

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

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA, UNAM
DIPLOMADO EN INGENIERIA DE CALDERAS Y RECIPIENTES SUJETOS A PRESION
MODULO II: INGENIERIA DE CALDERAS
DEL 27 DE JUNIO AL 6 DE JULIO DE 1996
DIRECTORIO DE ASISTENTES

ING. HUMBERTO ALAMILLA RAMIREZ
INGENIERO DISEÑADOR
INSTITUTO MEXICANO DEL PET.
EJE LAZARO CARDENAS N|152
SAN BARTOLO ATEPEHUACAN GTVO. A.MAD.
07730 MEXICO D.F.
3 68 93 33 EXT.20967

ROBERTO BUTRON FEREGRINO
GTE. DE SEGURIDAD INDUSTRIAL
COMISION FED. DE ELECTRICIDAD
DON MANUELITO N|32
OLIVAR DE LOS PADRES ALVARO OBREGON
01780 MEXICO D.F.
6 45 59 99

ING. VICTOR MANUEL CHAVEZ ISLAS
JEFE DE SERVICIOS GENERALES
JANSSEN FARMACEUTICA S.A. DE CV
CANOA N|79
TIZAPAN SN. ANGEL ALVARO OBREGON
01090 MEXICO D.F.
3 27 24 15

ING. TONATIUH FONSECA VALLADARES
SUPERVISOR DE SERV.
SCHERING PLOUCH.
16 DE SEPT. NO. 715
XALTOCAN XOCHIMILCO
MEXICO, D. F.
705-33-14

ING. JESUS MANUEL GARCIA GUERRERO
JEFE DE FRENTE
ICA F.D.
INTERIOR REFINERIA MIGUEL HERD.
TULA HIDALGO
HIDALGO
6 72 05 48

ING. JOSE LUIS MORA RODRIGUEZ
INGENIERO EN VENTAS TECNICAS
MELCO DE MEXICO
MARIANO ESCOBEDO N|69
INDUSTRIAL TLAL. TLALNEPANTLA
54030 ESTADO DE MEXICO
3 90 73 44/ EXT.111

ING. RAFAEL ROJAS CORTEZ
ANALISTA LABORAL
DELEGACION FEDERAL DEL TRABAJO
31 PTE. No 2904
EL VERGEL
PUEBLA, PUEBLA
49 88 14

ING. JOSE ALEJANDRO ROJO CALDERON
JEFE EN TURNO
CERVECERIA MODELO, SA DE CV
LAGO ALBERTO No 156
ANAHUAC MIGUEL HIDALGO
11320 MEXICO D.F.
2 62 12 65



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

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA, UNAM
DIPLOMADO EN INGENIERIA DE CALDERAS Y RECIPIENTES SUJETOS A PRESION
MODULO II: INGENIERIA DE CALDERAS
DEL 27 DE JUNIO AL 6 DE JULIO DE 1996
DIRECTORIO DE ASISTENTES

MARIO ROMERO GARCIA
INGENIERO DE PLANTA Y PROYECTO
BAYER DE MEXICO, SA DE CV
VIA MORELOS No 300-E
SANTA CLARA
55200 ECATEPEC, EDO DE MEXICO
728 30 00

ING. HUMBERTO RAFAEL TORRES ESTRADA
COORDINADOR DE INSPECTORES FED
S.T. Y P.S.
KM 1.5 CARRETERA PICACHO-AJUSCO
TORRES DE PADIERNA TLALPAN
MEXICO D.F.
645 59 99 645 58 50

ING. JAVIER TORRES GUERRERO
ASESOR EDUCATIVO
BAYER DE MEXICO, SA DE CV
MIGUEL CERVANTES SAAVEDRA No 259
MEXICO D.F.

ING. ARACELI CARRASCO MORALES
INSPECTOR FEDERAL DEL TRABAJO
SRIA. DE TRABAJO Y PREV.SOCIAL
KM.1.5 CARRETERA PICACHO AJUSCO
TORRES DE PADIERNA TLALPAN
14420 MEXICO D.F.
7 40 50 87

ING. GUILLERMO ZARAGOZA GARCIA
INSPECTOR FEDERAL DEL TRABAJO
SRIA. DE TRABAJO Y PREV.SOCIAL
CARRETERA PICACHO AJUSCO KM. 1.5
TORES DE PADIERNA TLALPAN
14420 MEXICO D.F.
6 45 01 08

ING.VICTOR PEDRO PEREZ
INSPECTOR FEDERAL DEL TRABAJO
SRIA.DEL TRABAJO Y PREV.SOCIAL
CARRETERA PICACHO AJUSCO N|714
TORRES DE PADIERNA TLALPAN
14420 MEXICO D.F.
6 45 01 08



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

**DIPLOMADO EN INGENIERIA DE CALDERAS Y
RECIPIENTES SUJETOS A PRESION**

MODULO II: INGENIERIA DE CALDERAS

CALDERAS DE POTENCIA (ASME SEC. II)

Presentado por : **ING. ALBERTO PLAUCHU LIMA**

1996

Calderas de Potencia (ASME Sec. I)

***Expositor:* Ing. Alberto Plauchú Lima**



COLEGIO DE INGENIEROS MECÁNICOS Y ELECTRICISTAS

FACULTAD DE INGENIERÍA-U.N.A.M.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

DIPLOMADO

**INGENIERÍA DE CALDERAS Y
RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN**

CALDERAS DE POTENCIA

MÓDULO II

INGENIERÍA DE CALDERAS

INSTRUCTORES

ALBERTO PLAUCHO L.

DIPLOMADO DE INGENIERÍA DE CALDERAS Y RECIPIENTES SUJETOS A PRESIÓN

INSTRUCTORES:
ALBERTO PLAUCHU L.

MÓDULO II. INGENIERÍA DE CALDERAS

PARTE 1 - CALDERAS DE POTENCIA.

A. GENERALIDADES.

- * FUNCIÓN DEL GENERADOR - CLASIFICACIÓN - CAPACIDAD - EFICIENCIA - DISPONIBILIDAD - CONTROL.

B. COMPONENTES DE UNA CALDERA.

- * DOMOS - CABEZALES - PAREDES - ECONOMIZADORES - SOBRECALENTADORES - ATEMPERADORES - CUBIERTAS - CAJAS DE AIRE Y DUCTOS - CALENTADORES DE AIRE - VENTILADORES - QUEMADORES - CHIMENEAS - ESTRUCTURA.

C. CIRCULACIÓN.

- * CONCEPTOS BÁSICOS - TIPOS DE CIRCULACIÓN - RANGOS DE APLICACIÓN.

D. DISEÑO TÉRMICO.

- * CONCEPTOS BÁSICOS - MODOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR - ABSORCIÓN EN DIFERENTES COMPONENTES - BALANCE TÉRMICO EN UNA CALDERA.

E. ESPECIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CALDERAS.

- * PROBLEMAS CON CALDERAS EN SERVICIO - CAUSAS DE ESPECIFICACIÓN DEFICIENTE - ¿QUIÉNES INTERVIENEN? - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE UNA ESPECIFICACIÓN - ALGUNAS SOLUCIONES.

F. CÓDIGO ASME DE CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESIÓN.

- * SECCIÓN I - CALDERAS DE POTENCIA - INTRODUCCIÓN - FILOSOFÍA DEL CÓDIGO - ESTRUCTURA DE LA SECCIÓN I - RELACIÓN CON OTRAS SECCIONES Y CÓDIGOS - DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA - CONCEPTO "CONSTRUIDO A CÓDIGO"

G. USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN CALDERAS.

- * FUNDAMENTOS DE ADMINISTRACIÓN - DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EN LA GENERACIÓN DE VAPOR - GENERACIÓN EFICIENTE DE VAPOR - INFLUENCIA DEL CONTROL EN LA EFICIENCIA - MÉTODOS DE CÁLCULO DE EFICIENCIA - CONCLUSIONES.

CALDERAS, COMBUSTIBLES Y COMBUSTION

El empleo de vapor como fuerza motriz, se remota a muchos años atrás, los primeros registros con que se cuenta datan del siglo I a.C. Sin embargo estos fueron intentos aislados, no siendo hasta a principios del siglo XVIII cuando se inicia formalmente la utilización del vapor en forma generalizada. Las primeras calderas que se emplean fueron las del tipo tetera (Shell), un gran recipiente relleno de agua y calentada en su parte inferior; de forma simultánea surgieron las primeras calderas de tubos de humo. Por las características del diseño (calentamiento directo de los recipientes a presión, que contenían grandes volúmenes de agua en condiciones de vapor saturado) estas primeras calderas estuvieron sujetas a explosiones y accidentes, habiendo puesto en riesgo el desarrollo industrial de la época.

A raíz de esa problemática se buscó el diseño que pudiera otorgar seguridad a la operación de las calderas. Se buscaba desarrollar un diseño de caldera que tuviera la mayor parte de la superficie de calentamiento formado por tubos, los cuales transportaran y permitirán el calentamiento de un volumen de agua menor, produciendo con esto menos presiones y evitando consecuentemente las roturas frecuentes de aquellas partes sometidas a presiones elevadas. Stephen Wilcox introdujo en 1856 una modificación sustancial al diseño tradicional ya descrito, las características básicas de su desarrollo permitían una mejor circulación de agua y una mayor superficie de calentamiento, logrando con ello tener una caldera inherentemente segura.

