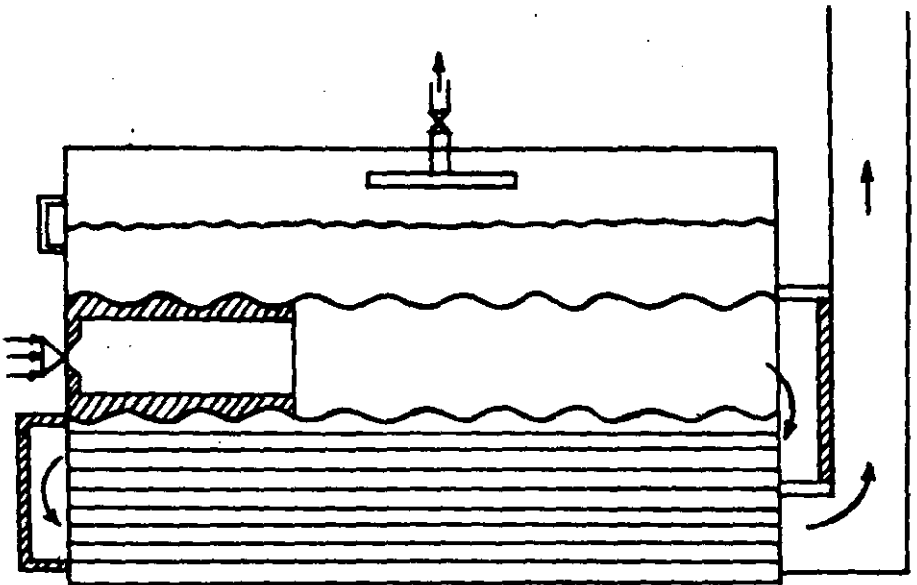


FIG. 19 ESQUEMA DE CALDERA DE GRAN VOLUMEN DE AGUA CON TRES PASOS DE GASES

jos de tubos en donde circulan los gases de combustión por los espacios de la caldera que parten del frente hacia la salida; el regreso de los gases de un paso a otro se hace por cajas de regreso construidas con placas forradas de material refractario. Las calderas con superficie convectiva desarrollada tienen un buen índice de funcionamiento; en la Tabla 1. se muestran ciertos datos para fabricación de calderas que son adecuadas para el quemado de combustible líquido y gaseoso.

La alimentación de agua a la caldera se hace usualmente en un compartimiento frente al tambor en tal forma de evitar la deposición de material extraño en el lugar en donde se encuentran los tubos de humo, zona más difícil de limpiar durante las revisiones.

Las calderas con volumen grande de agua tienen una serie de características comunes como resultado de la solución constructiva; la característica más importante es el gran volumen de agua en estado de saturación dentro del interior del tambor que le da a este tipo de calderas una inercia térmica grande, es decir, una capacidad grande de calor acumulado. Como consecuencia de esta inercia térmica grande, aparece la ventaja de tomar fluctuaciones de carga con pequeñas variaciones en la presión de vapor.

CARACTERISTICAS	CAPACIDAD	
	2 t/h	4 t/h
Flujo nominal de vapor, en kg/s	0.555	1.111
Presión de vapor, en bar	8	15
Diámetro del tambor, en mm	1800	2000
Diámetro del tubo del hogar, en mm	800/700	800/700
Diám. de tubos convectivos en mm	51/3	60/3
Número de tubos convectivos	87	125
Longitud de tubos en mm	3660	4600
Eficiencia de la caldera, en %	88-90	88

TABLA. 1 - DATOS DE CALDERA DE GRAN VOLUMEN DE AGUA

CARACTERISTICAS	CAPACIDAD	
	10 t/h	
Flujo de vapor, en kg/s	2.78	
Presión nominal, en bar	16	
Temperatura de vapor, en ok	623	
Sup.de calentamiento total, del sist.herridor, m ²	138-150	
Flujo específico de vapor, en kg/m ² .s	1.9x10 ⁻² - 2.1x10 ⁻²	
Diámetro de Domo, en mm	800-900	
Número de domos	2	
Diámetro de tubos herridores, en mm	51	
Masa de agua por m ² de sup.de calentamiento, kg/m ²	11.5 - 12.5	
Peso de la caldera por flujo de vapor producido en kg/kg/s.	10750 - 11200	

TABLA. 2 - DATOS DE CALDERA DE TUBOS INCLINADOS (DE AGUA)

El volumen grande de agua en las calderas trae también la desventaja de un tiempo largo de arranque y un intervalo mayor de tiempo para el cambio de régimen de funcionamiento (por ejemplo el paso de carga mínima a la carga nominal puede requerir 30').

La solución constructiva en tipo paquete tiene la ventaja de eliminar el trabajo de montaje en el campo, pero tiene la desventaja del transporte difícil de la fábrica al sitio, debido a los gálibos de las vías de comunicación.

Debido a que todos los elementos de la caldera se hayan en el interior del tambor, éste requiere de dimensiones muy grandes, lo que acarrea como consecuencia un consumo mayor de metal e impone limitaciones en el flujo y presión de trabajo al dominio de cargas pequeñas, por encima de 1.6 kg/s (excepcionalmente 4 kg/s) y presiones mayores de 15 kg/cm² las soluciones con este tipo de calderas no son económicas.

El ensamble rígido en el tambor de la cámara de combustión-tubos de humo, elementos que tienen dilataciones diferentes durante el funcionamiento debido a diferentes temperaturas de trabajo, trae, como consecuencia, la aparición durante el funcionamiento y especialmente en las variaciones de carga, así como en el arranque de sollicitaciones mecánicas que a veces destruyen la estanqueidad. La eliminación de

este inconveniente se efectúa en parte con la utilización de cámara de combustión tipo elástico (tubo ondulado), y por la rigidación suplementaria de los tubos de humo en placas para tubo empotradas, o bien en arreglos como el mostrado en la Fig.20. En relación con el proceso interno de la caldera cabe señalar que la circulación natural es relativamente débil, por la altura activa de columna de agua y emulsión pequeña. La activación de la circulación se hace, cuando es posible, colocando la cámara de combustión excéntrica en el tambor, en cuyo caso, debido a un contenido mayor de vapor en la parte de columna con es pesor más bajo, se produce mejor circulación dirigida.

Las calderas con volumen grande de agua que tienen -- cantidades grandes de agua referidas a la producción de vapor (15 000 a 18 000 kg/kg/s) son poco sensibles a la calidad de agua de alimentación a la caldera debido a que la concentración de sales en la zona de -- emulsión es relativamente pequeña.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas del ti po de caldera analizado se puede perfilar con precisión en dominio de utilización, que en general es adecuado para capacidades reducidas, eventualmente con fluctuaciones pequeñas pero rápidas de carga; su sen sibilidad reducida a la calidad de agua de alimentación y la simplicidad de operación, son sus ven tajas

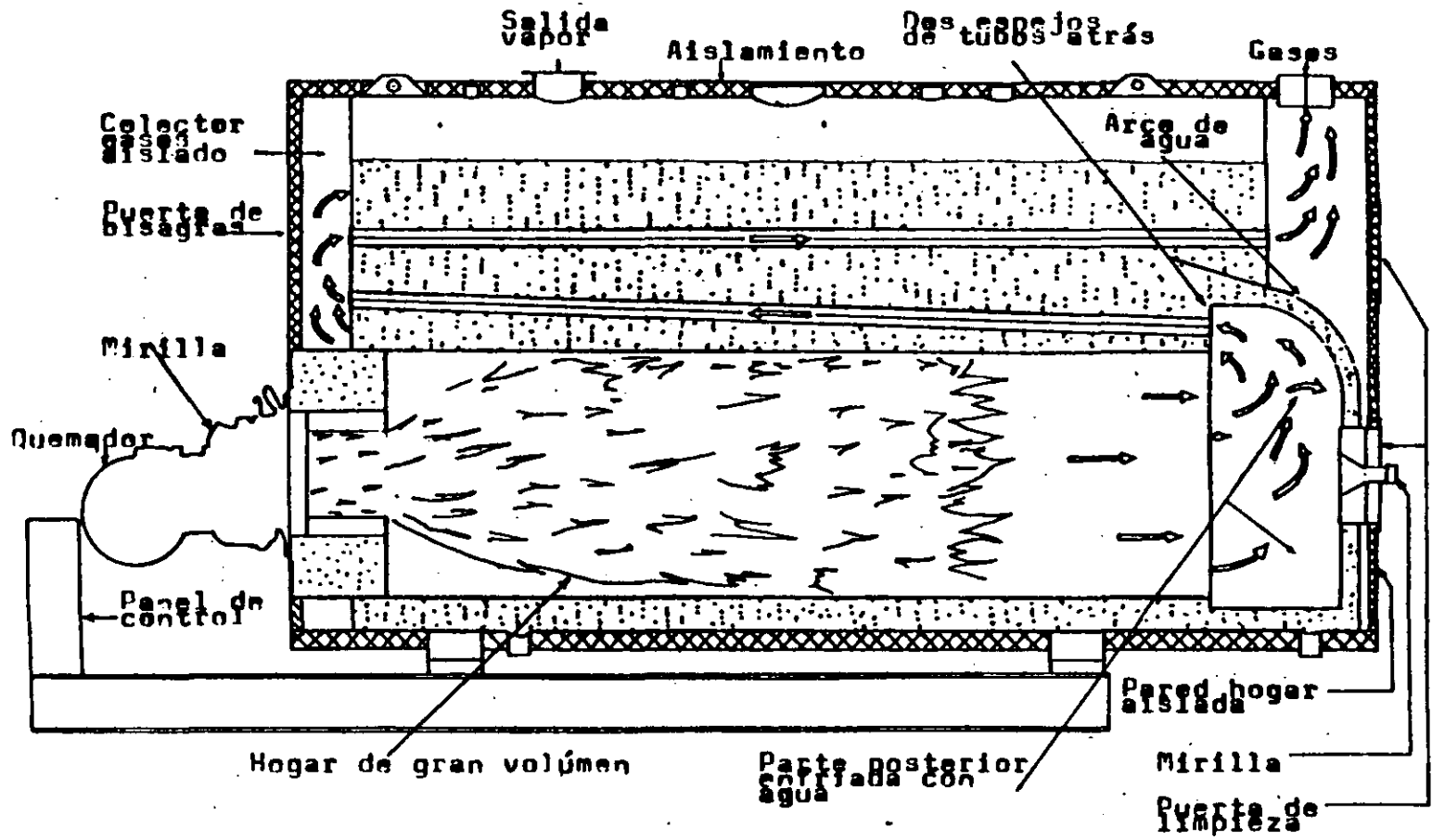
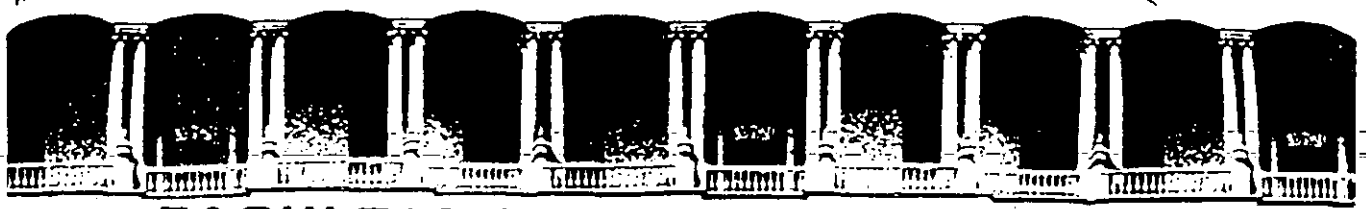


FIG. 2Q - FORMA DE PROPORCIONAR ELASTICIDAD A LA CAMARA DE COMBUSTION



**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.

OPERACION Y MANTENIMIENTO

27 al 31 de enero de 1992.

XI.- TRATAMIENTO QUIMICO Y MUESTREOS

PALACIO DE MINERIA

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:

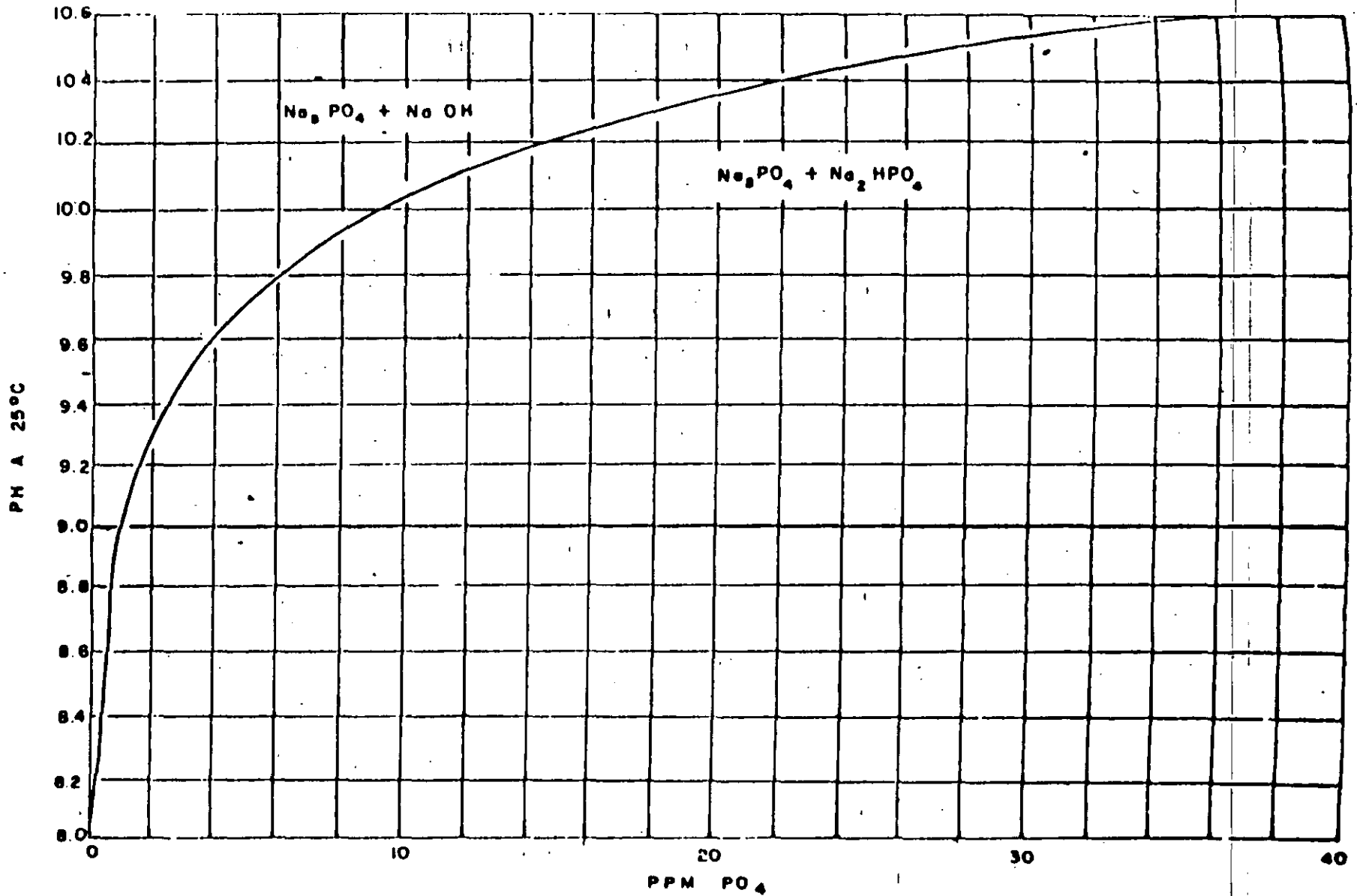
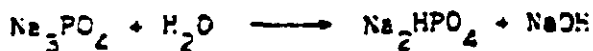


FIG. No. II - 1

CURVA PARA EL CONTROL COORDINADO DE FOSFATOS - PH, NIVEL BAJO PARA USO EN CALDERAS DE ALTA PRESION



c).- Control Congruente: La corrosión cáustica 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 690°F y de 2.85 a 572°F. Se prefiere mantener la relación Na a PO_4 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/PO₄ se muestra en la siguiente tabla.

No.	RAZÓN DE MEZCLA		FACTOR MOLAR Na/PO ₄
	Na ₃ PO ₄	Na ₂ 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 PH- PO_4 Na/ PO_4 . En ella se tienen los valores de P.H. en función de la concentración de fosfato para diferentes relaciones molares de Na/ PO_4 .

Este tipo de control es utilizado en calderas que operan a presiones superiores a 1500 psig. (102. $\frac{1}{2}$ cent).

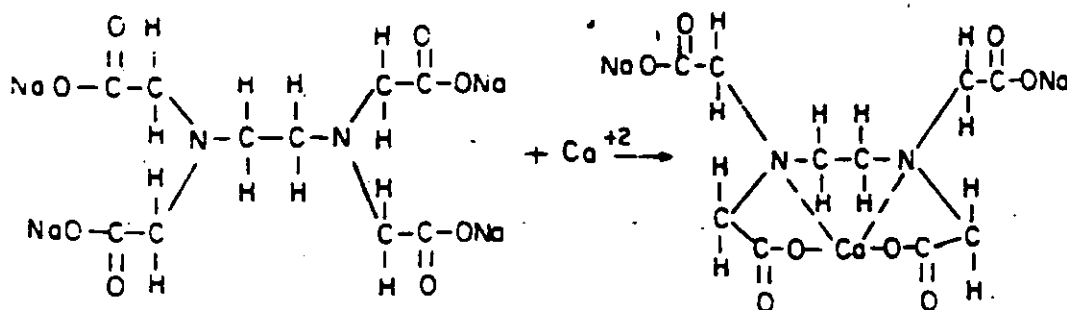
2.- Tratamiento Volátil: Es el control de P.H. del agua de caldera mediante productos volátiles tales como la hidrazina, amoniaco, morfolina y ciclohexilamina).

Este tipo de tratamientos son recomendados para calderas que operan a presiones hasta de 2400 ¹⁷⁰ 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

CONTROL CONGRUENTE

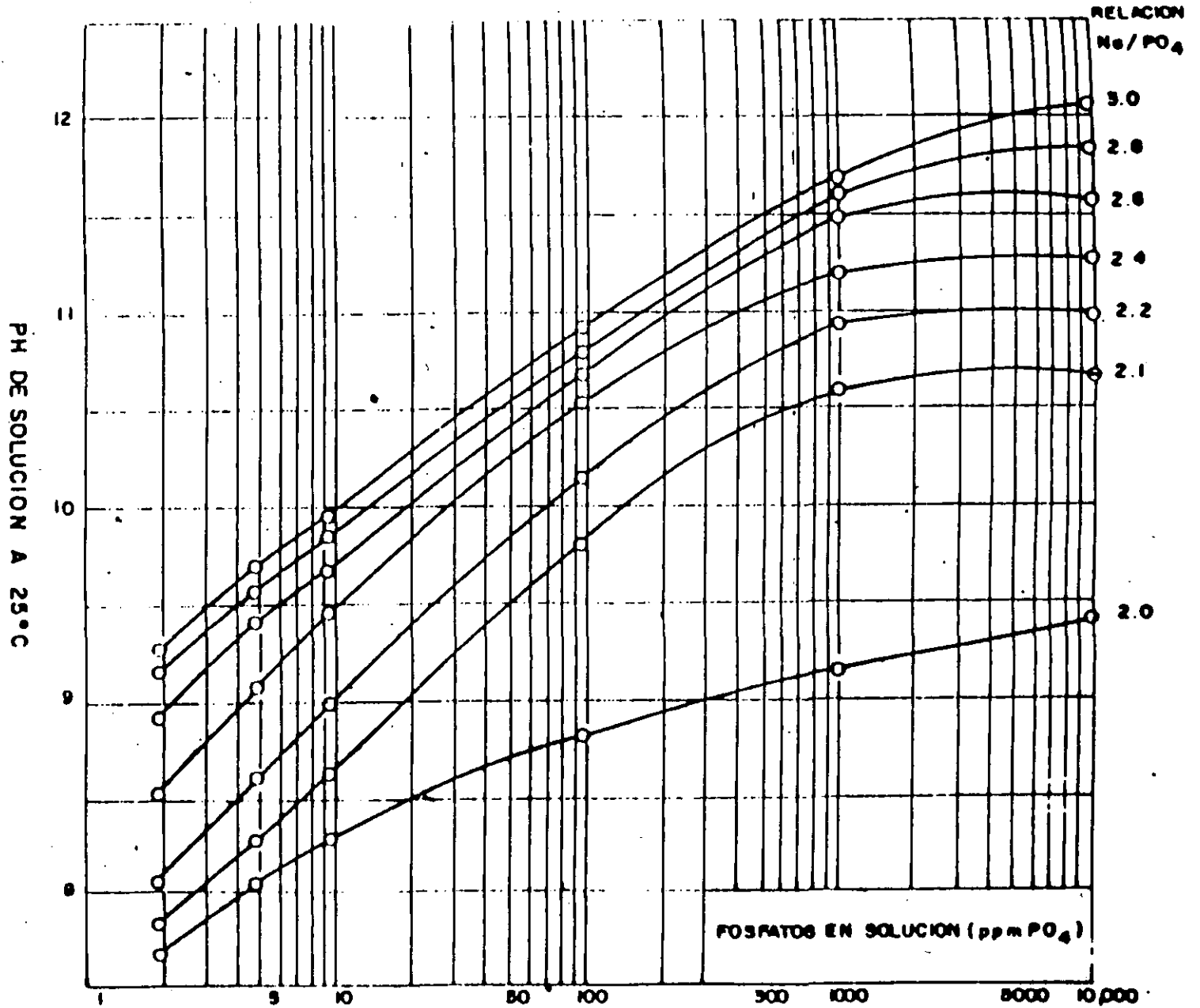
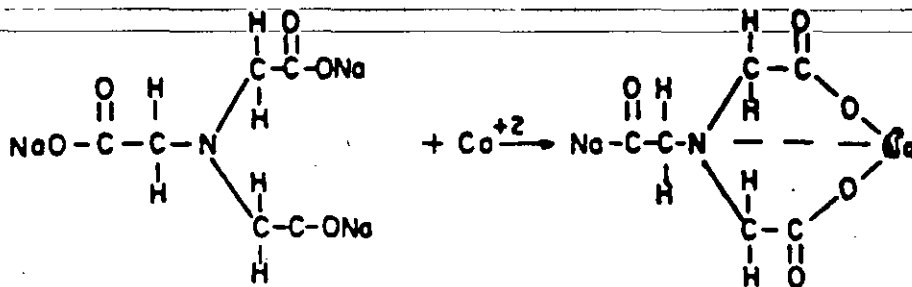


FIG. II-3



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.

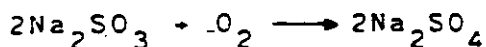
B).- TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA DE ALIMENTACION.

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-

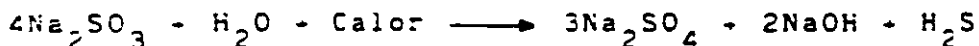
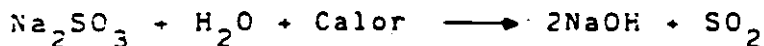
reacción mecánica se aplica no únicamente al agua de re-
puesto, sino a toda el agua de alimentación. Bajo con-
diciones óptimas es posible reducir el oxígeno disuelto
en el agua hasta concentraciones tan bajas como 0.007
ppm.

El remanente de oxígeno después de esta deaeración
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:



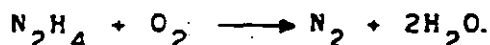
Actualmente es utilizado en plantas con baja y moderada
presión, siendo prohibitivo su uso en calderas de alta
presión debido a una potencial descomposición térmica
como sigue:



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.-PO₄~~
el uso de sulfito de sodio no es deseable ya que la introducción de iones sodio altera el balance entre Na y PO₄.

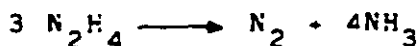
- 2.- HIDRAZINA.- Para calderas de alta presión se emplea como agente reductor la hidrazina (N₂ H₄). Reacciona con el oxígeno disuelto del agua de acuerdo a la siguiente reacción:



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 N₂H₄.

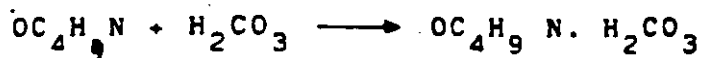
Entre 231 y 518°F la hidrazina aumenta su volatilización con lo cual protegerá el sistema post caldera al elevar el P.H. y pasivar las superficies del metal. a 518°F y arriba de esta temperatura la hidrazina se descompone conforme a la siguiente reacción:



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 fílmicas, por ser muy delgada ^{no} 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

TIPO DE ANALISIS Y FRECUENCIA DE MEDICION

No.	PUNTO DE MUESTREO	TIPO DE ANALISIS Y FRECUENCIA DE MEDICION											
		P.H.	CONDUCTIV.	O ₂	SiO ₂	Fe	Cu	PO ₄	F	M	Cl	N ₂	NH ₃
1	DESCARGAS BOMBAS DE CONDENSADO	⊗	⊗	△	○		⊗				○		○
2	DEAREACION	ENTRADA	△	△	⊗								
		SALIDA	⊗	⊗	⊗								○
3	SALIDA DE CALENTADORES	⊗	⊗			⊗	⊗						
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

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.

CLASIFICACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACION A CALDERAS Y AGUA DE CALDERAS (TODOS LOS VALORES MEDIDOS A LA ENTRADA DEL ECONOMIZADOR EXCEPTO EL OXIGENO DISUELTO QUE SE MIDE A LA SALIDA DEL DEAREADOR)

CLASIFICACION	TIPO DE CALDERA	CALDERA CILINDRICA		CALDERA DE TUBOS DE AGUA														
	PRECION (kg/cm ² g)	-		< 10		10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	100 ~ 125	125 ~ 150	> 150					
	RELACION DE EVAPORACION POR SUPERFICIE DE CALENTAMIENTO	< 30	> 30	< 50	> 50				-	-	-	-	-					
AGUA DE ALIMENTACION	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 ₃)	< 60	< 40	< 40	< 2	< 2	0	0	0	0	0	0	0					
	OXIGENO DISUELTO (con O ₂)	LO MAS BAJO (11)		POSIBLE		< 0.5	< 0.1	< 0.03	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007					
	FECHO TOTAL (ppm Fe) (12)	-	-	-	-	-	-	-	< 0.05	< 0.03	< 0.03	< 0.02	< 0.02 (10.001)					
	CADENA TOTAL (ppm Cu)	-	-	-	-	-	-	-	LO MAS BAJO POSIBLE	< 0.02	< 0.02	< 0.01	< 0.005 (10.003)					
	MICROAMONIA (ppm N ₂ H ₄) (13)	-	-	-	-	-	-	0.01 ~ 0.05	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.03	0.01 ~ 0.03	0.01	0.01					
	SILICE (ppm SiO ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0.02					
	ACEITE (ppm) (14)	-	-	-	-	LO MAS CERCANO A CERO	-	-	-	-	-	-	-					
	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (15) a 25°C (mmhos/cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	< 0.3	< 0.3				
AGUA DE CALDERA	TIPO DE TRATAMIENTO	TRATAMIENTO CAUSTICO		TRATAMIENTO CAUSTICO				TRATAMIENTO CAUSTICO	TRATAMIENTO BAJO pH	TRATAMIENTO CAUSTICO	TRATAMIENTO BAJO pH	TRATAMIENTO CAUSTICO	TRATAMIENTO BAJO pH	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	10.5 ~ 11.0	10.0 ~ 10.5	10.5 ~ 11.0	9.5 ~ 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
	ALCALINIDAD "M" (ppm CaCO ₃) (16)	500 ~ 1000	500 ~ 800	500 ~ 1000	500 ~ 800	< 600	< 150	< 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ALCALINIDAD "D" (ppm CaCO ₃) (16)	500 ~ 800	500 ~ 600	500 ~ 800	500 ~ 600	< 400	< 120	< 70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SOLIDOS TOTALES (ppm CaCO ₃) (17)	< 4000	< 3000	< 3000	< 2500	< 2000	< 700	< 500	< 400	-	< 300	< 100	< 50	2	< 70	< 2	-	< 2
	CLORUROS (ppm)	< 800	< 500	< 500	< 400	< 300	< 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	FOSFATOS (ppm PO ₄ ³⁻)	20 ~ 40	20 ~ 40	20 ~ 40	20 ~ 40	20 ~ 40	20 ~ 40	10 ~ 20	5 ~ 15	3 ~ 10	3 ~ 10	3 ~ 10	0.5 ~ 5	-	0.3 ~ 3	-	-	-
	SULFIDOS (ppm SO ₄ ²⁻)	-	-	-	10 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 20	10 ~ 20	5 ~ 10	1 ~ 3	0.5 ~ 2.0	-	-	-	-	-	-	-
SILICE (ppm SiO ₂)	-	-	-	-	-	< 50	< 40	< 10	-	< 5	< 2	< 0.5	0.5	< 0.2	< 0.2	< 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

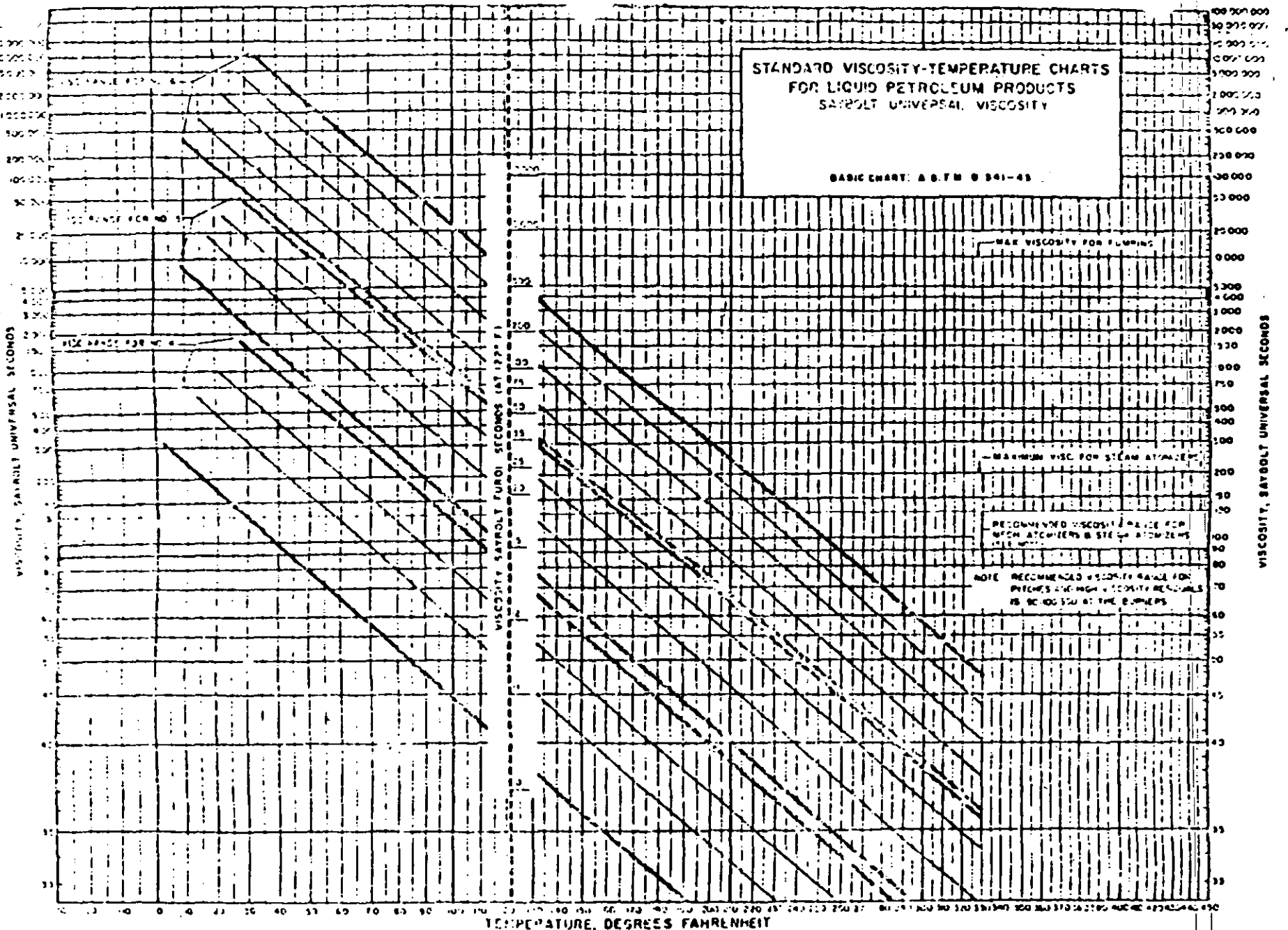
Q U E M A D O R E S

(A N E X O)

**ING. MARTINIANO AGUILAR
RODRIGUEZ**

**STANDARD VISCOSITY-TEMPERATURE CHARTS
FOR LIQUID PETROLEUM PRODUCTS
SAYBOLT UNIVERSAL VISCOSITY**

BASIC CHART: A. S. T. M. D 941-45



En el estudio de la distribución de las gotas, se emplea el término

que
de diámetro medio Sauter, se define como el diámetro que corresponde al mayor número de gotas que poseen la misma proporción superficie-volumen:

$$q = \frac{d_1 - d_2}{d_s}$$

en donde ,

d_2 = diámetro medio superficial o diámetro Sauter,

d_1 = diámetro mínimo de por lo menos el 95% de las gotas.

d_s = diámetro mínimo de por lo menos el 5% de las gotas.

El tiempo de combustión t_c puede calcularse en la siguiente forma:

$$t_c = Kx d_0^2$$

en donde,

d_0 = diámetro inicial de las partículas en centímetros.

K = coeficiente dependiente de las siguientes variables: conductividad térmica, calor específico, diferencia de temperatura entre la llama y la gota, densidad de la gota, calor recibido desde la gota por radiación, y calor unitario

necesario para convertir la gota en estado de vapor.

t_c = tiempo de combustión en segundos.

El valor de K se aproxima de 100 a 350 para los combustibles líquidos normales en tanto que para los residuos de alquitrán se acerca a 100 y para partículas de carbón pulverizado tiene un valor de 4000.

Los quemadores para aceites combustibles se clasifican en :

- a) atomizadores con pulverización mecánica (con presión directa, con retorno, etc.)
- b) atomizadores que pulverizan con fluido auxiliar como vapor, o aire de alta presión (más de 3 kg/cm²), media presión (de 0.5 a 3 kg/cm²) y baja presión (hasta 700 mm de H₂O).
- c) atomizadores (quemadores) de copa giratoria .

En los atomizadores de presión directa el aceite es comprimido por una bomba y sale al exterior por un pequeño orificio después de recibir un fuerte movimiento rotatorio mediante ranuras, hélices u otros métodos. El trabajo de atomización se realiza a expensas de la energía cinética del líquido y el aceite al pasar a través del orificio, genera unas gotas muy diminutas.

En las Figs. VI-7 y VI-8 se muestran dos tipos sencillos de atomizadores de presión directa. En el primero, el aceite a presión converge hacia el centro donde al proyectarse sobre el ángulo vivo del orificio y expanderse luego en el cono del mismo se pulveriza. En el segundo tipo, la hélice central contribuye a imprimir un fuerte movimiento de torbellino al aceite, proporcionándole una fuerte componente tangencial; de esta manera el aceite forma un fino velo en el interior del orificio de la tobera y a la salida, debido al roce con el aire se descompone en gotas muy diminutas formando un chorro cónico.

Se afirma que el diámetro medio Sauter es proporcional al siguiente cociente :

$$\frac{d_0^{0.55}}{p^{0.39}}$$

en donde,

d_0 = diámetro de la tobera en pies

p = presión en lb/plg²

Con objeto de lograr mejores características de atomización se pueden utilizar toberas con quemadores de torbellino como la que se muestra en la Fig. VI-7. La cámara de forma cilíndrica va incorporada a la tobera en la que se hacen los orificios tangenciales "d". El área total transversal de estos orificios es

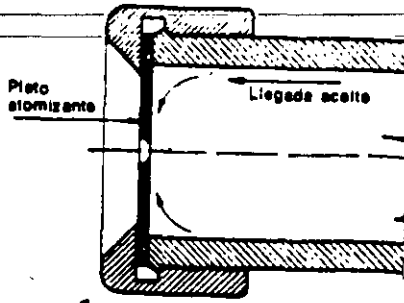


Fig. VI-7 - Atomizador de plato.