A partir de entonces se sucedieron una serie de cambios y mejoras, basadas en una utilización generalizada de las calderas en diversos procesos de

producción industrial. Como ejemplo consideramos una caldera típica de finales del siglo XIX, la cual quemaba como combustible carbón, con una cantidad máxima de combustible quemado de 120 kg por m² de parrilla por hora, con una superficie de calefacción de 84 m² y con un rendimiento de 50%.

Cien años después y gracias a la experiencia adquirida en diseño, fabricación y operación se cuenta con calderas de gran confiabilidad. Tanto es el desarrollo que se ha alcanzado con la utilización de las calderas, que se tiene un amplio espectro del tamaño de ellas para diferentes usos, disponiéndose desde la pequeña usada para la calefacción casera, hasta las enormes usadas para la producción de energía eléctrica.

Como ejemplo de una caldera actual, mencionaremos algunas características de una caldera usada por CFE para generar 300 MW de energía eléctrica. Esta quema combustible a razón de 80 ton por hora, a plena carga con 16 quemadores dispuestos en 4 niveles en forma tangencial; produce 975 ton de vapor sobrecalentado, posee una superficie de calefacción de 23,125 m² y operan con eficiencias de alrededor del 89%. En los más de 100 años transcurridos desde la modificación realizada por Wilcox, los conocimientos sobre el vapor y el agua han aumentado grandemente, sus propiedades han sido determinadas y tabuladas adecuadamente, se han obtenido nuevos conocimientos de transmisión de calor, flujo de fluidos y circulación de agua-vapor, así como medios para quemar grandes cantidades de combustibles y procesar los subproductos de la combustión con equipos de control de emisiones. Se han fabricado aceros y aleaciones más fuertes y consistentes en sus propiedades, los métodos de fabricación de tuberías y recipientes son más avanzados; además se han adoptado códigos y normas para regular el diseño, fabricación e inspección de todas aquellas partes sujetas a presión.

Si bien es cierto que se han tenido grandes avances tecnológicos, por otro lado han surgido limitantes muy importantes para el empleo indiscriminado de calderas o de cualquier equipo de combustión, como son:

- Los altos índices de contaminación atmosférica, sobre todo en las zonas de alta concentración industrial y
- Los altos costos de los combustibles

Esas dos características obligan a pensar en la necesidad de implementar programas de ahorro o uso racional de energía, ya que a través de un programa de estos, se abaten tanto los altos costos como los altos índices de contaminación.

Dentro de estos programas se analizan puntos como los siguientes:

- El uso adecuado de los equipos; determinar las condiciones adecuadas de trabajo de acuerdo al diseño (presión de trabajo, temperatura de trabajo, máxima eficiencia o la capacidad mas cercana a la requerida, etc), programas de mantenimiento, supervisión adecuada, etc.
- El uso racional de la energía asociada a los equipos; evitar pérdidas innecesarias (fugas de calor, fugas de vapor, etc), aprovechar el calor de desperdicio o rechazo (utilizar la alta temperatura en los gases de combustión), optimizar la combustión (carburación de los sistemas de combustión) etc.

En lo relativo a equipos de combustión, se analizarán la mayoría de los puntos mencionados, iniciando por las calderas, como equipos de principal importancia en la mayoría de los procesos industriales.

1.1 TIPOS DE CALDERAS Y SUS CARACTERISTICAS

Definición 1

Una caldera es un recipiente cerrado en el cual se calienta agua, se genera vapor o se sobrecalienta, bajo presión o vacío, mediante la aplicación de calor proveniente de la combustión de combustibles, electricidad o energía nuclear.

Definición 2

Una caldera es un sistema sujeto a presión que transfiere calor. Este calor se obtiene de una mezcla de aire - combustible para producir vapor y/o agua caliente.

Las calderas se subdividen generalmente y de acuerdo a su utilización, en cuatro tipos clásicos

- Residencial
- Comercial
- Industrial
- Generación de energía eléctrica (o de potencia)

Para efectos de este curso, nos limitamos a las calderas que transfieren calor proveniente de la combustión de diversos combustibles y para uso industrial

En términos más generales, las calderas se dividen en pirotubulares y acuotubulares, dependiendo de si los tubos contienen los gases de combustión o el agua

1.1.1 CALDERAS PIROTUBULARES

En estas calderas los gases de la combustión son obligados a pasar por el interior de unos tubos, que se encuentran sumergidos en la masa de agua. Todo el conjunto, agua y tubos de gases, se encuentra rodeado por una carcasa exterior. Los gases calientes, al circular por los tubos, ceden calor sensible, el cual se transmite a través de los tubos, al agua.

Estas calderas tienen una presión de trabajo que no excede normalmente de 20 kg/cm^2 , ya que presiones más altas obligarían a espesores de la carcasa demasiado grandes. Su producción de vapor máxima se encuentra alrededor de 25 t/h .

En el contexto de este curso se estudiarán dos tipos de calderas pirotubulares para combustibles líquidos y gaseosos:

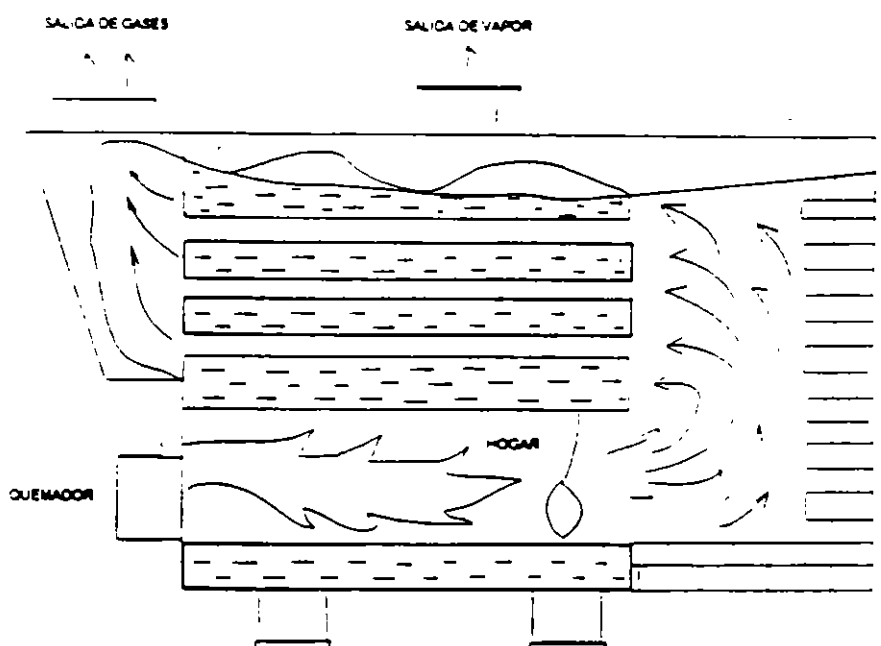
- Calderas de hogar integral
- Calderas compactas con tubo hogar

Calderas Pirotubulares de Hogar Integral

En la Fig. 1.1 se puede ver el esquema de una caldera de este tipo, en el cual se puede ver el tipo de flama que se produce y el paso de los gases de combustión por los tubos en los cuales se lleva a cabo el intercambio de calor. Como se observa, el hogar y los tubos forman una sola unidad.

Comúnmente estas calderas se fabrican en el sitio de operación con material cerámico aislante de alta temperatura.

FIG. 1.1: ESQUEMA DE CALDERA PIROTUBULAR DE HOGAR INTEGRAL



Caldera Piro tubular Compacta con Tubo Hogar

El diseño de estas calderas muestra un tubo central sumergido en el agua, el cual hace de hogar. Los gases de combustión ceden calor a este tubo por radiación. Posteriormente son obligados a pasar por los tubos, los cuales están sumergidos en agua, al igual que en todas las calderas piro tubulares.

Estas calderas tienen las siguientes ventajas.

1. Capacidad de soportar fluctuaciones de carga bruscas y grandes, produciéndose sólo ligeras variaciones en la presión debido a la gran cantidad de agua almacenada.
2. Bajo costo inicial
3. Bajo costo de mantenimiento
4. Simplicidad de instalaciones que sólo exigen la cimentación y las interconexiones de la caldera a las redes de agua, vapor, combustible y electricidad, ya instaladas previamente de la fábrica.

Este tipo de caldera es el de mayor utilización en la industria nacional por las ventajas ya mencionadas, además de que en condiciones adecuadas de operación y mantenimiento pueden trabajar con rendimientos hasta el 90% o más. Generalmente proporcionan vapor a dos niveles, bajo hasta 10.5 kg/cm² y alto hasta 20 kg/cm², la producción de vapor alcanza hasta 25 t/h.

A pesar de las ventajas anteriores, las calderas piro tubulares presentan ciertos problemas y limitaciones como son: restricciones en tamaño y capacidad por resistencia de la carcasa, tensiones térmicas y peligro de explosión por el efecto combinado de lo anterior y las incrustaciones, así como por otras causas.

Lo anterior ha conducido a la construcción de calderas acuotubulares, en las cuales los gases de combustión pasan por el exterior de tubos que conducen agua, vapor o una mezcla de ambas.

1.1.2 CALDERAS ACUOTUBULARES

Como ya se mencionó anteriormente, el diseño de estas calderas totalmente diferente al de las piro-tubulares, ya que los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, mientras que por su interior lo hace el agua, posteriormente agua-vapor y finalmente vapor.