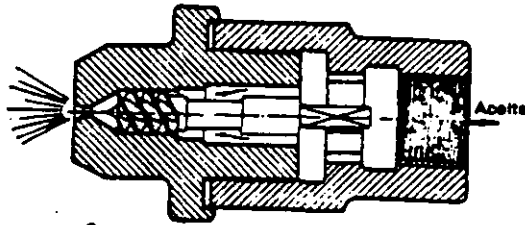


Fig. VI-8 - Atomizador centrífugo.

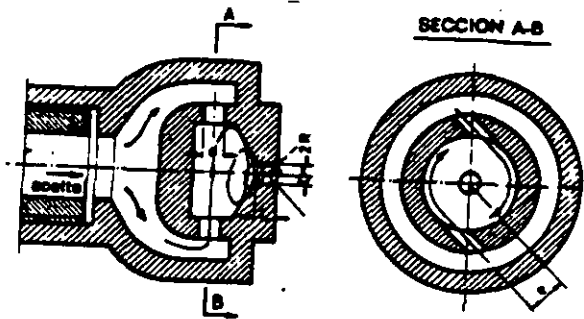


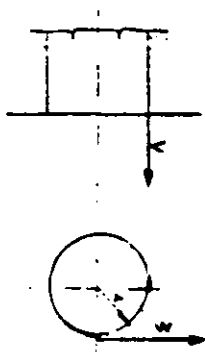
Fig. VI-9 - Esquema de tobera con cámara de torbellino.

de alimentación del aceite por lo que el líquido que penetra desde el exterior con una fuerte presión recibe un gran aumento de velocidad y un movimiento giratorio; en el recorrido hacia la salida por la cámara la velocidad periférica del aceite va aumentando. Por otra parte, como la caída de presión a través de los orificios tangenciales es poca, en el interior de la cámara existe una presión estática residual por lo que el aceite es impulsado hacia la salida por un fuerte movimiento giratorio y por un considerable empuje axial. Del orificio de la tobera cada partícula de aceite sale impulsada por dos componentes: una axial debido a la presión, y otra residual debido al movimiento giratorio que depende a su vez del cambio de presión causado por el paso a través de los orificios "D". El aceite lanzado fuera de la tobera por la acción de estos componentes se subdivide por rozamiento con el aire exterior en una fina niebla de forma cónica (chorro atomizado) cuyo ángulo de apertura está influenciado por la resultante de las dos componentes anteriores.

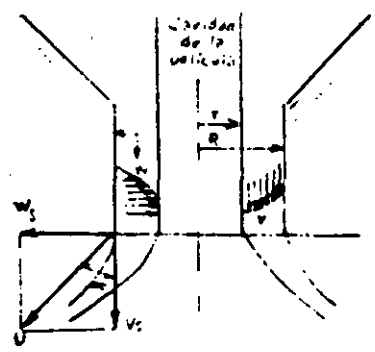
Considerando la sección del orificio de salida de la tobera mostrada en la Fig. 11-10, la siguiente fórmula es válida para las diferentes partículas :

$$wr = \text{constante,}$$

en donde,



10 - COMPONENTE DE VELOCIDAD A LA ENTRADA DE LA TOBERA



11 - GRADIENTE DE VELOCIDAD A LA SALIDA DE LA TOBERA

r = distancia de cada partícula al eje longitudinal de la tobera.

Para $r = 0$, se tendría $w = 0$, por lo que se admite que la sección central del orificio presenta una cavidad en el flujo tal como se muestra en la Fig. VI-11

Llamando a w_s y v_s velocidad tangencial y velocidad axial, respectivamente, una partícula se moverá formando un ángulo α con el eje de la tobera igual a :

$$\tan \alpha = \frac{w_s}{v_s}$$

Se observa que el ángulo del chorro depende de las dimensiones características de la tobera, tales como el diámetro de los orificios "d", la sección transversal total de los orificios "f", la distancia entre el eje de los orificios y el eje de la tobera "e" y el radio de la tobera "R"

llamando a :

v_{ur} = velocidad axial para sección de la tobera llena, y

b = proporción entre la sección de la cavidad interna y la del orificio, se tiene :

$$v_s = \frac{v_{ur}}{1-b}$$

y llamando al cociente $\frac{w_s}{v_{ur}} = \phi$, el ángulo del chorro será

$$\tan \alpha = \phi (1 - b)$$

y si Q = caudal de la tobera, se tiene :

$$v_{ur} = \frac{Q}{\pi R^2}$$

$$v_s = \frac{Qe}{\pi R^2}$$

y por lo tanto,

$$\phi = \frac{e}{f}$$

es decir,

$$\tan \alpha = \frac{e}{f} (1 - b)$$

De lo anterior se deduce que el ángulo del chorro aumenta cuanto más alejados estén los orificios tangenciales y más pequeña sea su sección, aunque este aumento no es ilimitado pasando por un máximo. Para presiones entre 20 y 30 kg/cm² la mayor parte de los fabricantes producen toberas con $\phi = 1.5$, llamándose a este valor "característica de la tobera".

En las consideraciones anteriores no se tomó en cuenta el rozamiento ni otros fenómenos más complejos derivados de otros factores como la longitud de la cámara del torbellino, relación entre la longitud y el diámetro del orificio, conicidad de la cámara, viscosidad del aceite, presión, etc., que afecten las - - ecuaciones encontradas.

La relación entre el flujo y la caída de presión se encuentra según la siguiente expresión :

$$\Delta p = a Q^n$$

en donde "a" y "n" son coeficientes característicos y constantes de cada tobera; el exponente es algo mayor de 2 para diámetros de tobera menores de 2 mm y algo menor de 2 para diámetros mayores de 3 mm.

De la relación entre la energía potencial y la energía cinética se puede deducir la siguiente igualdad:

$$\frac{\frac{\Delta p}{\rho}}{2(v_{ur}^2 + w_s^2)} = \frac{\frac{\Delta p}{\rho}}{2v_{ur}^2(1+\phi^2)}$$

en donde,

ρ = densidad

Se observa que la presión para atomizar una determinada cantidad de aceite disminuye al aumentar ϕ y aumenta con el diámetro D de la tobera. En efecto ϕ es la función lineal de D y la velocidad axial v_{ur} disminuye cuadráticamente con D.

De lo anterior se deduce que un aumento del diámetro D produce, a igual presión, un empeoramiento de la atomización. Analizando la influencia que tiene el coeficiente L/D, en donde L es la longitud del orificio de la tobera, se comprueba que un orificio grande absorbe más energía que uno corto, debido al rozamiento de las paredes, teniendo lugar una disminución del componente periférico con la siguiente reducción

grar ángulos de chorro suficientemente amplios, es necesario diseñar toberas con orificios cortos de salida.

La forma en que afecta al tamaño de las gotitas la tensión superficial y la densidad de aceite, así como la calidad de éste y las demás variables mencionadas ha sido determinado por Gebhardt en los nomogramas VI-12 y VI-13. En dichos nomogramas se obtiene una magnitud S característica del fluido en función de la viscosidad dinámica η , de la tensión superficial σ y de la densidad ρ ; a partir de S y en función del coeficiente ϕ , de la presión de atomización Δp y del diámetro D de la salida de la tobera, se obtiene el diámetro máximo de las gotas en micras.

Estudiando dichos nomogramas se puede concluir lo siguiente :

- a) para los valores de $\phi \leq 1$, las variaciones de la característica de la tobera influyen en el diámetro máximo de las gotas mucho menos que la presión y el diámetro de la tobera.
- b) un aumento indiscriminado de la presión, superior a 20 atmósferas no parece implicar importantes ventajas; la mayor parte de los atomizadores funcionan con presiones entre 14 y 20 atmósferas.
- c) tanto la densidad como la tensión superficial tienen una influencia relativa, siendo apreciable la

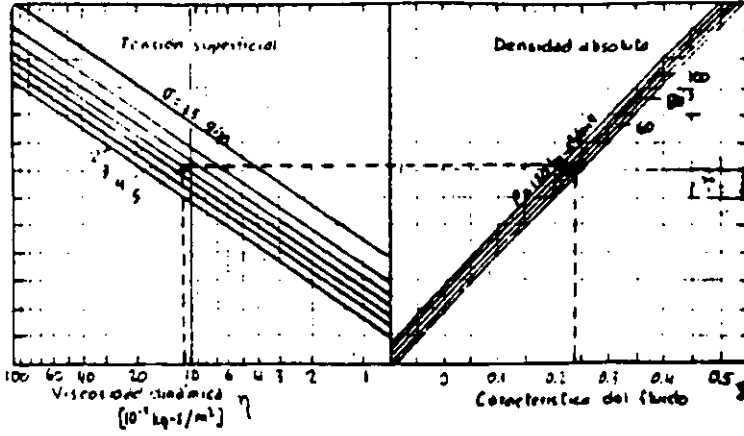


Fig. VI-12.- CARACTERISTICAS S DEL FLUIDO

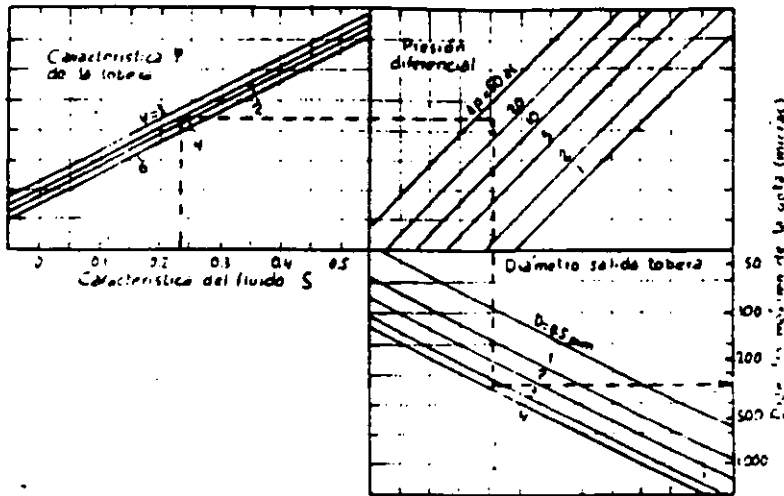


Fig. 15.- DETERMINACION DEL TAMAÑO MAXIMO DE LA GOTA

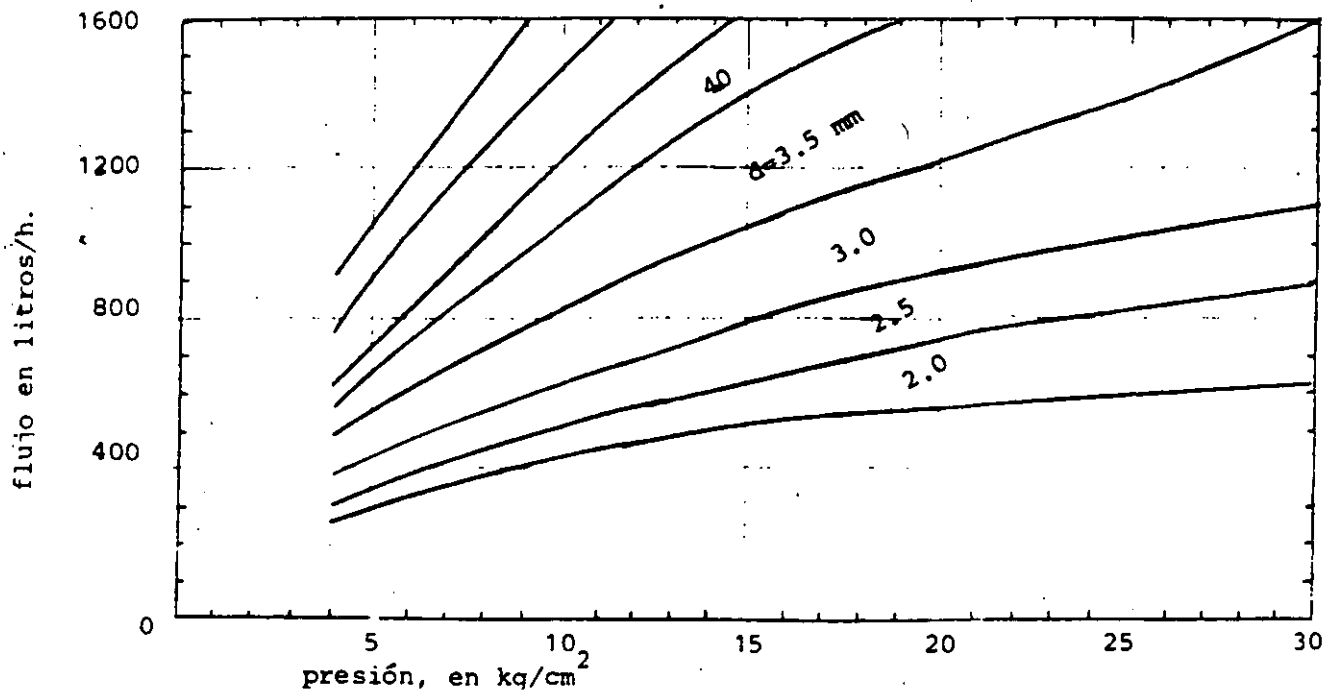
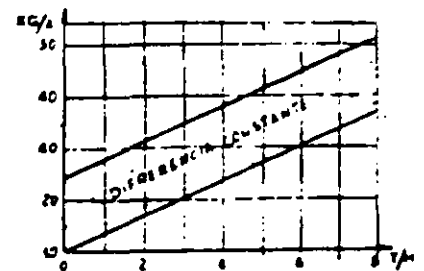
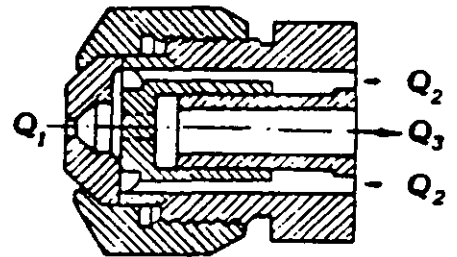
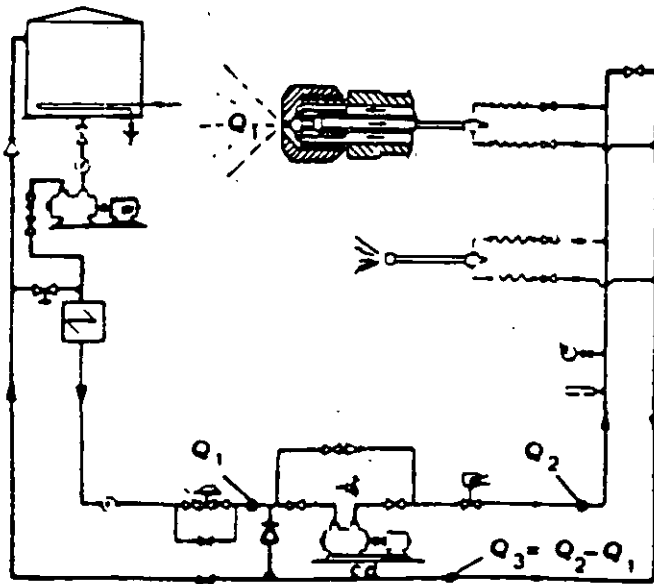
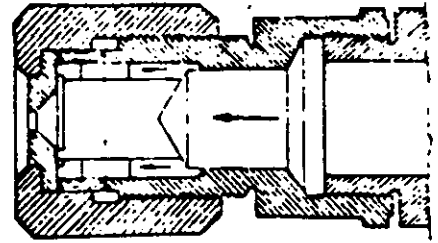
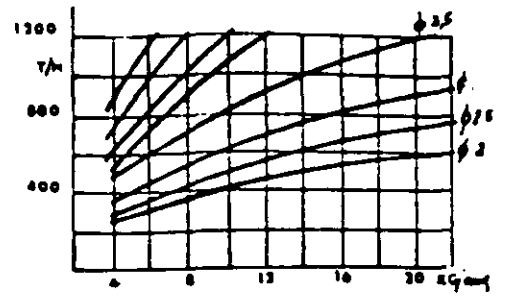
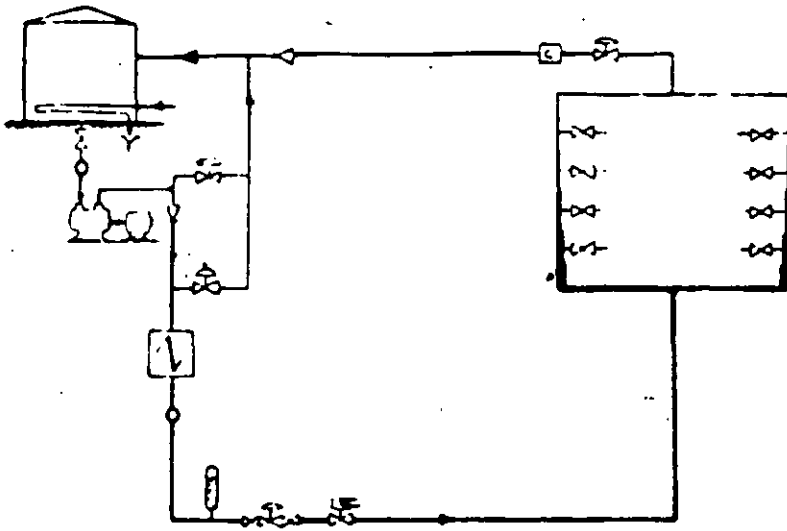


Fig. 7.1.4.- FLUJO DE ACEITE EN TOBERAS EN FUNCION DE LA PRESION



1. The pressure in the hydraulic system is determined by the load and the flow rate.

la tobera. Utilizando un fluido auxiliar a presión, la impulsión del aceite puede reducirse considerablemente ya que la energía necesaria para la pulverización la aporta, en parte, el mismo fluido auxiliar.

La presión con que el aceite llega al atomizador es generalmente mucho más baja que la utilizada en las pulverizaciones mecánicas y por lo tanto los orificios y las ranuras de paso son más grandes existiendo menos probabilidades de obstrucción.

Se consideran altas presiones de fluido auxiliar - las comprendidas entre 3 y 10 atmósferas, medias presiones entre .5 y 2 atmósferas y bajas presiones de menos de 0.5 atmósferas.