Estas calderas tienen un gran espectro de producción de vapor, la cual puede variar desde una pequeña producción de vapor, calderas compactas, hasta las grandes producciones de vapor, calderas de centrales termoeléctricas, funcionando en condiciones en extremo críticas del vapor. En la industria, comúnmente, se utilizan las calderas de vapor acuotubulares que operan a presiones inferiores a 64 kg/cm^2 y temperaturas por abajo de 450°C . Como una clasificación general, se consideran calderas acuotubulares pequeñas y medianas las que tienen capacidades de vaporización desde 3 hasta 100 toneladas/hora, estas a su vez se clasifican en diferentes tipos.

Calderas Acuotubulares Compactas

Debido a su gran demanda, los fabricantes de calderas más importantes construyen este tipo de calderas, las cuales tienen como característica predominante que se construyen totalmente en los talleres del fabricante y se venden y envían como un paquete al lugar de su utilización. En principio pueden suministrarse para quemar cualquier tipo de combustible (combustible, gasóleo, diesel, gas natural o licuado, e inclusive carbón), variando lógicamente con el tipo de combustible las características tanto del hogar como de los sistemas de combustión y sus diferentes accesorios periféricos.

Por la característica ya mencionada anteriormente (paquete en el cual el cierre de los gases suele estar formado por paredes membrana por las que circula el agua o la mezcla agua-vapor) estas calderas requieren poca obra civil para su instalación. Comúnmente los diferentes autores identifican dos tipos de calderas y son

a) De Hogar Integral Pequeñas

Son calderas con una producción de vapor de hasta 30t/h. El hogar está recubierto de unas paredes membranas. El tiro es forzado y los quemadores van incluidos en la caldera.

Véanse las Figs. 1 2 y 1 3, en donde se muestran calderas de este tipo para diferentes tipos de combustible.

Las calderas compactas de hogar integral pequeñas son recomendables, para los siguientes casos:

1. Cuando se requiere una rápida instalación
2. Cuando se dispone de poco espacio
3. Cuando puede ser necesario el traslado de la caldera a otra localización
4. Cuando el proceso requiere una mayor presión de vapor que la suministrada por una piro-tubular compacta

b) De Hogar Integral Grandes

Estas son calderas de mayor producción de vapor, 200t/h, también tienen el hogar recubierto de paredes membrana, son de tiro forzado en su mayoría (puede haber de tiro balanceado).

En las Figs. 1 4 y 1 5 aparecen calderas de este tipo para diferentes combustibles.

FIG. 1.2: CALDERA COMPACTA DE HOGAR INTEGRAL PEQUEÑA PARA COMBUSTOLEO O GAS

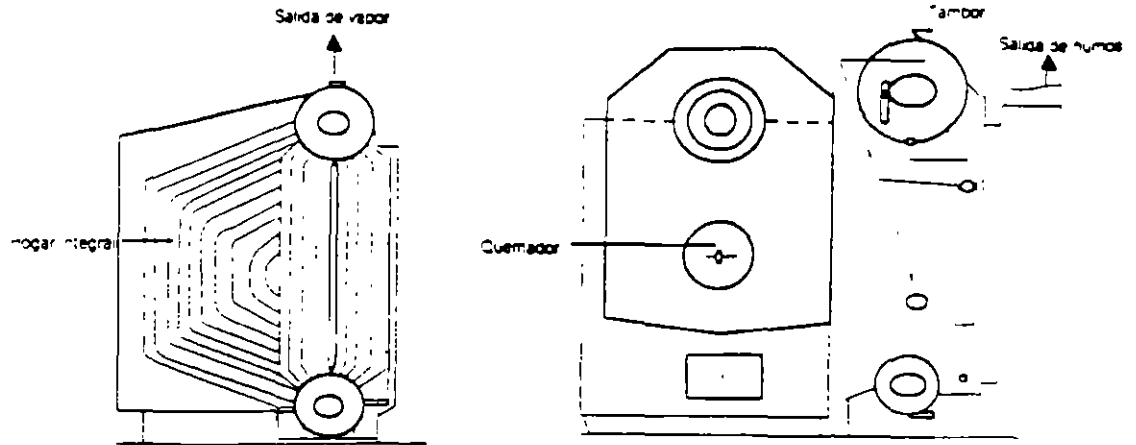


FIG. 1.3: CALDERA COMPACTA DE HOGAR INTEGRAL PEQUEÑA EN VERSION PARA CARBON Y EN VERSION PARA COMBUSTOLEO O GAS NATURAL

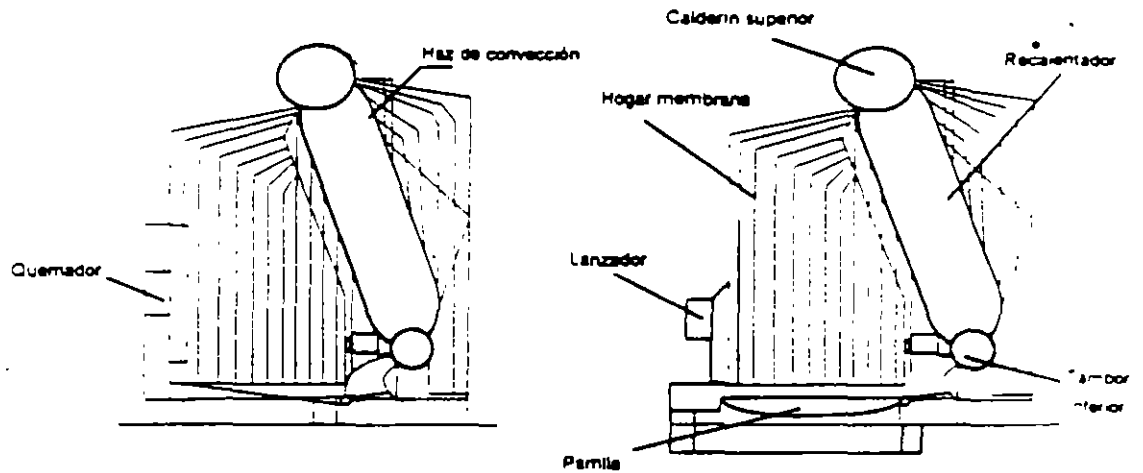


FIG. 1.4: CALDERA COMPACTA DE HOGAR INTEGRAL GRANDE PARA COMBUSTOLEO O GAS

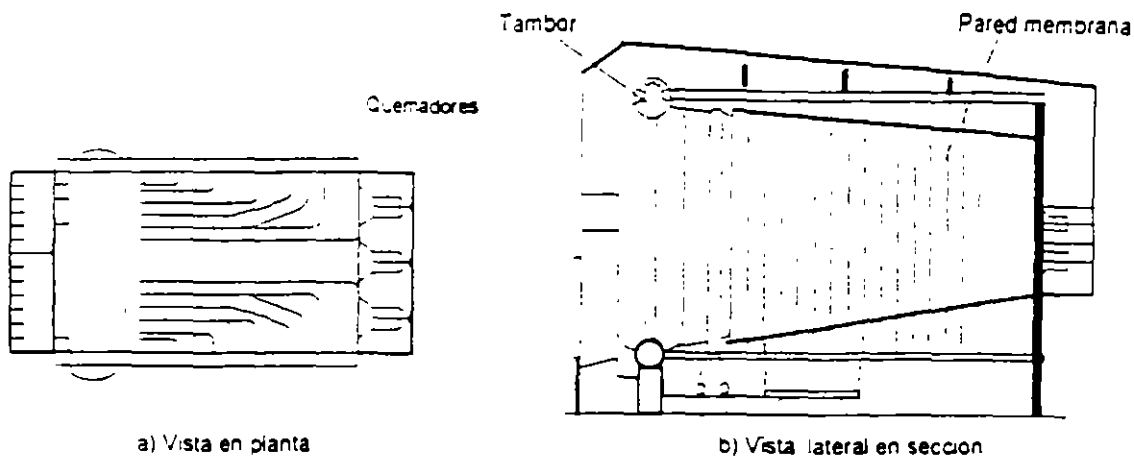
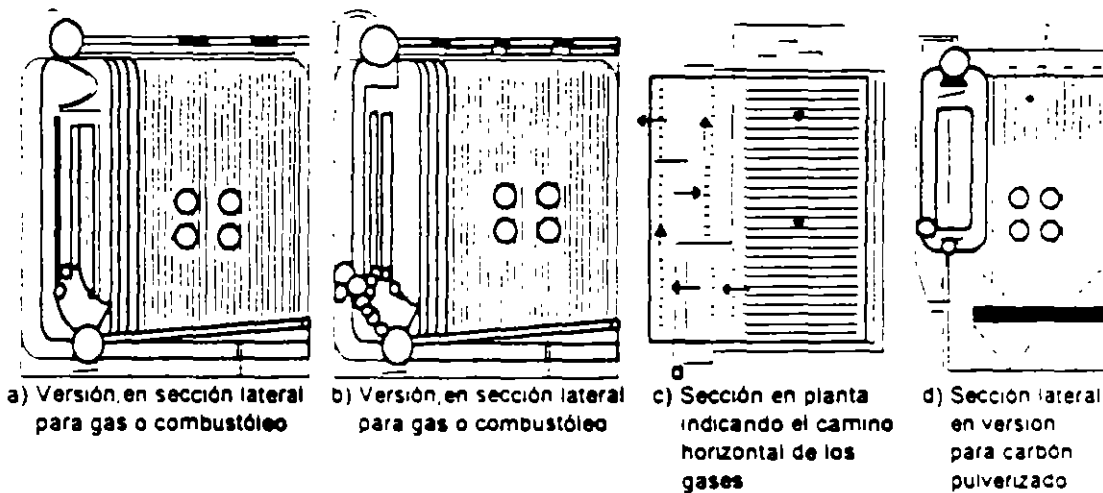