La atomización con vapor proporciona, por lo general, un chorro más fino que el obtenido mediante la atomización mecánica y la necesidad de mantenimiento y limpieza de las toberas es inferior; por otra parte, como la acción del vapor es fuertemente detergente un simple soplo de vapor en los pasos del aceite resulta suficiente para expulsar eventuales residuos de carbón acumulados durante el funcionamiento. En la atomización con vapor es posible obtener un campo de regulación de 1 a 10 ó más, pudiendo regularse fácilmente la llama en lo que se refiere a longitud y forma. Puesto que la forma del chorro está determinado por la inclinación y disposición del orificio de salida, es posible obtener, a voluntad, chorros -

muy estrechos o muy largos, o incluso, chorros planos; las características constantes de un chorro pueden asegurarse si se mantiene sin cambio la diferencia entre el aceite y el vapor; el vapor utilizado debe ser seco saturado o ligeramente sobrecalentado, ya que el húmedo tiene un escaso efecto atomizante.

La elección entre los quemadores pulverización con vapor y los de pulverización mecánica se efectúa en función de la forma de empleo; a favor de la pulverización mecánica está la sencillez de instalación, de funcionamiento y la independencia del suministro de vapor, pero por el contrario la pulverización con vapor se prefiere cuando se utilizan aceites de elevada viscosidad y densidad o cuando se requiere un campo amplio de regulación sin medidas especiales.

se muestra en el diagrama de la copa de quemador de atomización

En los quemadores de copa rotativa, la atomización se efectúa haciendo fluir el aceite hasta el interior de una copa cónica o cilíndrica que gira a alta velocidad (3 500 rpm); en el interior de la copa el aceite se distribuye formando una ligera capa líquida que al alcanzar el extremo de la copa tiende a disgregarse en partículas diminutas. Esta acción parcialmente atomizadora se refuerza mediante el envío de una cierta cantidad de aire primario por medio de un ventilador que se encuentra situado en el eje de la copa. El aire secundario llega al quemador a través de una entrada exterior regulada por una válvula.

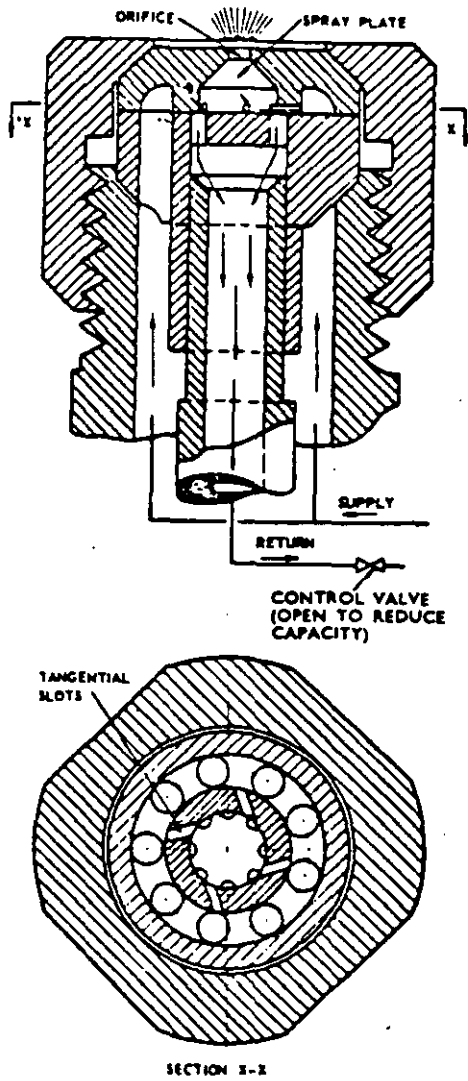


FIG. 1.13.1. Pressure atomising oil-burner nozzle

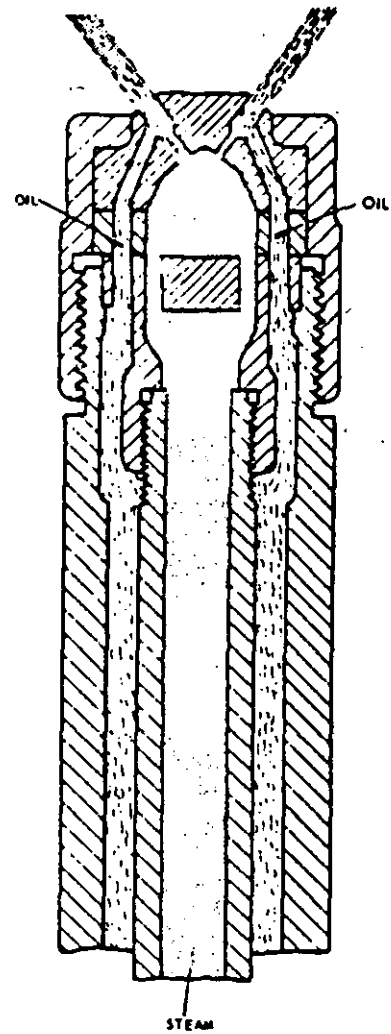


FIG. 1.13.2. Steam atomising oil-burner nozzle

1.13.1. Pressure atomising oil-burner nozzle



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

CURSOS ABIERTOS

GENERADOR DE VAPOR O CALDERAS

CONTROL DE MANTENIMIENTO DE CALDERAS

TABLA PCC-1.- EXCESO DE AIRE OPTIMO

COMBUSTIBLE	METODO DE QUEMADO	EXCESO DE AIRE OPTIMO (%)	O ₂ EQUIVALENTE POR VOLUMEN
GAS NATURAL	-----	5 - 10	1 - 2
PROPANO	-----	5 - 10	1 - 2
GAS DE COKE	-----	5 - 10	1 - 2
ACEITE No. 2	ATOMIZACION C/VAP	10 - 15	2 - 3
ACEITE No. 6	ATOMIZACION C/VAP	10 - 15	2 - 3
CARBON	PULVERIZADO	15 - 20	3 - 3.5
CARBON	ALIMENTADO	20 - 30	3.5 - 5

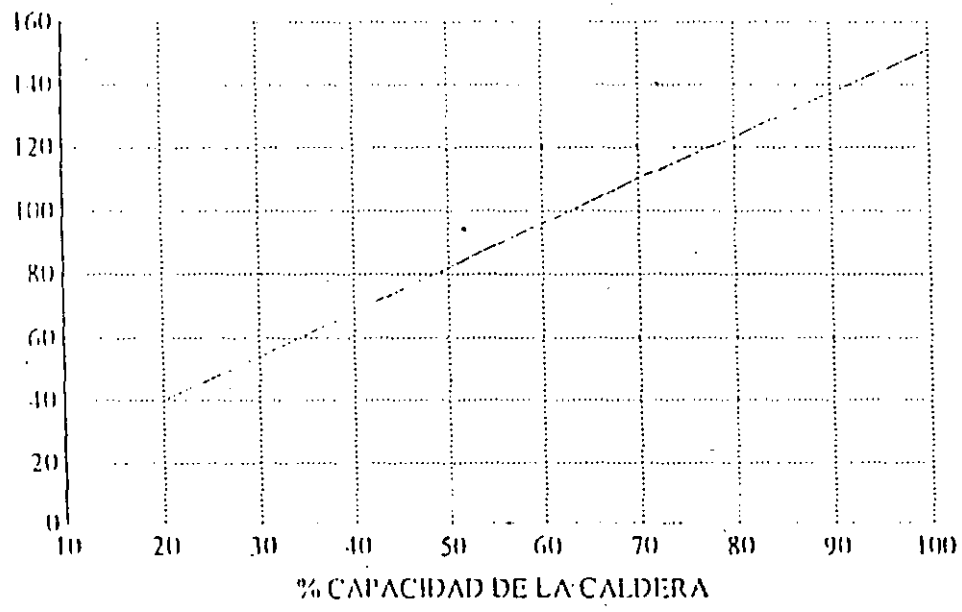


Fig. PCC-2.- Temperatura de los gases de salida de caldera por encima de la temperatura del vapor.

EFICIENCIA DE COMBUSTION RELACION OXIGENO - CO

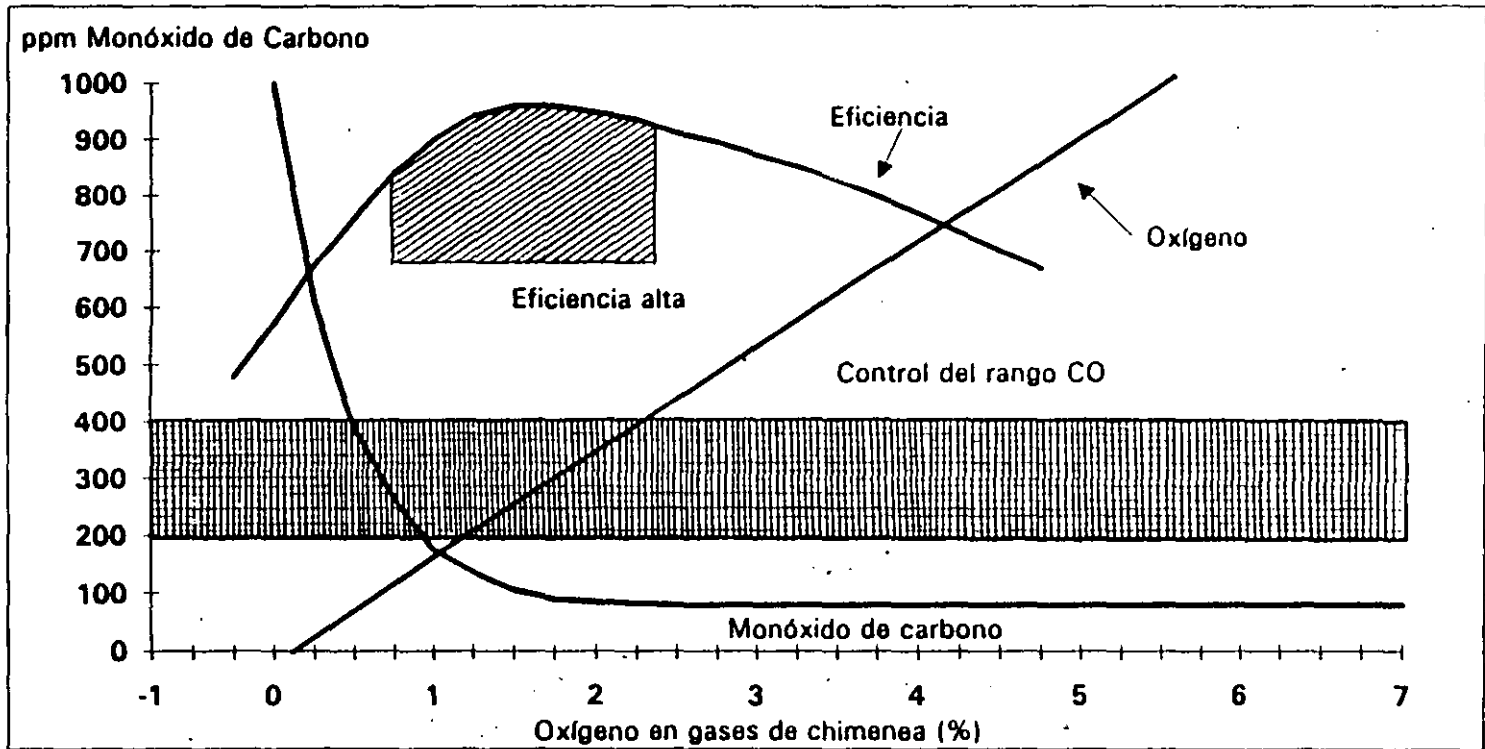
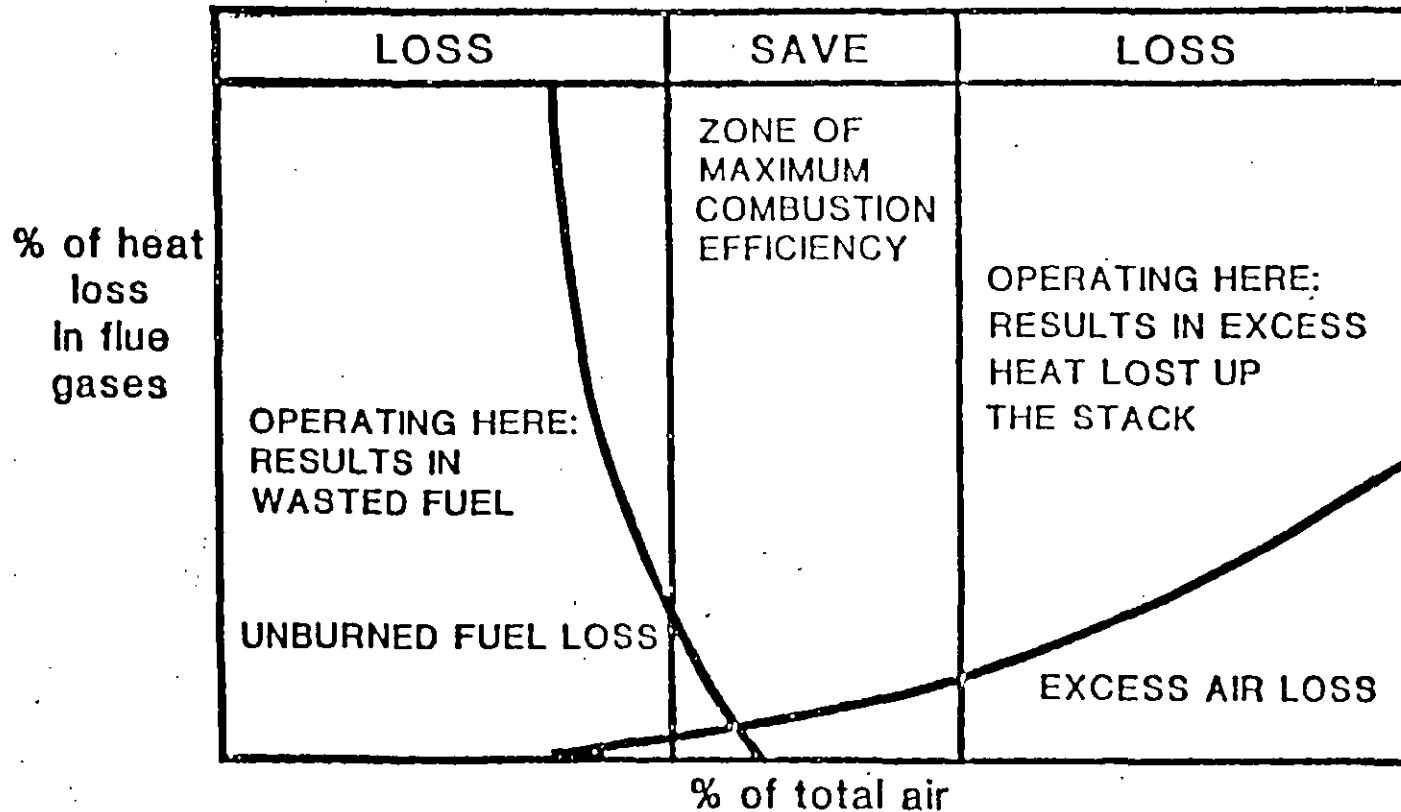


Fig. 6.1 Relación CO/Oxígeno mostrando el rango de control de CO y el efecto de los niveles de CO y Oxígeno sobre la eficiencia de combustión.

4



FUEL SAVING METHODS:

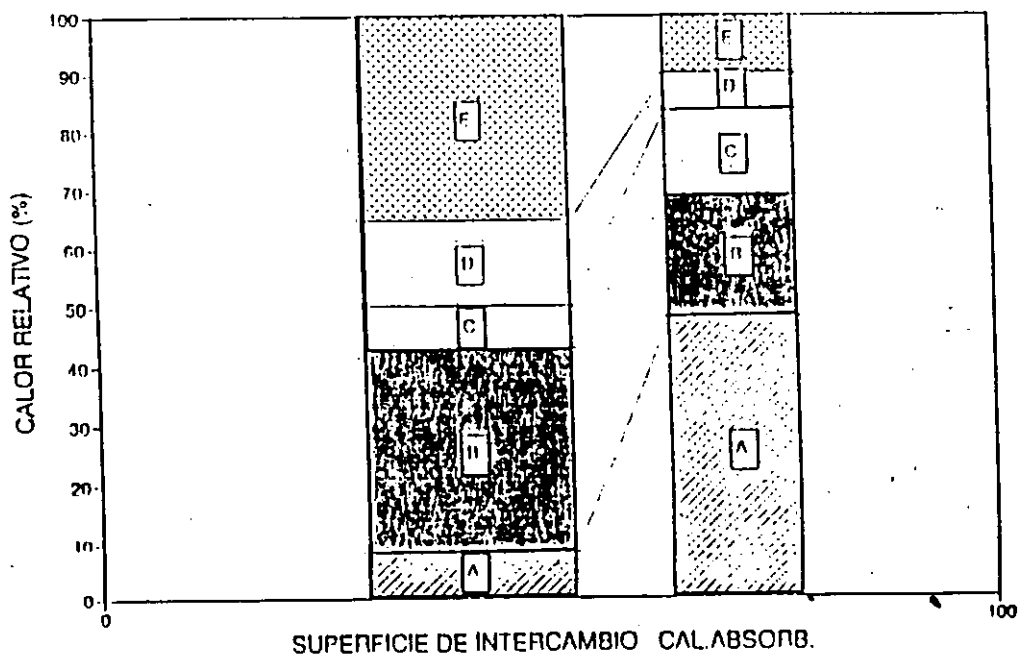
- ① OPTIMIZE AIR FOR COMBUSTION
- ② TRAP HEAT OUT OF FLUE GAS (with air heaters or economizers)

Figure 4.5

Combustible	Poder Calorífico Superior	
	KCal/Kg	BTU/LB
Gas Natural	12,125	21,830
Propano	11,985	21,573
Kerosena	11,078	19,942
Combustóleo No. 1	10,790	19,423
Combustóleo No. 2	10,550	18,993
Combustóleo No. 5	10,548	18,909
Combustóleo No. 6	10,070	18,126
Carbón Bituminoso	7,794	14,030
Carbón - Antracita	7,044	12,680
Bagazo - Humedad 50%	4,555	8,200
Madera - Humedad 10%	4,890	8,800

Fig. AGV-1.- Poder Calorífico Superior Para Varios Combustibles

Fig. AGV-4.- Relacion entre superficies de intercambio y calor absorbido en G V



A Paredes de horno B-Banco caldera C-Sobrecalentador D-Economizador E-Pre calentador

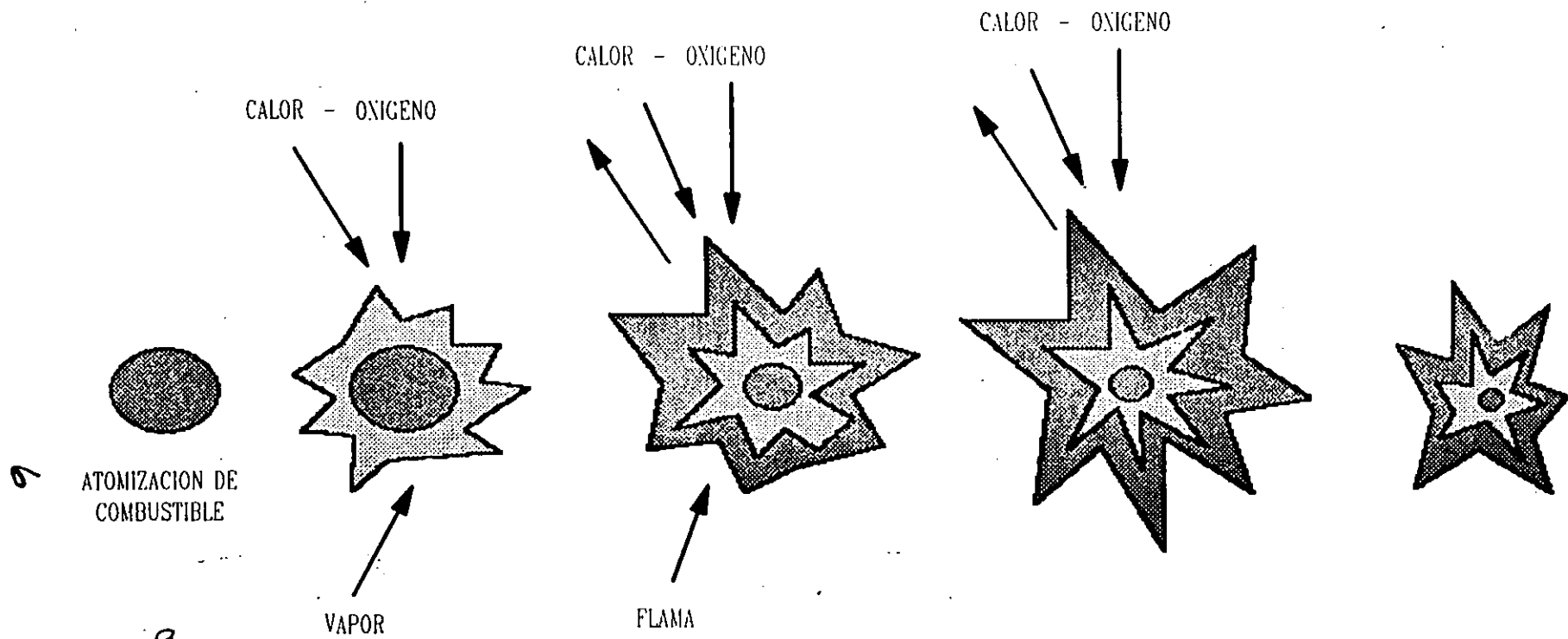


FIGURA 6.11 Combustión de aceite: (a) El aceite se esparce en finas partículas esféricas por el proceso de atomización para tener una superficie mayor para la formación de vapor para la combustión, el vapor no quema el aceite por sí mismo. Después, (b) El intenso calor en la zona de combustión calienta el vapor hasta el punto de ignición y el oxígeno es mezclado con el combustible para dar lugar a la combustión, (c) El vapor y los residuos de carbón continúan quemándose, reduciendo el tamaño de las partículas mientras éstas son expulsadas del quemador y (d) Todo el combustible debe ser quemado en la zona de combustión para asegurar que ésta sea limpia y no permanezcan gases dentro de la caldera.

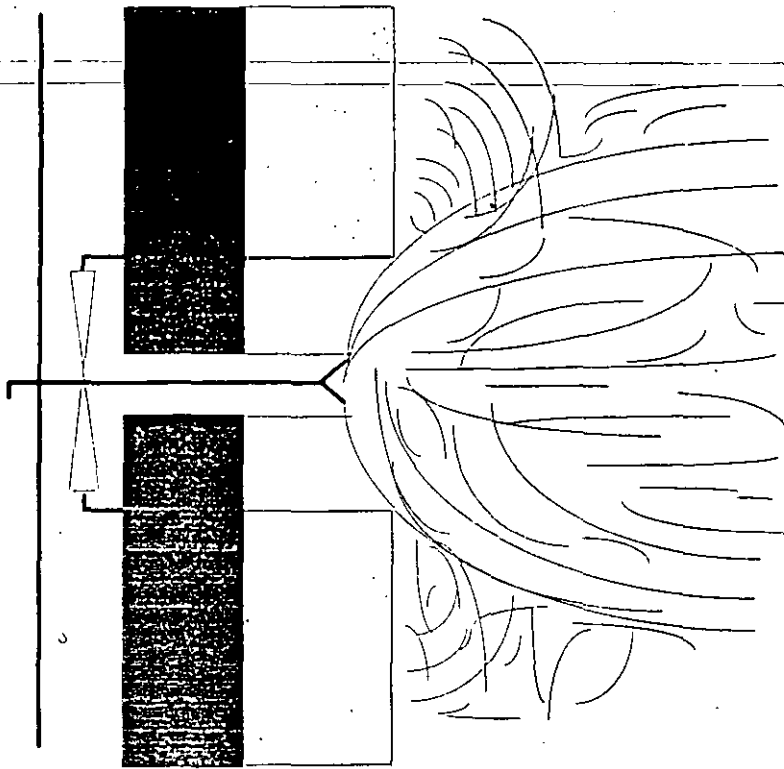


FIGURA 6.9 LA FLAMA LIBRA LA GARGANTA. SE RETRAE. INCIDE Y LAME LA PARED DEL HORNO.

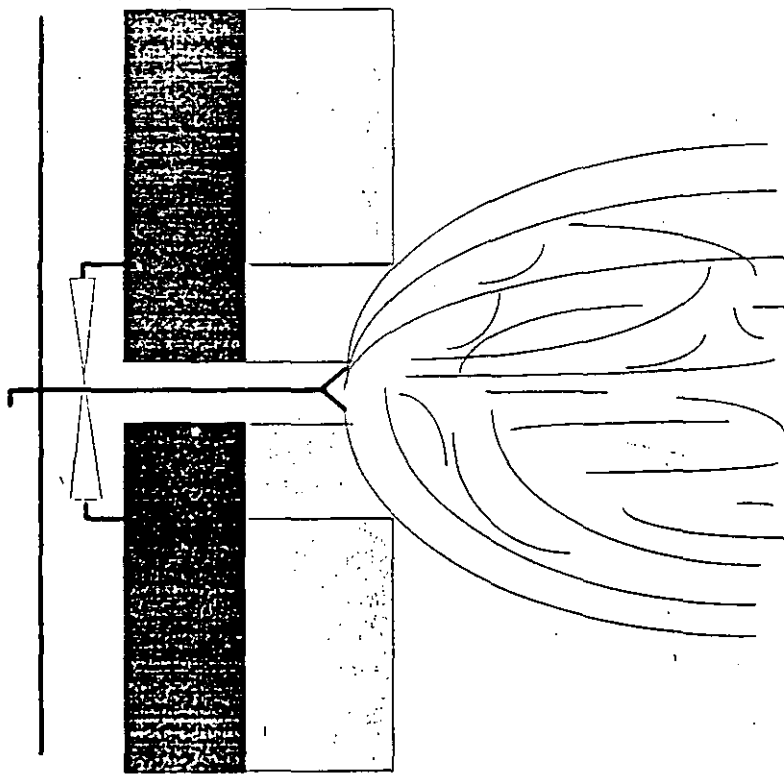
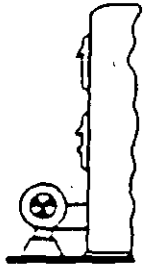


FIGURA 6.10 LA FLAMA INCIDE EN LA GARGANTA DEL QUEMADOR.

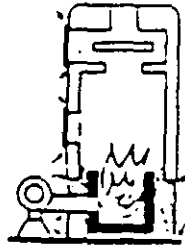
8

7

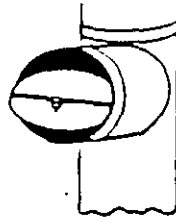
COMMON CAUSES OF LOW CO₂ AND SMOKY FIRE ON OIL BURNERS



1. Improper fan delivery or incorrect air shutter opening.



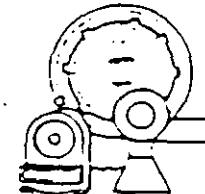
2. Furnace or boiler has excessive air leaks.



3. Draft regulator is improperly installed or sticking.



4. Draft is insufficient due to defective flue or insufficient height of chimney.



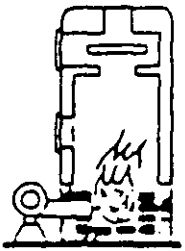
5. Burner "on" periods are too short.



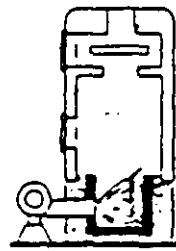
6. Oil does not conform to burner requirements.



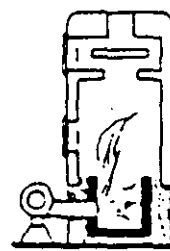
7. Air handling parts defective or incorrectly adjusted.



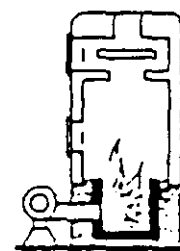
8. Firebox is cracked or of improper refractory material.



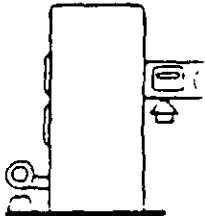
9. Spray angle of nozzle unsuited to air pattern of burner or shape of firebox.



10. Nozzle is worn, clogged or of incorrect type.



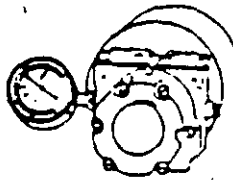
11. Gph. rate is too high for size of combustion chamber.



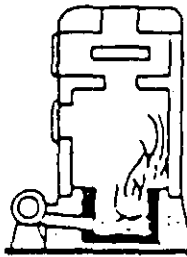
12. Ignition is delayed due to defective stack control.



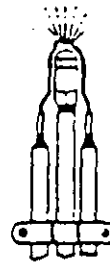
13. Nozzle spray or capacity unsuited to the particular type of burner being used.



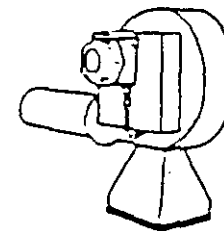
14. Oil pressure to nozzle improperly adjusted causing poor spray characteristics.



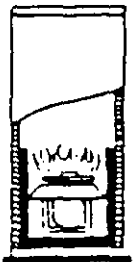
15. Nozzle is loose or not centered.



16. Electrodes are dirty, loose or incorrectly set.



17. Cut-off valve leaks, allowing after-drip of fuel oil.



18. Rotary burner motor is running underspeed.

Troubleshooting guide for small oil burners. (Bacharach Co.)