FIG. 1.5: CALDERA COMPACTA DE HOGAR INTEGRAL GRANDE, VERSION PARA CARBON Y VERSION PARA COMBUSTOLEO O GAS NATURAL



Las calderas compactas de hogar integral grande son aplicables para los siguientes casos

1. Producción de vapor requerida para generación de energía o para utilización en proceso

- 2 Cuando las limitaciones de espacio obliguen a la optimización de éste
- 3 Cuando los requerimientos de vapor sean superiores a los de calderas de hogar integral pequeñas

Existen otros tipos de calderas que no serán analizadas en este curso y sólo se mencionarán

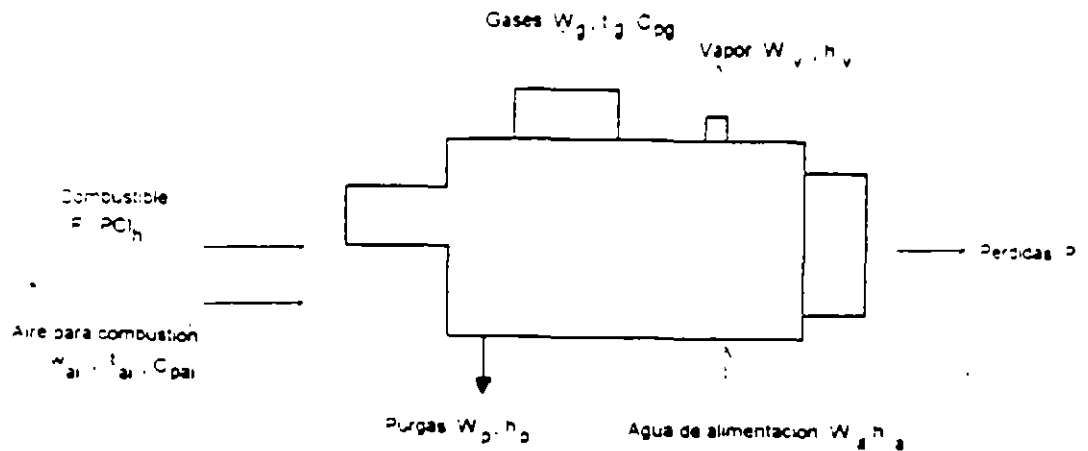
- Calderas Acuotubulares No Compactas
 - Tubos rectos
 - Tubos curvos
- Calderas Acuotubulares de Alta Presión y Alta Temperatura
- Calderas de Lecho Fluidizado
 - Burbujeante
 - Circulante
 - Presurizado

1.3 RENDIMIENTO DE LAS CALDERAS DE VAPOR

Para conocer como esta funcionando una caldera de vapor y poder tomar acciones encaminadas a una mejor operación y por ende, un funcionamiento más eficiente, se requiere conocer el rendimiento de dicho equipo. Para obtener dicho rendimiento, considerado éste como la relación de calor aprovechado a calor aportado, es necesario realizar balances tanto de masa como de energía.

En la Fig. 1.6 se pueden observar esquemáticamente los diferentes componentes que intervienen en el balance de masa y energía en una caldera

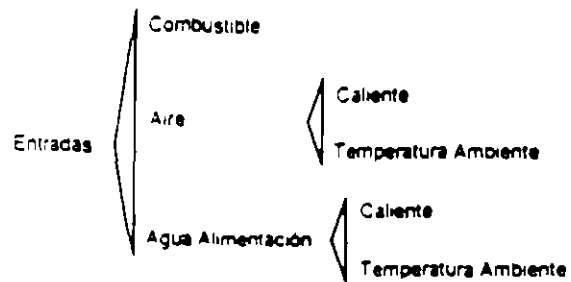
FIG. 1.6: ESQUEMA DE VARIABLES PARA BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN UNA CALDERA



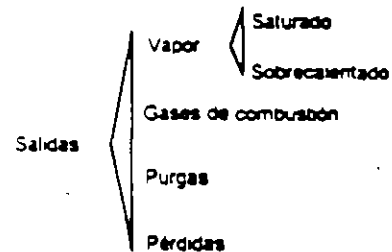
Donde:

- W_a = Flujo de agua de alimentacion, kg/h
- h_a = Entalpia de agua de alimentacion, kcal/kg
- W_v = Flujo de vapor, kg/h
- h_v = Entalpia de vapor, kcal/kg
- W_p = Flujo de purgas, kg/h
- h_p = Entalpia de agua de purgas, kcal/kg
- F = Flujo de combustible, kg/h
- PCI_h = Poder calorifico inferior del combustible humedo kcal/kg
- W_{ai} = Flujo de aire de combustion, kg/h
- t_{ai} = Temperatura de aire de combustion, °C
- C_{pai} = Calor especifico del aire, kcal/kg-°C
- W_g = Flujo de gases de combustion, kg/h
- t_g = Temperatura de gases de combustion, °C
- C_{pg} = Calor especifico de los gases, kcal/kg - °C
- P = Perdidas, kcal/h

Como puede verse las entradas a la caldera son:



mientras que las salidas son



Si se toma en cuenta que para cada una de las salidas y entradas hay asociada una energía, puede prepararse el siguiente cuadro.

ENTRADAS	FLUJO MASICO	ENERGIA ENTRANTE
Combustible	F	$F \times PCIh$
Aire	W_{a1}	$W_{a1} \times C_{p_{a1}} \times t_{a1}$
Agua	W_a	$W_a \times h_a$

Para las salidas el cuadro equivalente es:

SALIDAS	FLUJO MASICO	ENERGIA SALIENTE
Vapor	W_v	$W_v \times h_v$
Gases	W_g	$W_g \times C_{p_g} \times t_g$
Purgas	W_p	$W_p \times h_p$
Pérdidas		P

Las pérdidas para los combustibles líquidos o gaseosos son las siguientes

- Pérdidas debidas a la humedad en el combustible
- Pérdidas debidas a la humedad en el aire
- Pérdidas debidas al calor en el vapor de atomización
- Pérdidas en el combustible no quemado, que sale en los gases de combustion (hollin)
- Pérdidas por radiación y conveccion en superficies exteriores

Para combustibles sólidos son aplicables las pérdidas anteriores mas las siguientes:

- Pérdidas por carbon inquemado
- Pérdidas por calor sensible en escorias
- Perdidas por calor sensible en polvos de los gases
- Pérdidas por calor en reinyectados pulverizados

De los cuadros anteriores y haciendo igual las energias entrantes a las salientes se tiene

$$(F \cdot PCI_h) - (W_{ai} \cdot Cp_{ai} \cdot t_{ai}) + (W_a \cdot h_a) = (W_v \cdot h_v) - (W_g \cdot Cp_g \cdot t_g) + (W_p \cdot h_p) + P$$

Como $W_p = W_a - W_v$, rearreglando se tiene.

$$F \cdot PCI_h = W_v (h_v - h_p) - W_a (h_p - h_a) - W_g \cdot Cp_g \cdot t_g - W_{ai} \cdot Cp_{ai} \cdot T_{ai} - P$$

Como en la mayona de las calderas las purgas son muy pequeñas, la ecuación anterior se puede simplificar por el termino siguiente.

$$W_a = W_v$$

Asimismo, recordemos que el caudal de los gases de combustion esta formado fundamentalmente por el aire aportado para la combustion, entonces:

$$W_{ai} = W_g$$

Quedando:

$$F \cdot PCI_h = W_v (h_v - h_a) + W_g (Cp_g \cdot t_g - Cp_{ai} \cdot t_{ai}) + P$$

Debido a que los gases de combustión están compuestos por gases triatómicos (CO_2 y H_2O), su calor específico es superior al del aire, que está formado por gases diatómicos (O_2 , N_2). La diferencia no llega a ser mayor que un 10%, por lo cual, como una aproximación, puede suponerse que

$$Cp_{ai} = Cp_g$$

Con lo cual la ecuación anterior resulta

$$F \cdot PCI_h = W (h_v - h_a) + W_g \cdot Cp_g (t_g - t_{ai}) + P$$

Sin embargo, si se requiere un cálculo más preciso, se puede determinar el calor específico de los gases Cp_g de la siguiente ecuación

$$Cp_g = \sum_i Cp_i \cdot Y_i$$

Donde,

$$\begin{aligned} Cp_i &= \text{Calor específico del componente } i \text{ en los gases} \\ Y_i &= \text{Fracción volumétrica del componente } i \text{ en los gases} \end{aligned}$$

1.3.1 CALCULO DE RENDIMIENTO

Dicho cálculo es el resultado de dividir la cantidad de calor asociada al vapor por la liberada en la combustión del combustible. Esta definición no toma en cuenta los calores sensibles aportados por el combustible y el aire comburente, al ser éstos mucho menores y por lo tanto despreciables frente al resto.