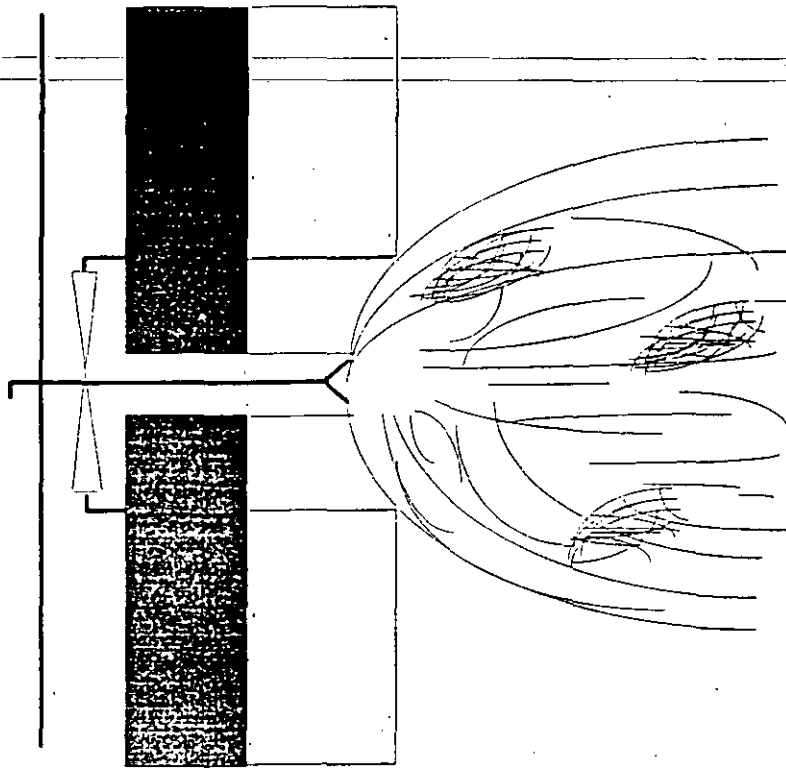


FIGURA 6.7 PATRON DE FLAMA CON GRUMOS DE ACEITE SALIENDO DE LA BOQUILLA
5

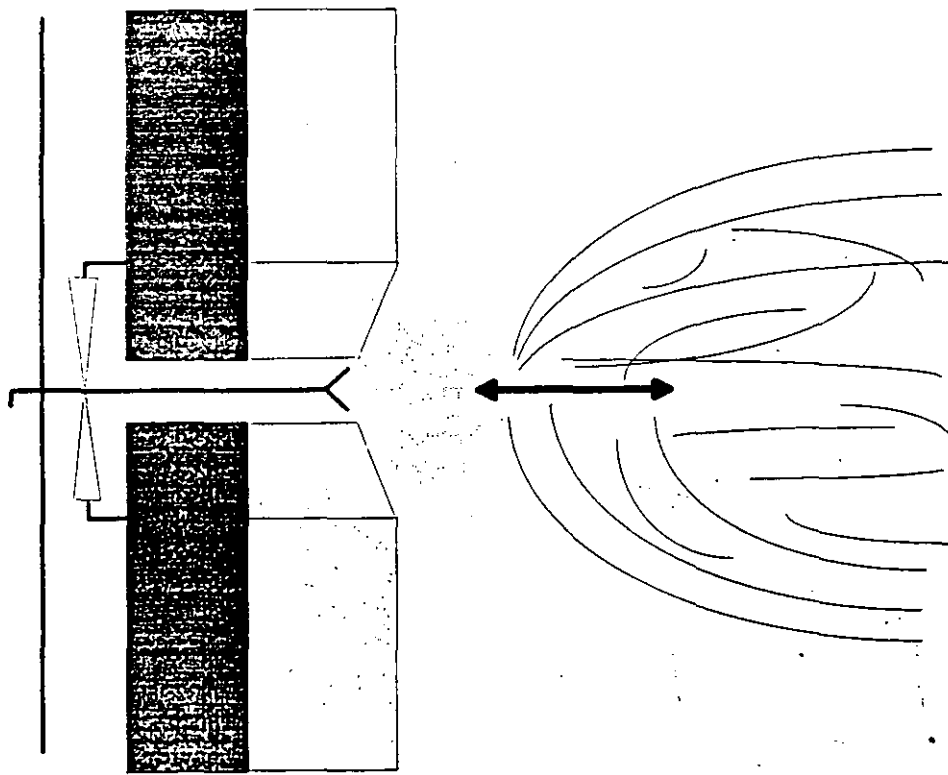


FIGURA 6.8 LA FLAMA SE "SOPLA". PUEDE SER CONTINUO O PULSANTE DENTRO O FUERA DE LA BOQUILLA.
6

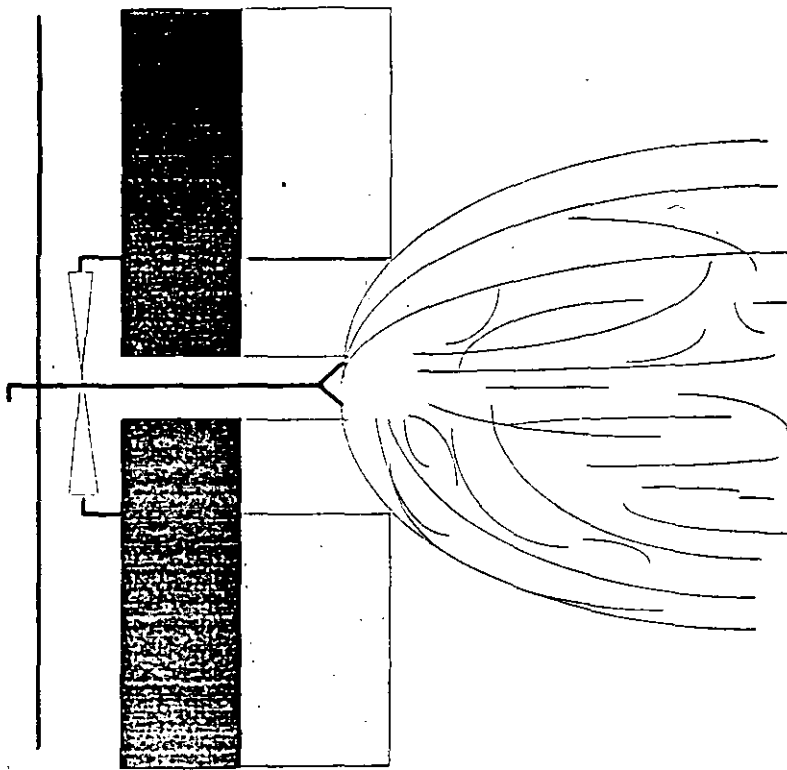


FIGURA 6/3 LAS CARACTERISTICAS DE LA FLAMA SON CERCANAS A LA GEOMETRIA DE UNA FLAMA IDEAL

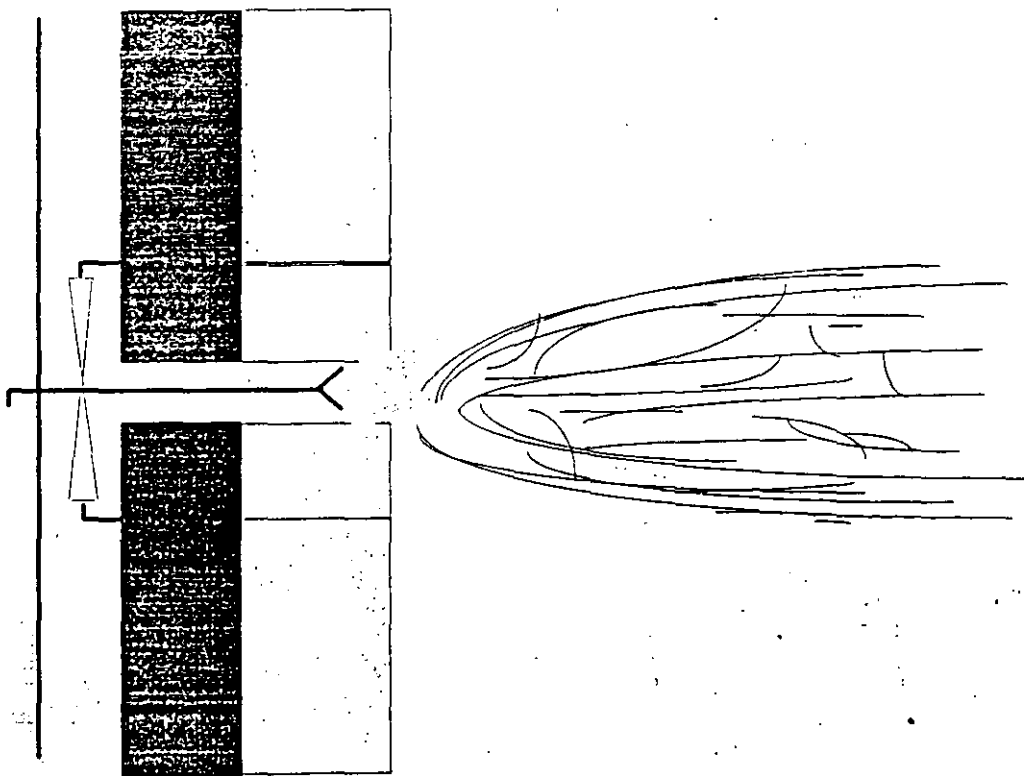
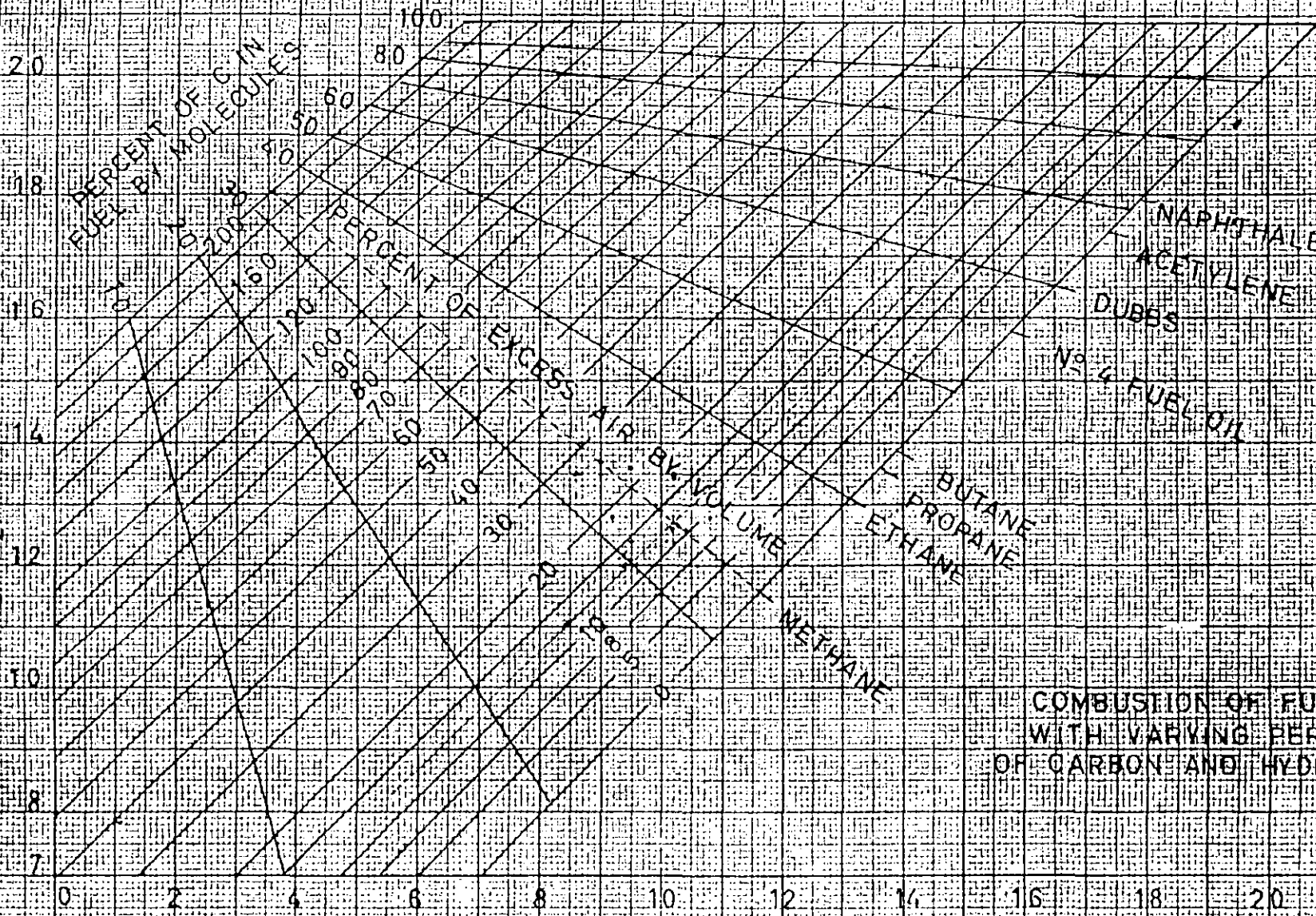


FIGURA 6/4 LA FLAMA ES ANGOSTA Y NO LLENA LA BOQUILLA. LA CORRIENTE DELGADA POSIBLEMENTE SE PRESENTE A LA MITAD DE LA FLAMA.

PERCENT OF CO₂ + O₂ IN FLEE GAS BY VOLUME



PERCENT OF FUEL BY MOLECULES

PERCENT OF AIR BY VOLUME

COMBUSTION OF FUELS
WITH VARYING PERCENT
OF CARBON AND HYDROGEN

PERCENT OF CO₂ IN FLEE GAS BY VOLUME

100

80

60

50

40

30

20

10

20

18

16

14

12

10

8

7

0

2

4

6

8

10

12

14

16

18

20

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

80

70

60

50

40

30

20

10

0

100

90

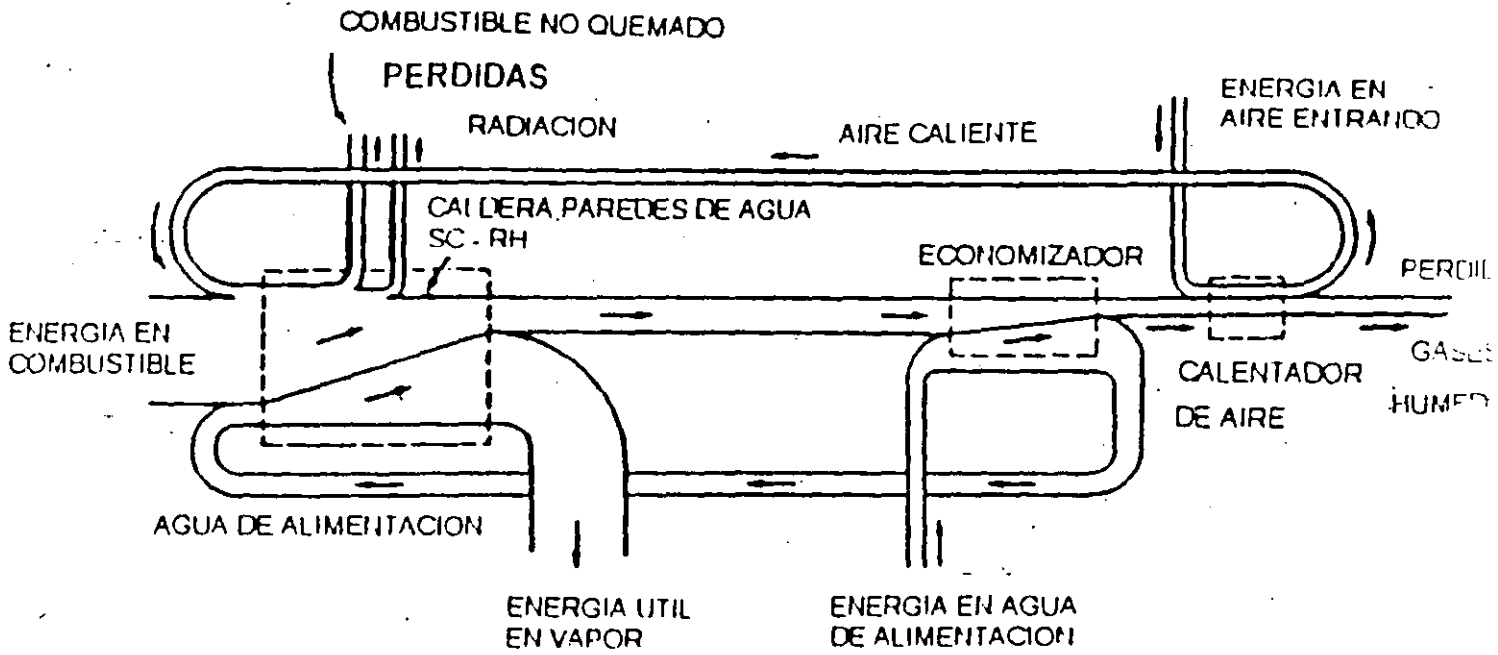
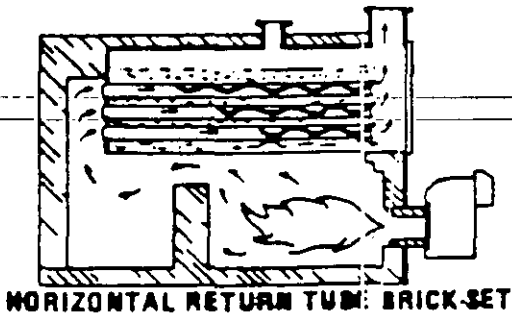
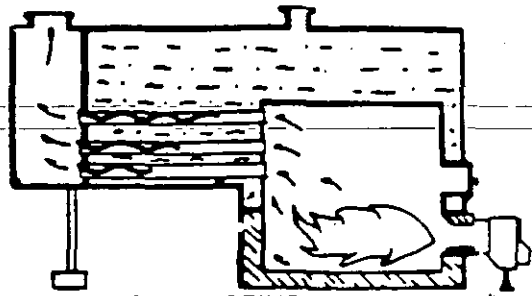


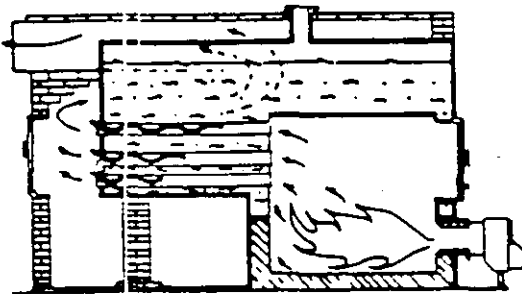
FIG CGV-1 FLUJO DE ENERGIA EN UN GENERADOR DE VAPOR



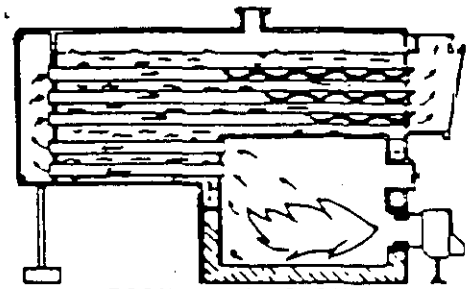
HORIZONTAL RETURN TUB: BRICK-SET



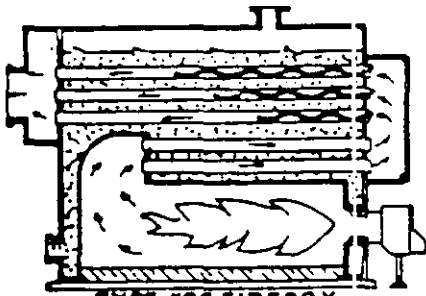
LOCOMOTIVE FIREBOX



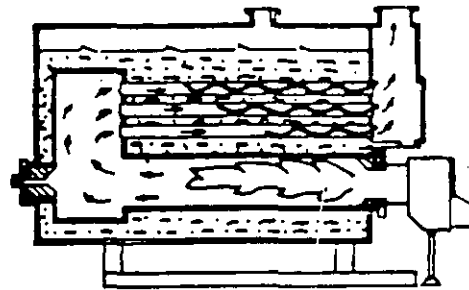
BRICK-SET FIREBOX



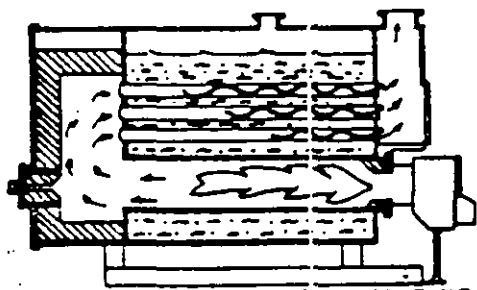
ECONOMY FIREBOX



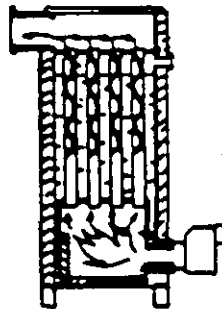
TYPE "C" FIREBOX



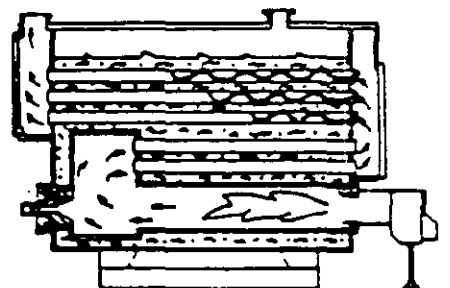
2-PASS WET BACK SCOTCH MARINE



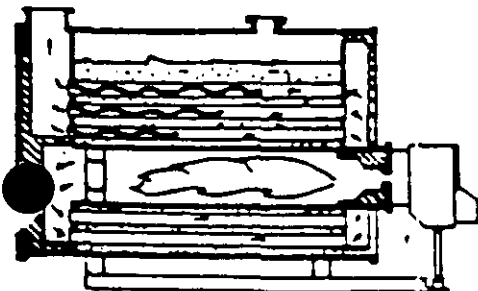
2-PASS DRY BACK SCOTCH MARINE



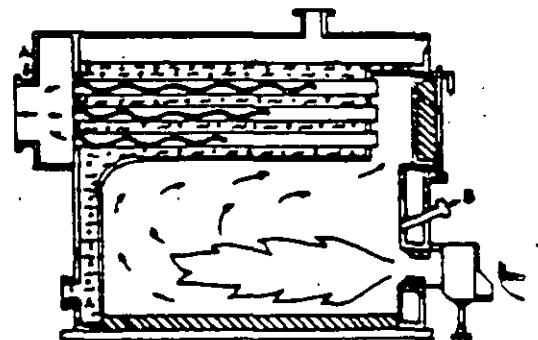
VERTICAL FIRETUBE BOILERS



3-PASS WET BACK SCOTCH MARINE



3-PASS DRY BACK SCOTCH MARINE



TWO PASS FIREBOX

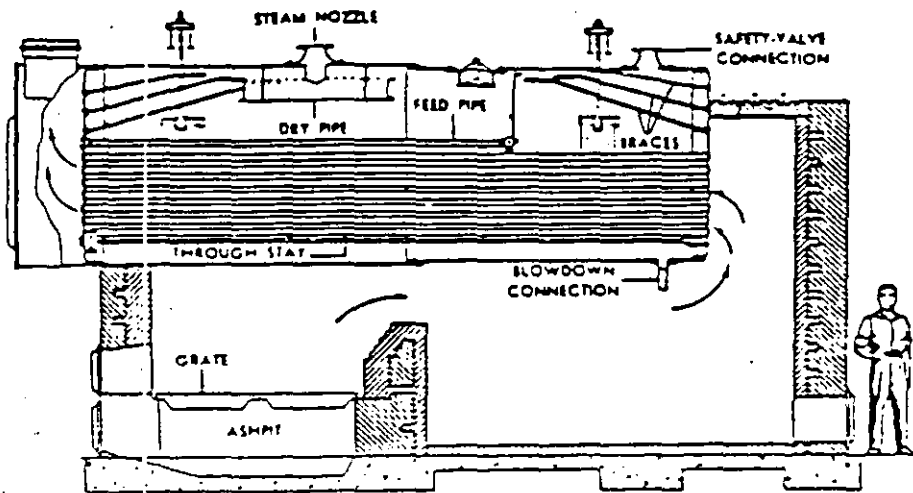


Figure 3.1 Sectional sketch of a horizontal-return tubular boiler

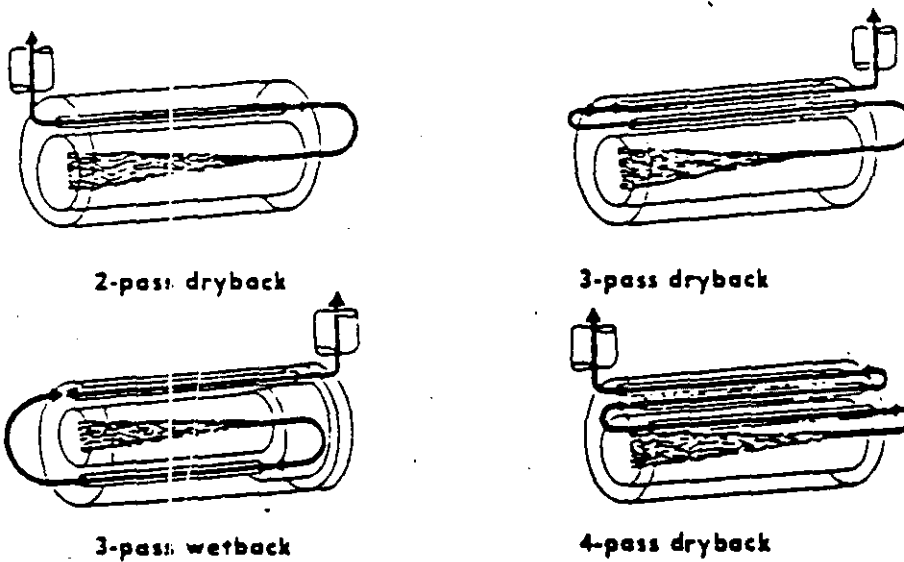


Figure 3.2 Typical firetube boiler gas flow patterns

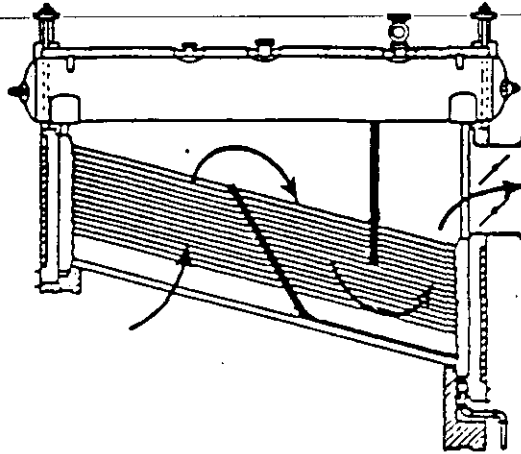


Figure 3.3 Small inclined watertube boiler

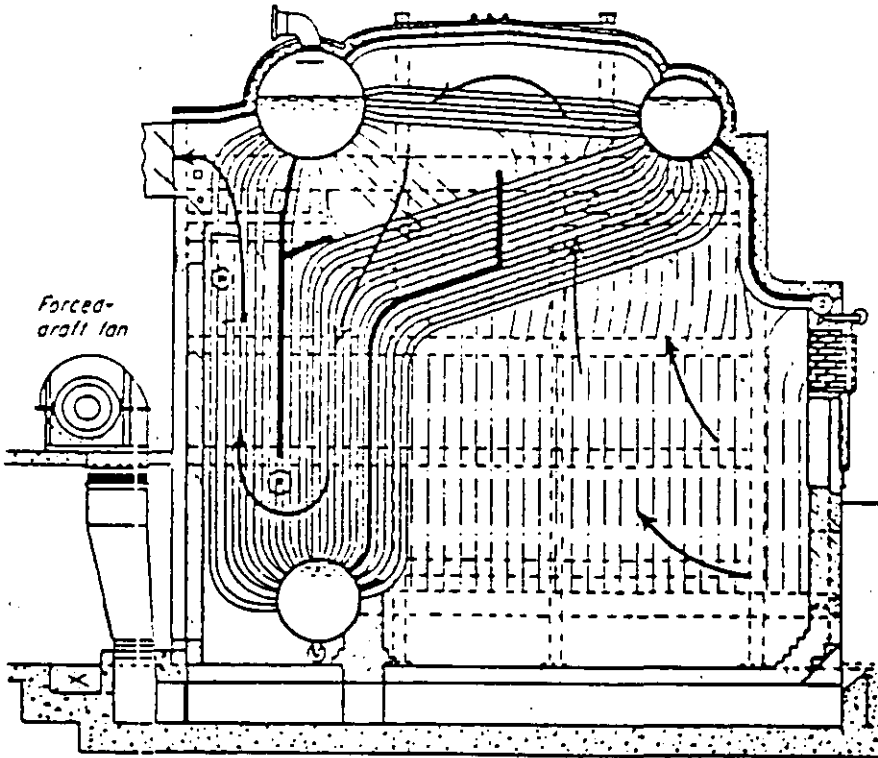


Figure 3.4 Bent tube watertube unit typical of industrial applications

Intermediate-capacity FM Boilers

High-capacity FM Boilers

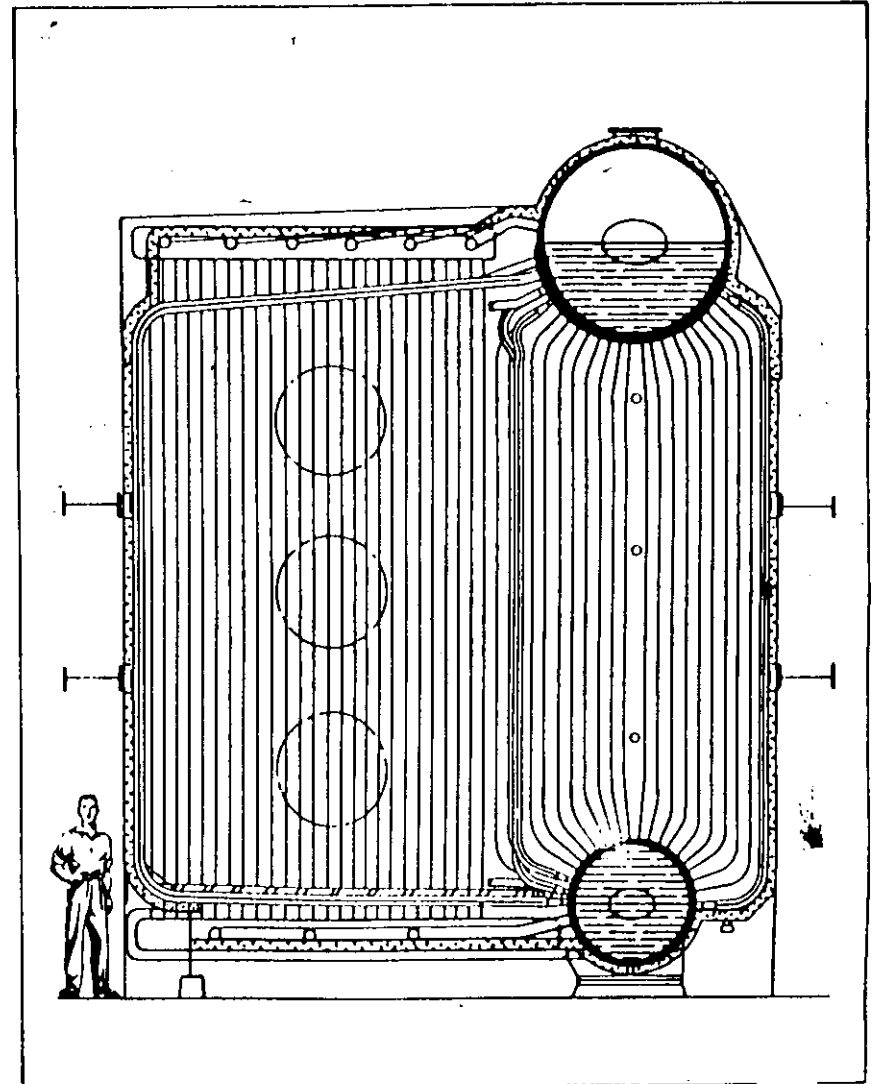
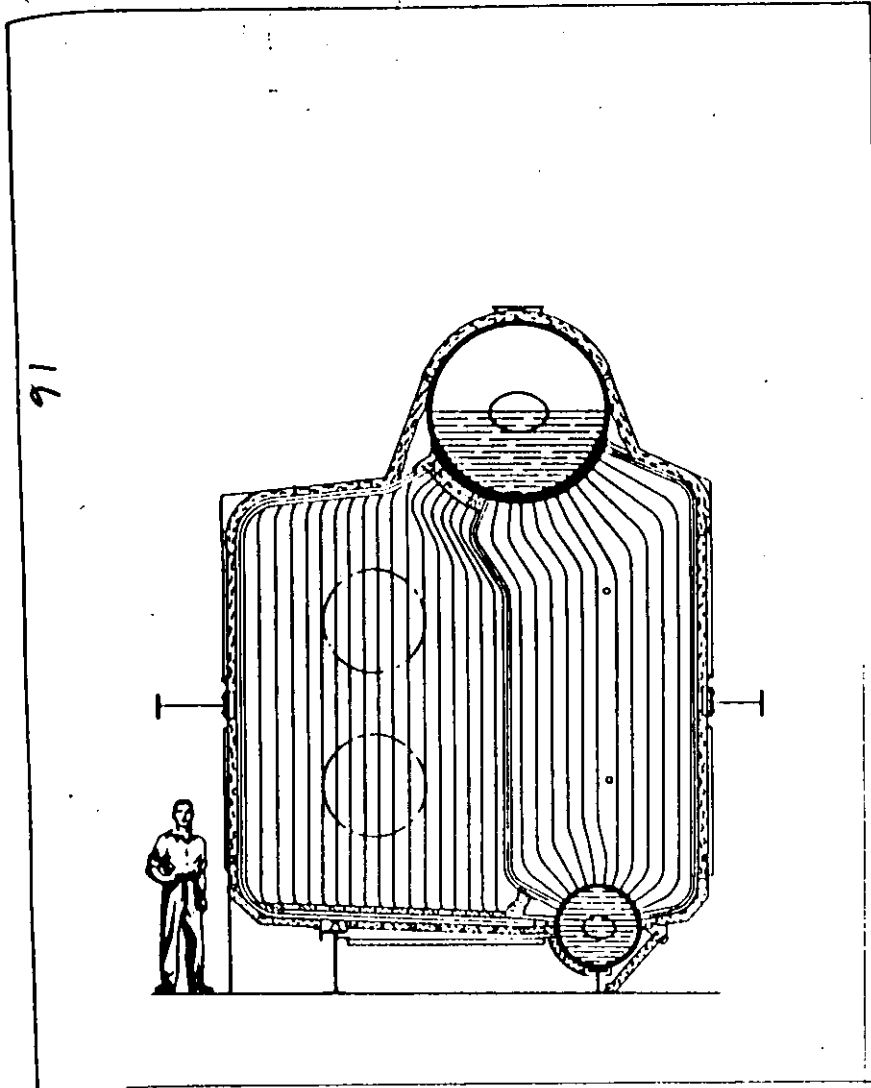


Fig. 5 Type FM Integral-Furnace boiler—intermediate capacity.

Fig. 6 Type FM Integral-Furnace boiler—high capacity.

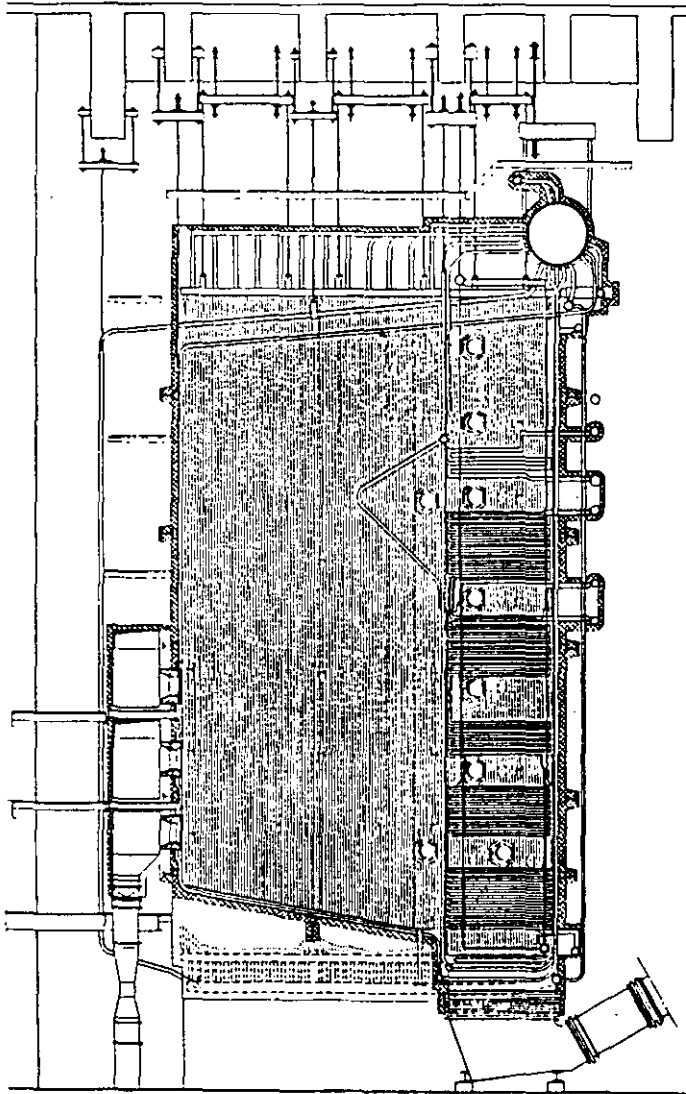


Fig. 51
 Oil-fired natural circulation boiler
 Capacity 125 t/h, 43 atm_g, 420° C
 Location: Wehrden
 Babcock Type

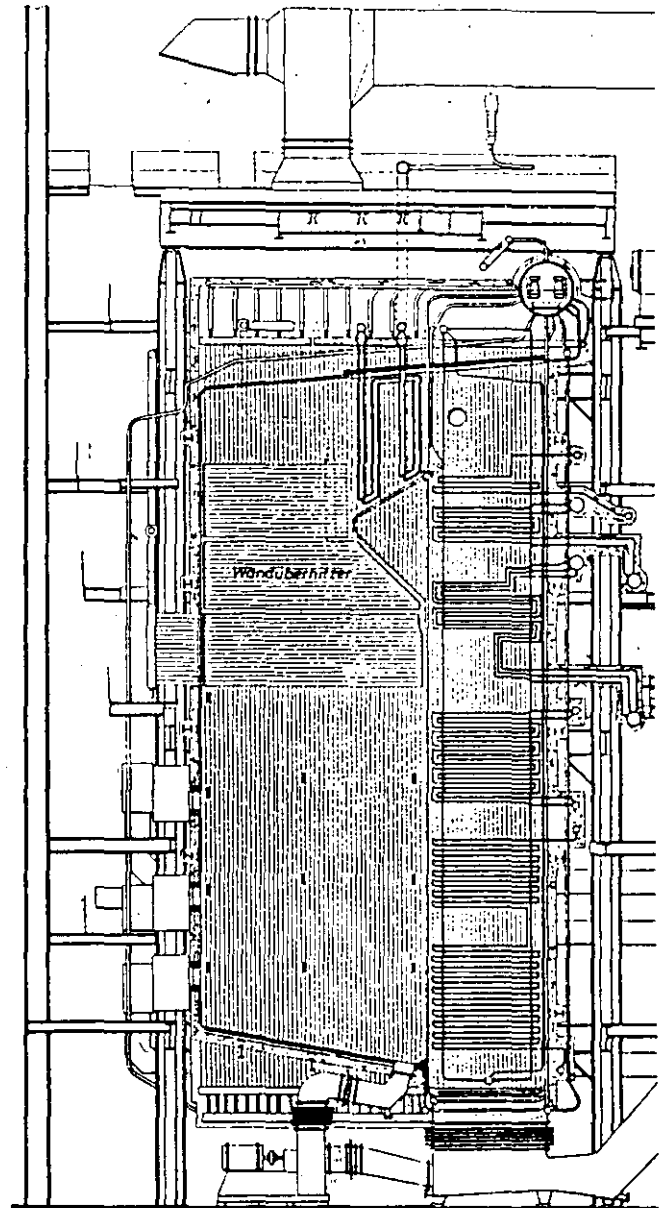


Fig. 52
 Oil and gas fired natural circulation boiler
 Capacity 210 t/h, 175 atm_g, 525/525° C
 Location: Niederrad
 Babcock Type

boilers of a capacity up to 545 t/hr
 under construction

BY CONNECTING BOTH ENDS OF A GAUGE TO DIFFERENT PARTS OF THE BOILER ONE CAN CHECK THE DRAFT LOSS BETWEEN SECTIONS. USUALLY IT IS EXPRESSED AS INCHES OF WATER GAUGE.