Su cálculo se puede realizar por cualquiera de los métodos siguientes

Método Directo

Se mide la cantidad total de vapor producido, su temperatura y presión, así como la cantidad de combustible consumido. Conocido el $(PCI)_h$ de dicho combustible, determinar el calor Q que suministra. Lógicamente, este rendimiento está medido con respecto al $(PCI)_h$.

A partir de estos datos, medidos unos y tabulados otros, se obtiene el rendimiento por medio de las fórmulas siguientes:

$$\begin{aligned} Q &= F \cdot (PCI)_h \\ E &= \frac{W_v \cdot (h_v - h_a) \cdot 100}{Q} \end{aligned}$$

Donde:

$$E = \text{Rendimiento, \%}$$

Método Indirecto o de Pérdidas Separadas

Se evalúan las siguientes pérdidas:

1. Pérdidas por calor sensible en los gases de combustión

$$P_1 = G_{FH} \cdot C_{pg}(t_g - t_{ai}) \cdot 100 / (PCI)_h$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_1 &= \text{Pérdidas por calor sensible en los gases (\%)} \\ G_{FH} &= \text{Caudal de gases totales (kg gases/kg comb)} \\ C_{pg} &= \text{Calor específico medio de los gases (kcal/kg } ^\circ\text{C)} \\ &C_g = M + N \text{ (M y N son coeficientes variables con la} \\ &\text{temperatura)} \\ t_g &= \text{Temperatura de los gases a la salida (} ^\circ\text{C)} \\ t_{ai} &= \text{Temperatura del aire a la entrada (} ^\circ\text{C)} \\ (PCI)_h &= \text{Poder calorífico inferior húmedo del combustible (kcal/kg)} \end{aligned}$$

2 Pérdidas por inquemados

Una expresión semiempírica que funciona bastante bien para los combustibles líquidos y gaseosos industriales es la siguiente

$$P_2 = \left(\frac{21}{21 - [O_2]} \right) \left(\frac{[CO]}{3100} + \frac{[CH]}{10000} + \frac{OP}{65} \right)$$

Donde

P_2	=	Perdida por inquemados, % sobre el $(PCI)_h$
$[O_2]$	=	Contenido de O_2 en los gases, %
$[CO]$	=	Concentración de CO en los gases, ppm
$[CH]$	=	Concentración de CH en los gases, ppm
OP	=	Opacidad de los gases, %

3 Pérdidas por radiación y otros

Se calcula en tanto por ciento sobre el $(PCI)_h$ para diferentes capacidades de vaporización. Los valores aproximados que se muestran en la Fig. 1-28 son útiles cuando la caldera funciona a su capacidad máxima de vaporización.

Si la caldera funciona a cargas parciales, estas pérdidas son casi inversamente proporcionales al valor porcentual de la carga.

4 Pérdidas totales

$$P = P_1 + P_2 + P_3 (\%)$$

El rendimiento de la caldera, en tanto por ciento, se calcula aplicando la ecuación siguiente

$$E = 100 - P$$

Cálculo del Consumo Puntual de Combustible

El consumo puntual de combustible viene dado por:

$$F = \frac{W_v (h_v - h_a) \cdot 100}{E \text{ PCI}_v}$$

1.3.2 PRODUCCIONES DE VAPOR POR UNIDAD DE COMBUSTIBLE

Este concepto, muy utilizado en la industria, es función de gran cantidad de variables, tales como tipo de combustible, presión y temperatura del vapor, temperatura del agua de alimentación a la caldera y todo tipo de rendimiento que afectan a esta transformación. Por tanto, a continuación se da la expresión correspondiente a un caso general.

$$IE_v = \frac{E \text{ PCI}_v}{100(h_v - h_a)}$$

Donde:

IE_v = Producción de vapor por unidad de combustible
(índice energético), kg vapor/kg combustible

1.7.2 ASPECTOS ENERGETICOS DE LA COMBUSTION

Composiciones seca y Húmeda de Combustibles

Definiciones

Para cualquier clase de combustible se denomina composición húmeda a la fracción de combustible que existe de cada uno de sus componentes, incluyendo la humedad como un componente más. Se denomina composición seca a la fracción del combustible seco que existe de cada uno de sus componentes, es decir una vez eliminada la humedad.

Combustibles Sólidos y Líquidos

Sea un combustible de composición húmeda:

Carbón	C kg/kg comb
Hidrógeno	H kg/kg comb
Azufre	S kg/kg comb
Nitrógeno	N kg/kg comb
Oxígeno	O kg/kg comb
Humedad	M kg/kg comb
Cenizas	A kg/kg comb

$$C + H + S + N + O + M + A = 1$$

Su composición seca será:

Carbón	C' kg/kg comb seco
Hidrógeno	H' kg/kg comb seco
Azufre	S' kg/kg comb seco
Nitrógeno	N' kg/kg comb seco
Oxígeno	O' kg/kg comb seco
Cenizas	A' kg/kg comb seco

$$C' + H' + S' + N' + O' + A' = .$$

Las relaciones entre las dos composiciones son:

$$\begin{aligned} C &= C' (1 - M) \\ H &= H' (1 - M) \\ S &= S' (1 - M) \\ N &= N' (1 - M) \\ O &= O' (1 - M) \\ A &= A' (1 - M) \end{aligned}$$

Combustibles Gaseosos

Sea un combustible gaseoso de composición húmeda:

Hidrógeno	$H_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Monóxido de carbono	$CO \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Sulfuro de hidrógeno	$SH_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Diversos hidrocarburos	$\Sigma C_m H_n \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Nitrógeno	$N_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Bióxido de carbono	$CO_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Oxígeno	$O_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$
Agua	$H_2O \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb}$

$$H_2 + CO + SH_2 + N_2 + CO_2 + O_2 + H_2O + \Sigma C_m H_n = 1$$

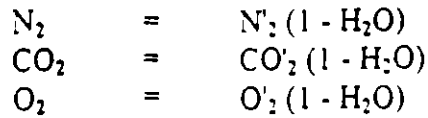
Su composición seca será

Hidrógeno	$H'_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Monóxido de carbono	$CO' \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Sulfuro de hidrógeno	$SH'_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Diversos hidrocarburos	$\Sigma C_m H_n' \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Nitrógeno	$N'_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Bióxido de carbono	$CO'_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$
Oxígeno	$O'_2 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3 \text{ comb seco}$

$$H'_2 + CO' + SH'_2 + \Sigma C_m H_n' + N'_2 + CO'_2 + O'_2 = 1$$

Las relaciones entre las dos composiciones son:

$$\begin{aligned} H_2 &= H'_2 (1 - H_2O) \\ CO &= CO' (1 - H_2O) \\ SH_2 &= SH'_2 (1 - H_2O) \\ \Sigma C_m H_n &= \Sigma C_m H_n' (1 - H_2O) \end{aligned}$$



Poderes Caloríficos de Combustibles

Definiciones

El poder calorífico superior seco (PCS)_s. Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible seco, quedando finalmente el agua formada en la combustión en forma líquida a 0°C y a 1 atm (kcal/unidad comb seco)

Poder calorífico superior húmedo (PCS)_h. Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible quedando finalmente el agua formada en la combustión en forma líquida a 0°C y a 1 atm (kcal/unidad comb)

Poder calorífico inferior seco (PCI)_s. Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible seco, quedando finalmente el agua en forma de vapor (kcal/unidad comb seco)

Poder calorífico inferior húmedo (PCI)_h. Es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible, quedando finalmente el agua en la combustión en forma de vapor (kcal/unidad comb)

La diferencia entre el poder calorífico superior y el inferior radica en la entalpía de vaporización del agua.

En el Sistema Internacional (S I.), los poderes caloríficos se expresan en kJ por unidad de combustible (1 kJ = 4 186 kcal).

Combustibles Sólidos y Líquidos

Se pueden aplicar las siguientes fórmulas aproximadas:

$$(PCS)_s = 8,100 C' + 34,200 (H' - O'/8) + 2,500 S' \text{ kcal/kg comb seco}$$

$$(PCS)_h = 8,100 C - 34,200 (H - O/8) + 2,500S \text{ kcal/kg comb}$$

$$(PCS)_h = (PCS)_s (1 - M)$$

$$(PCI)_s = 8,100C' - 34,200 (H'-O'/8) - 2,500S' - 5,400 H' \text{ kcal/kg comb seco}$$

$$(PCI)_h = 8,100C - 34,200(H-O/8) - 2,500S - 600M - 5,400H \text{ kcal/kg de comb}$$

$$(PCI)_h = (PCI)_s (1 - M) - 600M \text{ kcal/kg comb}$$

Combustibles Gaseosos

Se pueden aplicar las siguientes fórmulas aproximadas:

$$(PCS)_s = 3,050H'_2 + 3,020CO' + 6,070SH'_2 + 9,500CH'_4 - \\ 16,810C_2H'_6 - 24,300C_3H'_8 - 31,610C_4H'_{10} - \\ 37,780C_5H'_{12} + 15,140C_2H'_4 + 14,060C_2H'_2 - \\ 35,190C_6H'_6 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ comb seco}$$

$$(PCS)_h = (PCS)_s (1 - H_2O) + 482 H_2O \text{ kcal/Nm}^3 \text{ comb}$$

$$(PCI)_s = 2,570H'_2 + 3,020CO' + 5,590SH'_2 + 8,535CH'_4 - \\ +15,365C_2H'_6 + 22,370C_3H'_8 + 29,200C_4H'_{10} - \\ 34,890C_5H'_{12} - 14,176C_2H'_4 + 13,580C_2H'_2 - \\ 33,740C_6H'_6 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ comb seco}$$

$$(PCI)_h = (PCI)_s (1 - H_2O) \text{ kcal/Nm}^3 \text{ comb}$$

Si $Q_{is} = 0$ y $Q_{CH} = 0$ (caso aproximado de combustión de gases)

Pérdidas por Calor Sensible de los Gases

Los gases de combustión poseen un cierto contenido energético, el cual es fundamental cuantificar, para posteriormente llevar a cabo las medidas pertinentes para evitar tal situación o aprovechar la energía existente en ellos

Las pérdidas por calor sensible de los gases de combustión, se pueden expresar, referidas a los gases de salida, o bien al combustible de alimentación:

- Pérdidas referidas a los gases:

$$\text{Pérdidas} = W_g \times C_{p_g} \times (t_g - t_{a1}),$$
- Pérdidas referidas al combustible

$$P_1 = G_{FH} \times C_{p_g} \times (t_g - t_{a1})$$

Donde:

P_1	Pérdidas por calor sensible en los gases (kcal/kg comb)
G_{FH}	Flujo de gases totales (kg gases/kg comb)
C_{p_g}	Calor específico medio de los gases (kcal/kg gases $^{\circ}$ C)
t_g	Temperatura de los gases a la salida ($^{\circ}$ C)
t_{a1}	Temperatura del aire a la entrada ($^{\circ}$ C)

La expresión anterior se puede transformar en:

$$P_1 = \frac{G_{FH} \times C_{p_g} \times (t_g - t_{a1})}{PCI_h} \times 100 [=] \% \text{ sobre la energía suministrada}$$

Para el cálculo de la pérdida P_1 , de los combustibles sólidos o líquidos, se puede utilizar la expresión anteriormente indicada o bien, aproximadamente, la fórmula de Sieggert

$$P_1 = K \frac{t_g - t_{a1}}{CO_2 + SO_2} [=] \% \text{ sobre la energía suministrada}$$

Donde:

$(CO_2 + SO_2)$ Suma de las concentraciones de CO_2 y SO_2 en los humos secos (%).

El valor de K para aplicar en esta expresión viene dado por la siguiente tabla aproximada:

Hulla	K	=	0.63
Antracita	K	=	0.68
Diesel	K	=	0.59
Combustoleo	K	=	0.56

Pérdidas por Inquemados

Las pérdidas por inquemados se pueden calcular aproximadamente por la siguiente expresión

$$P_2 (\%) = \frac{21}{21 - (O_2)} \left(\frac{CO}{3,100} + \frac{CH}{1,000} + \frac{OP}{65} \right)$$

Donde:

P_2	Pérdidas por inquemados (% sobre la energía suministrada)
O_2	% de O_2 en los gases
CO	ppm de CO en los gases
CH	ppm de C.H.i en los gases (hidrocarburos)
OP	opacidad de los gases (%)

Pérdidas por Radiación y Otras

Estas pérdidas hay que calcularlas en tanto por ciento sobre la energía suministrada, para diferentes capacidades de vaporización. A continuación se da una tabla aproximada, útil para cuando la caldera funciona a su capacidad máxima de vaporización (Fig. 1.28)

FIG. 1.28: PERDIDAS POR RADIACION EN FUNCION DE LA CAPACIDAD MAXIMA DE VAPORIZACION

Vaporización máxima (v/h)	10	50	100
P_3 (% de pérdidas)	2.2	1.75	1.5

Cuando la caldera funciona a cargas parciales las pérdidas por radiación y otros (en %) son, de forma aproximada, inversamente proporcionales al porcentaje de carga

A. Rendimiento de la Combustión

La curva de rendimiento de la combustión y, por tanto, del rendimiento de una caldera, presenta en cada momento un punto máximo A (ver Fig. 1.35) que corresponde a un determinado exceso de aire. Si en estas condiciones este exceso de aire se redujera, el rendimiento se haría menor debido a que aumentan los inquemados. Si el exceso de aire aumentara, se complementarían las reacciones de oxidación, pero se malgastaría energía en calentar el aire en exceso que se introduce.

La curva de CO en función del exceso de aire presenta un codo que coincide con la zona de máximo rendimiento. Si el exceso de aire se reduce, aumenta rápidamente el contenido de CO, debido a que la combustión se efectúa en menor grado. Si el exceso de aire aumenta, el CO se reduce, pero muy lentamente.

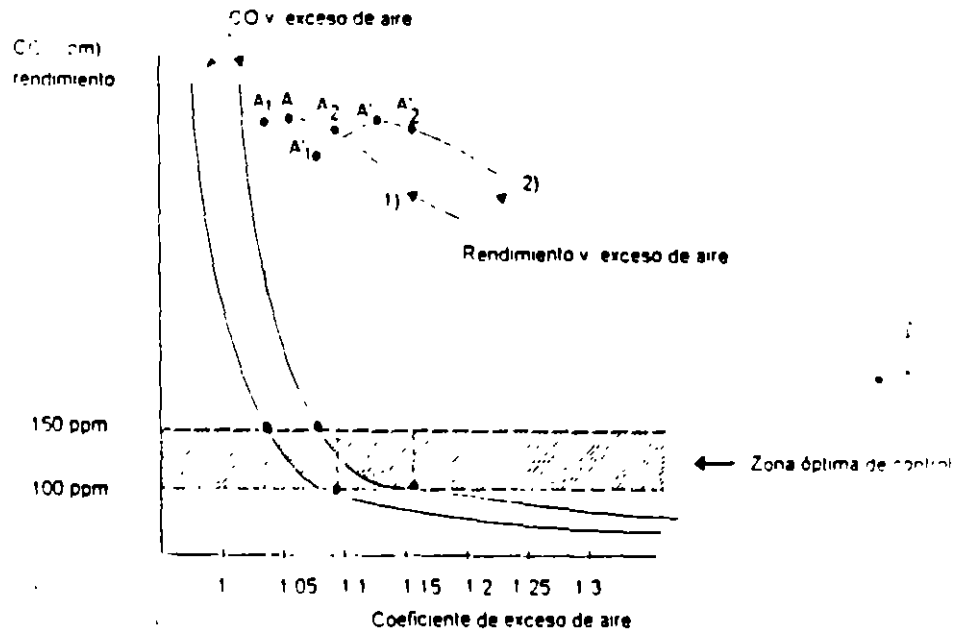
La situación del punto de mejor rendimiento y del codo de la curva de CO, varía de acuerdo a

- El estado de las instalaciones, quemadores, etc
- Las circunstancias de cada momento como son
 - Variaciones climatológicas (temperatura, presión, humedad relativa, viento, etc)
 - Variaciones de carga de la caldera.
 - Variaciones de composición del combustible

Por tanto las curvas son dinámicas, desplazándose en función de estas circunstancias tal como se muestra en la Fig. 1.35 (curvas 1 y 2)

En general se obtendrá la zona de mejor rendimiento siempre que se mantenga el CO en la gama de 100 a 150 ppm, con lo cual el rendimiento se moverá entre los puntos A_1 y A_2 o entre los puntos A_1' y A_2' de las curvas 1 y 2, respectivamente

**FIG. 1.35: CONTROL AUTOMÁTICO DE LA COMBUSTION
MIDIENDO EL CONTENIDO DE MONOXIDO
DE CARBONO**



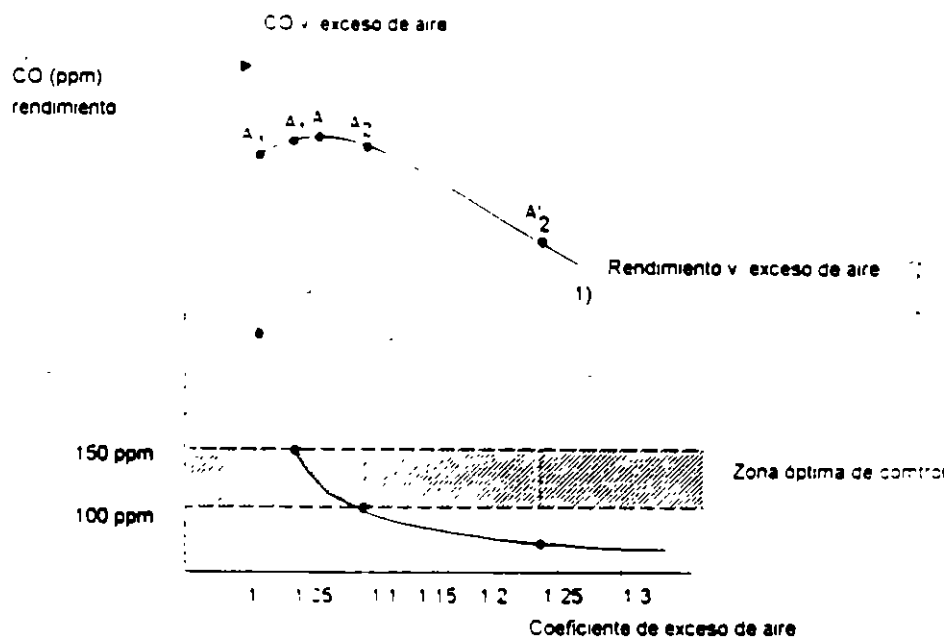
B. Influencia del Control Manual en el Rendimiento

Actualmente se está produciendo un fenómeno curioso en la práctica del control de la combustión. En general los mandos de las fábricas están sensibilizados hacia el ahorro de energía y presionan a los operarios que conducen las calderas para que intenten reducir el exceso de aire en la combustión. Los operarios, al no disponer de medios, efectúan esta reducción (a ojo) moviéndose, por ejemplo, sobre la curva (Fig. 1.36) entre los puntos A_1 y A_2 . Con ello se producen dos efectos

- Los valores del rendimiento (A'_1 y A'_2) en general son muy inferiores a los obtenidos mediante control por CO (A_1 y A_2).
- En muchas ocasiones, al entrar en la zona de bajo exceso de aire para las condiciones relativas de funcionamiento, obtienen un porcentaje alto de inquemados (A'_1)

Estos mismos efectos se producen en las curvas correspondientes a otras condiciones de trabajo. En términos generales los resultados son en ocasiones, más perjudiciales que beneficiosos.