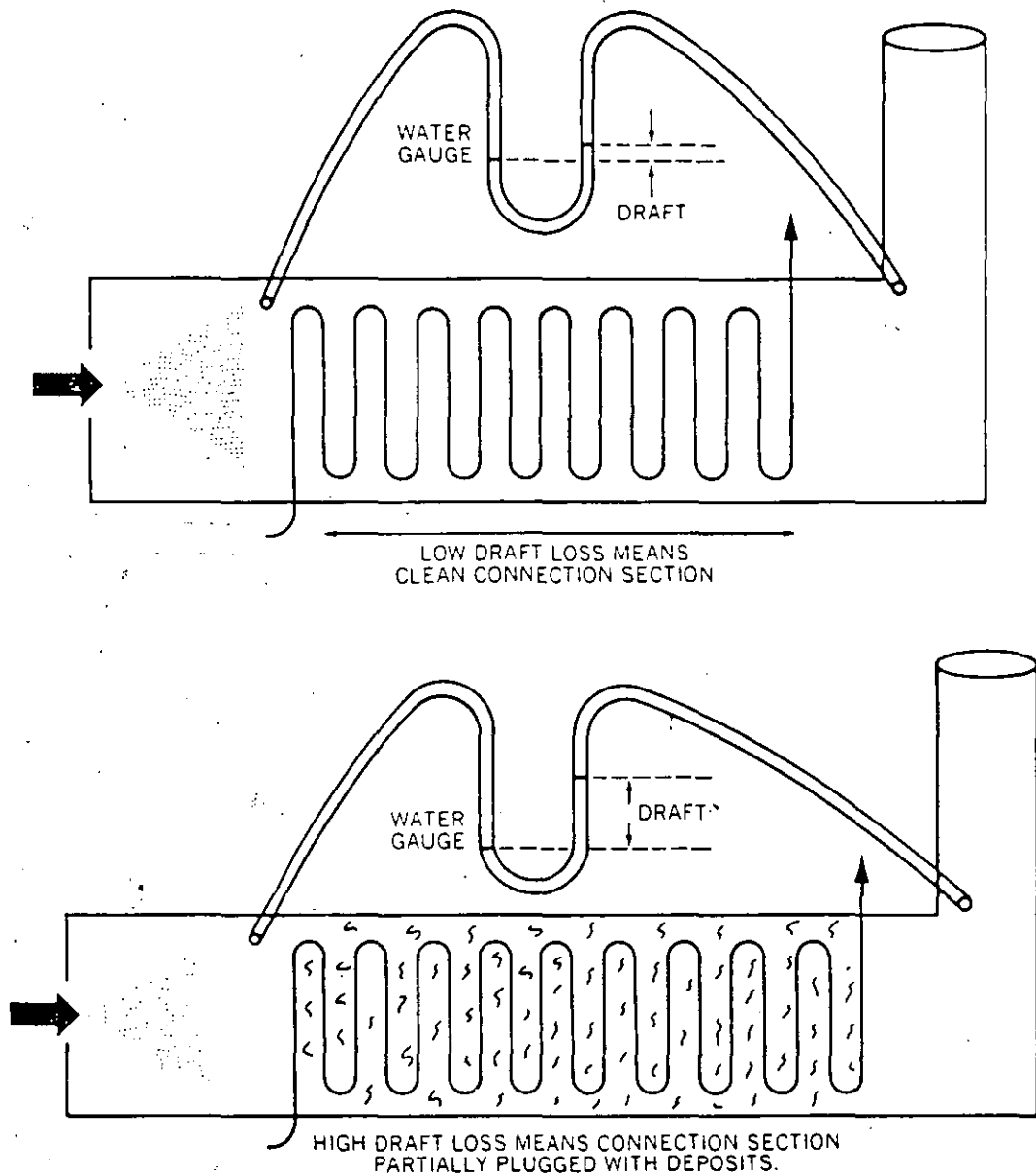


Figure 5

MEASUREMENT OF DRAFT LOSS

- ture controls during fluctuating loads
- to sustain clean combustion at 1 or 2 sensitive burners in a burner array that is "out of balance"

Excess air is usually added as combustion air to the furnace. Another source is through leaks in the casing or through out-of-service burners. Excess air entering in this manner is known as tramp air.

Reduction of Excess Air

The reduction of excess air is a major step in improving efficiency. The lower limit of excess air is reached whenever there is incomplete combustion or flame impingement on the tubes. The main causes of excess air are:

- air leaks
- improper draft control
- faulty burner operation

19

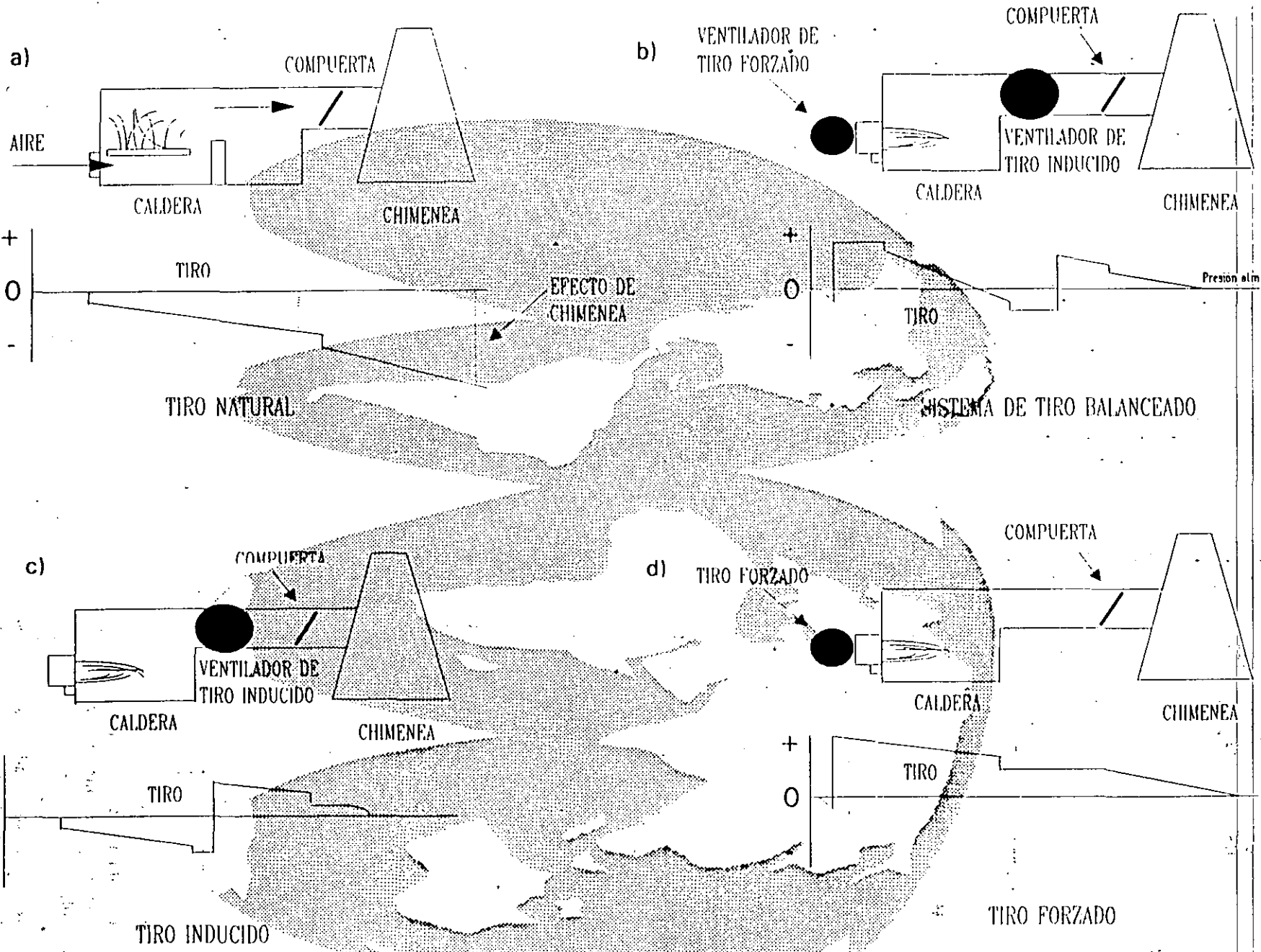


FIGURA 5.9 Gradiente en el Sistema Aire/Gases de Combustión.
a) Tiro Natural; b) Tiro Balanceado; c) Tiro Inducido; d) Tiro Forzado.

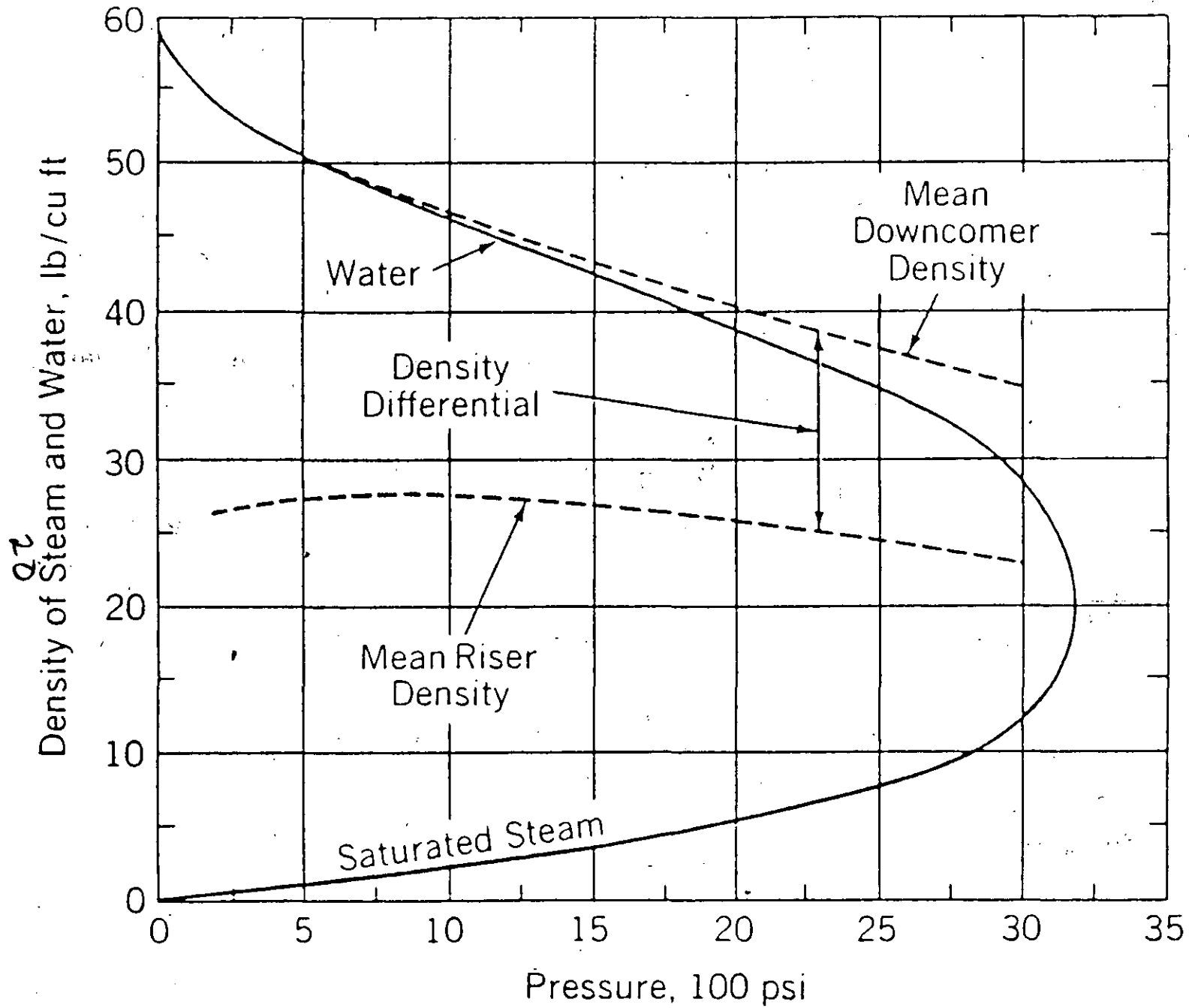


Fig. 17 Effect of pressure on density in downcomers and risers

2 /

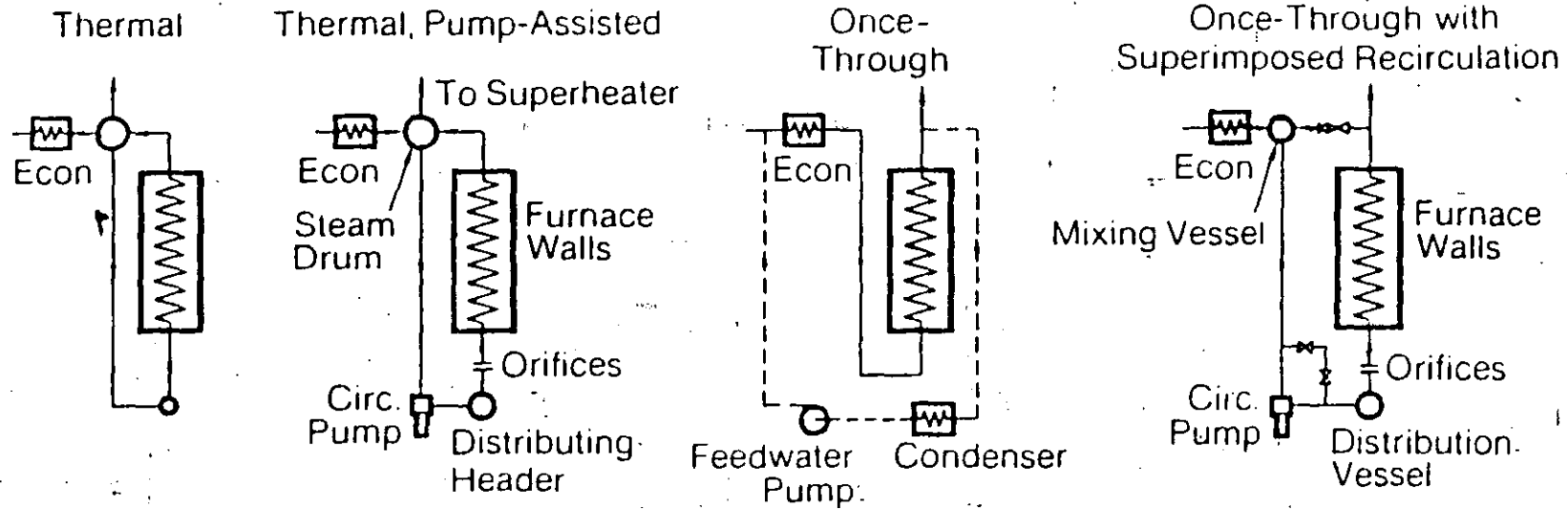


Fig. 7 Steam-generator circulation systems

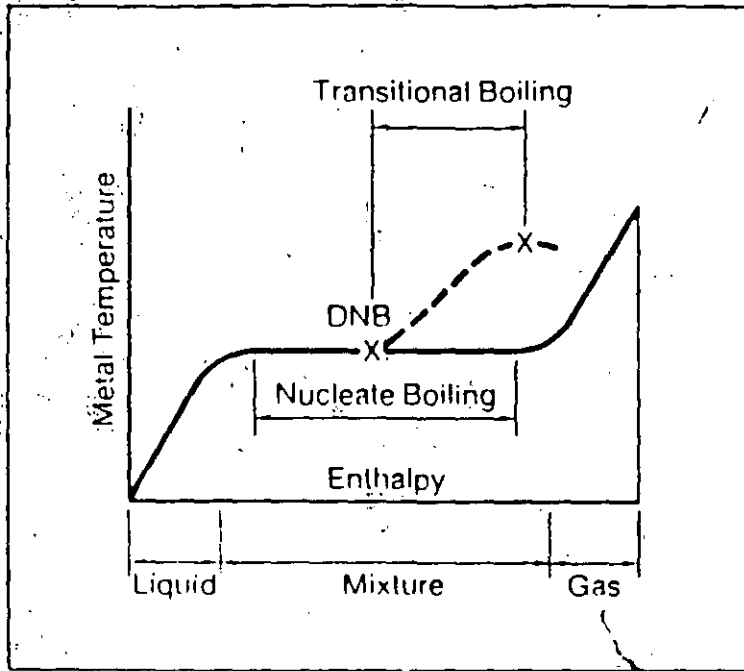


Fig. 8 Inside tube-metal temperature as a function of two-phase flow conditions

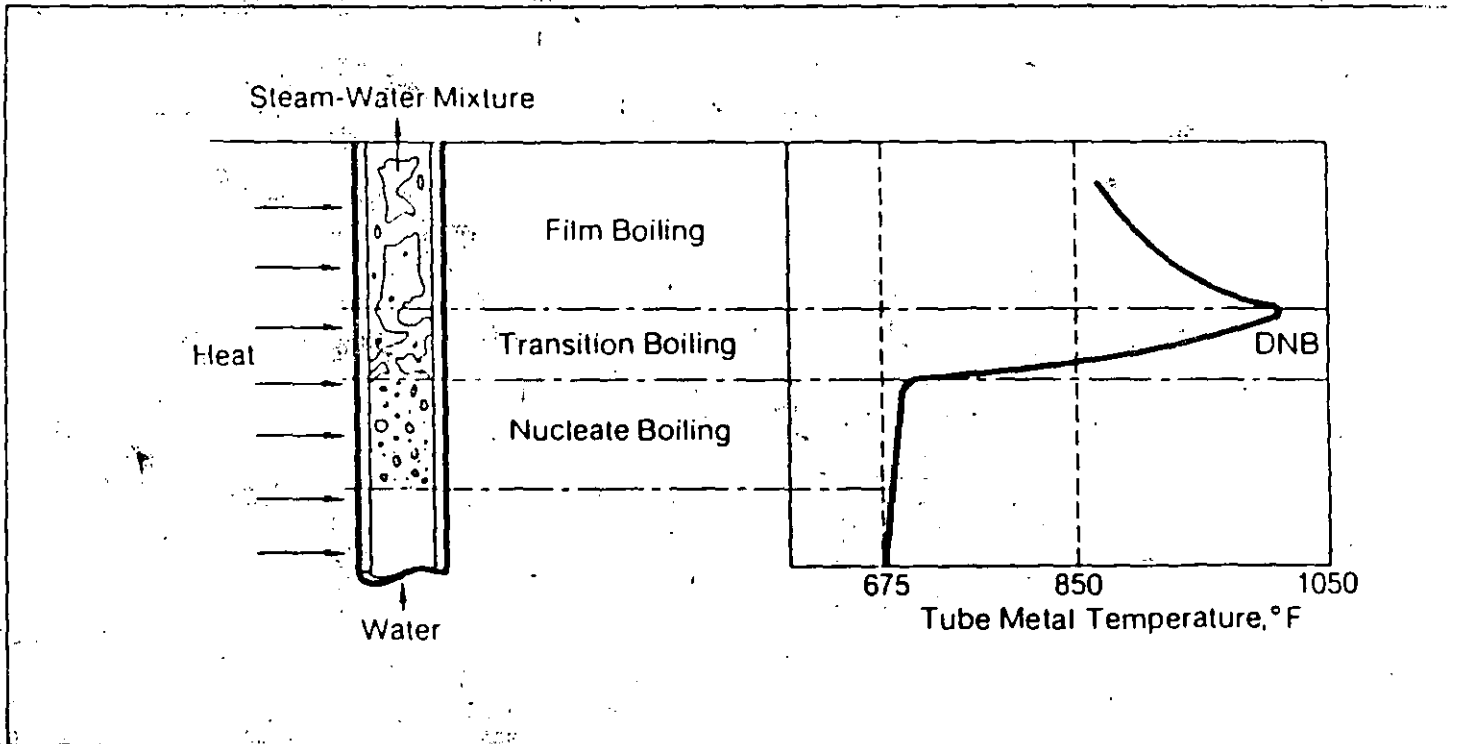


Fig. 9 Effect of DNB on tube metal temperature