FIG. 1.36: FUNCIONAMIENTO EN CONTROL MANUAL

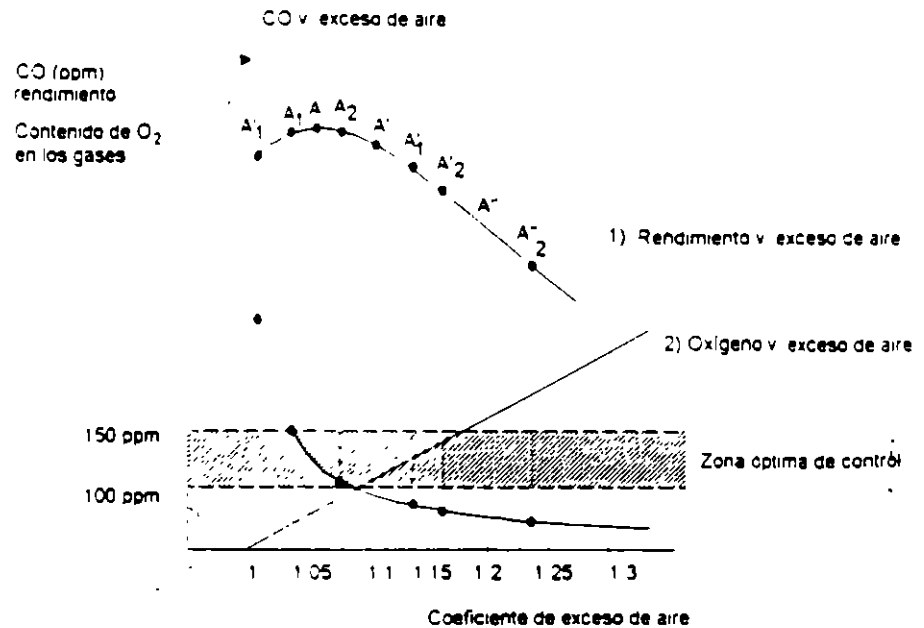


C. Influencia del control por oxígeno en el rendimiento

El contenido medido de oxígeno en los gases debería ser teóricamente una función lineal del exceso de aire (Fig. 1.37, curva 2). Sin embargo, esta relación queda alterada en la práctica por tres circunstancias.

- Los inquemados que se producen
- Las entradas, en el circuito de gases, de aire del exterior
- El error de medición del equipo

FIG. 1.37: FUNCIONAMIENTO TÍPICO CON CONTROL CORREGIDO POR LA MEDIDA DEL CONTENIDO DE OXIGENO EN LOS GASES



EL sistema de control por oxígeno se basa en fijar un valor del oxígeno (punto de consigna) a mantener automáticamente. Pueden darse dos casos (supuesto que la curva de rendimiento es la 1):

- Que se fije un punto de consigna de oxígeno bajo para este sistema de control (punto A') Con ello el sistema se moverá entre A'₁ y A'₂ produciéndose en ocasiones inquemados altos
- Que se fije un punto de consigna alto de oxígeno (punto A'') Con ello se garantiza que normalmente no se producirán inquemados, pero siempre se tendrá un exceso de aire alto.

En definitiva, la medición del contenido de oxígeno no permite conocer la forma en que se desarrolla la combustión, porque no tiene en cuenta las circunstancias antes enunciadas.

1.8.4 Control Multivariable

Se trata de un sistema de corrección por medida en el cual actúan dos o más parámetros correctores conjuntamente.

Generalmente uno de los parámetros es el CO, e intervienen como parámetros correctores, además de aquel, los hidrocarburos inquemados y la opacidad. Para cada uno de estos parámetros hay que fijar de antemano los valores objetivo. Igualmente deben existir en los lazos de control unos enclavamientos que permitan que en cada momento el parámetro corrector sea aquel que haga más favorable el punto de funcionamiento tras su corrección. En las Figs. 1.38 y 1.39 se indica la influencia de las variaciones de la opacidad y de los hidrocarburos sobre el rendimiento

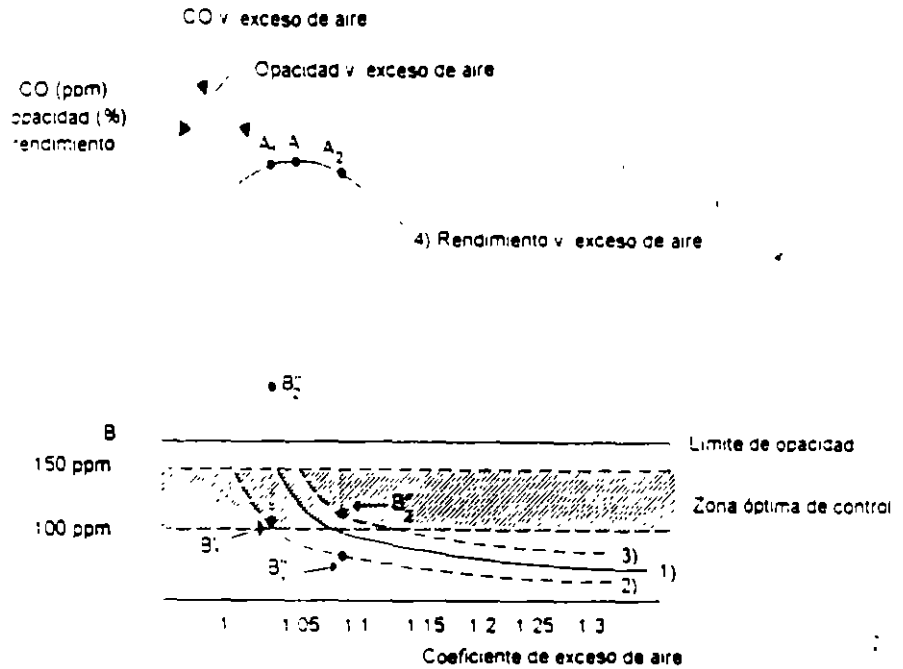
Influencia de la Opacidad

La existencia de partículas inquemadas en los gases produce el oscurecimiento de los mismos, lo cual generalmente se define como humo y se mide en una escala relativa de oscurecimiento llamada escala de opacidad.

La opacidad de los gases tiene una relación directa con el grado de contaminación que los mismos producen y con las pérdidas de combustible. Por esta razón, generalmente se exige controlar esta variable.

La opacidad varía con el exceso de aire de acuerdo a una curva similar a la del CO (ver Fig. 1.38). La situación relativa de ambas curvas (opacidad y CO) depende de circunstancias interiores y exteriores.

FIG. 1.38: INFLUENCIA DE LA OPACIDAD EN EL CONTROL DE LA COMBUSTION

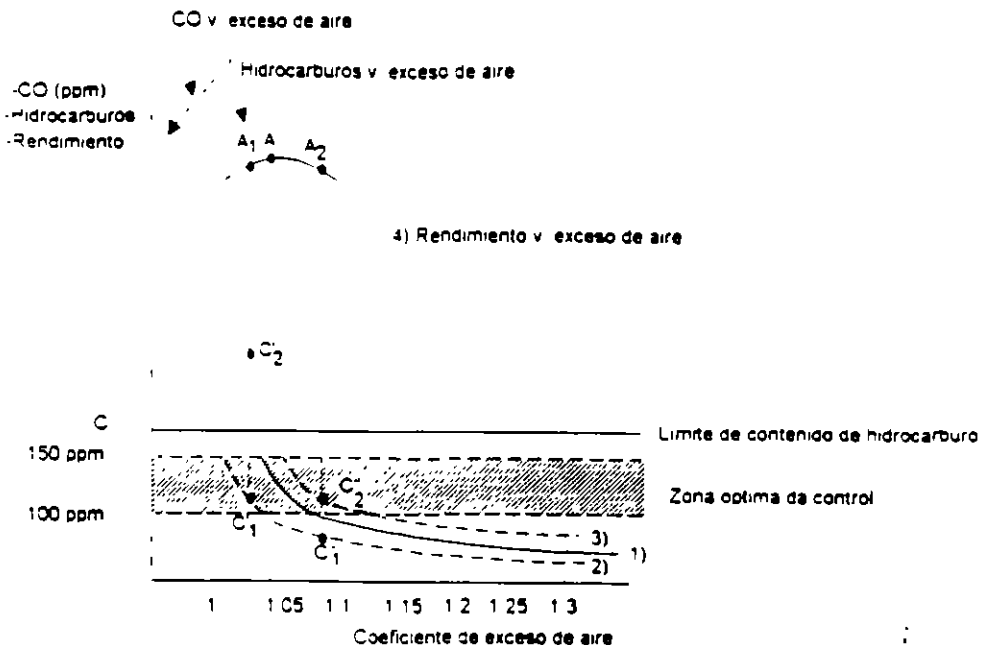


Cuando la opacidad sigue una curva como la 2, estando la caldera en control entre 100 y 150 p p m de CO, los valores de la opacidad vanaran entre B₁ y B₂. Si el limite de opacidad está en B, los valores anteriores son inferiores al límite y por lo tanto aceptables.

Si la curva de la opacidad fuera la 3, los valores de la opacidad varianan desde B'₂ a B'₁, siendo este último valor superior al límite aceptable

En estas circunstancias se produce humo, con sus efectos negativos. Por ello es importante que el equipo de control mida tambien la opacidad y corrija, en base a la misma, la combustión, es decir que en circunstancias como la B₂' se admita mayor exceso de aire para corregir el valor de la opacidad

FIG. 1.39: INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HIDROCARBUROS EN LOS GASES, EN EL CONTROL DE LA COMBUSTION



Influencia de los Hidrocarburos

La curva de contenido de hidrocarburos en los gases (Fig. 1.39) es similar a la de CO y opacidad, pudiendo como esta ultima, estar a un lado u otro de la curva de CO

Por un análisis similar al de la opacidad obtenemos que el contenido de los hidrocarburos en el punto C₂' no es admisible y por lo tanto, el sistema debe corregir automáticamente esta desviación.

El contenido de hidrocarburos en los gases nos indica también el grado en que se está efectuando la combustión. Ello es particularmente importante cuando el combustible es un gas limpio, que aún en la combustión con defecto de aire no produce prácticamente opacidad. En este caso el contenido de hidrocarburos será el que corrija las desviaciones del control por CO.

1.8.5 Control de la Combustión de Residuos

A medida que la combustión de residuos se incrementa, las filosofías de control van variando paulatinamente, pasando desde la antigua situación en la que se quemaban los residuos para deshacerse de ellos hasta la actual en la que se queman para aprovechar su poder calorífico.

Este cambio ha conducido, hoy en día, a concentrar el esfuerzo en la utilización de diversas técnicas de optimización, de forma que se llegue a sustituir el máximo posible de combustible convencional

En cuanto a control, el mejor sistema depende de la forma y proporción en las que el combustible convencional y el residuo han de ser utilizados

1. Combustión Únicamente de Residuos

Este método es el más simple pero no el mejor. Sólo es utilizable cuando no se necesita el combustible convencional para estabilizar la combustión, y cuando la respuesta dinámica de la caldera es suficiente para compensar las variaciones habituales de la carga.

2. Combustión de Acuerdo a una Relación Controlada de Combustible Habitual/Residuos

En este método los dos combustibles deben poder ser quemados simultáneamente en cualquier proporción, y el sistema de control debe permitir que un combustible se ajuste manualmente, mientras que el segundo responda a las variaciones de la carga.

3. Combustión en la que los Residuos son la Base

En este método se complementa con el combustible habitual para seguir las variaciones de la demanda.

4. Combustión en la que el Combustible Habitual es la Base

En este método se complementa con los residuos según las variaciones de la demanda.

Para cada uno de estos cuatro casos, así como para el caso de que haya más de un residuo existen, esquemas de control adaptados o adaptables. Sin embargo, por la simplicidad no se incluyen aquí.

1.9 EJEMPLOS DE MEJORAS EN COMBUSTION

Según lo anterior, se puede mejorar el rendimiento de la combustión al reducir las pérdidas de calor, lo cual puede lograrse al implementar las siguientes acciones

- Reducir las pérdidas de calor de los humos
- Reducir las pérdidas de calor por inquemados
- Reducir la diferencia de temperatura entre aire y gases

1.9.1. *Control del Exceso de Aire*

Con 2 ejemplos se muestra que, dado los precios de los combustibles en México, en la actualidad el control automático de la combustión por medición de los gases no es rentable en todos los casos. Así, una buena solución en la mayoría de los casos puede ser realizar mediciones con un equipo portátil y proceder a los ajustes necesarios.

Ejemplo 1.1: Control del Exceso de Aire por Control Automático

El análisis de los gases de una "mala combustión" del combustóleo en una caldera de vapor, dio como media los valores siguientes:

- % medio de O ₂	9%
- ppm de CO	1,900
- ppm de hidrocarburos	1,500
- % de opacidad	40
- Temperatura de los gases	250°C
- Temperatura ambiente	20°C

Las pérdidas por inquemados eran

$$\frac{21}{21-9} \times \left(\frac{1,900}{3,100} - \frac{1,500}{1,000} - \frac{40}{65} \right) = 4.77\%$$

De acuerdo a la Fig. 1.23, las pérdidas en gases eran 14.4%.

Las restantes pérdidas se estimaron en 3%

Se decidió optimizar la caldera mediante la instalación de un control multivariable de la combustión y un economizador. Con ello se tendría

- % medio de O ₂	15%	
- ppm de CO	150	:
- ppm de hidrocarburos	100	
- % de opacidad	5	
- Temperatura de los gases	160°C	

Las nuevas pérdidas por inquemados serían:

$$\frac{21}{21-15} \times \left(\frac{150}{3,100} - \frac{100}{1,000} - \frac{5}{65} \right) = 0.24\%$$

Las pérdidas por gases pasan al 5.6%

Los rendimientos son

$$\text{Actual} = 100 - 3 - 4.77 - 14.4 = 77.83\%$$

$$\text{Futuro} = 100 - 3 - 0.24 - 5.6 = 91.16\%$$

El ahorro porcentual obtenido fue

$$100 \times \left(1 - \frac{77.83}{91.16} \right) = 14.6\%$$

La caldera consumía 1,000 t/año de combustóleo. Por tanto, el ahorro anual obtenido fue 146 t/año de combustóleo, que suponen:

$$146 \text{ t/año} \times 220 \text{ NS/t} = 32,120 \text{ NS/año}$$

La inversión necesaria fue de NS 210,000

Ejemplo 1.2: Corrección de Holguras en el Equipo de Combustión

En una caldera de vapor, la combustión media del combustóleo respondía a los siguientes valores:

- % medio de O₂ 9%
- Temperatura de salida de gases 220°C
- Temperatura ambiente 20°C

Se revisó el quemador y se observaron numerosas holguras. Se corrigieron éstas y se ajustó la leva de relación aire/combustóleo, obteniéndose como media los valores siguientes:

- % medio de O₂ 5%
- Temperatura de salida de gases 210°C

El costo de la reparación fue NS 5,000.

De acuerdo a la Fig 1.23, se tiene:

- Pérdidas iniciales en gases 12.4%
- Pérdidas finales en gases 9.1%

Las restantes pérdidas se calcularon en aproximadamente 3%. Por tanto

- Rendimiento inicial = 100 - 3 - 12.4 = 84.6%
- Rendimiento final = 100 - 3 - 9.1 = 87.9%

El ahorro porcentual obtenido fue:

$$100 \times \left(1 - \frac{84.6}{87.9} \right) = 3.75\%$$

La caldera consumía 2,000 t/año de combustóleo. Por tanto, el ahorro anual obtenido fue 75 t/año de combustóleo, que suponían:

$$75 \times 220 = 16,500 \text{ NS/año}$$

Se estimó que, para obtener este nivel de combustión, sería necesario efectuar dos veces al año las operaciones de ajuste. En consecuencia, el gasto anual será de 10,000 NS/año.

1.9.2 AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AIRE

Una caldera de vapor que consume combustóleo, trabaja de acuerdo a

Temperatura de gases	230°C	:
% de O ₂ en los gases	5%	:
Temperatura del aire comburente	10°C	:

Se trasladó el ventilador de forma que aspiraba aire de la parte superior de la caldera a 40°C.

Según la Fig. 1.23, las pérdidas en gases eran:

Antes de la reforma	10.6%
Después de la reforma	9.1%

Las restantes pérdidas eran el 3%. Por tanto, los rendimientos fueron

Antes de la reforma:

$$100 - 3 - 10.6 = 86.4\%$$

- Después de la reforma:

$$100 - 3 - 9.1 = 87.9\%$$

El consumo era 2,500 t/año de combustóleo. Por tanto, el ahorro anual fue

$$2.500 \left(1 - \frac{86.4}{87.9} \right) = 42.7 \text{ t/año}$$

Que suponen.

$$220 \text{ NS/t} \times 42.7 \text{ t/año} = 9394 \text{ NS/año}$$

La inversión fue NS 14,000 00

REFERENCIAS

- 1 **Manual de Eficiencia Energética en Calderas de Vapor.** *Grupo Eficiencia Industrial.* Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (en preparación)
- 2 **Manual Selmec de Calderas.** *Selmec Equipos Industriales, S.A. de C.V.* 1992.
- 3 **Manual de Eficiencia Energética Térmica en la Industria.** CADEM *Grupo EVE. España 1984.*
- 4 **Curso para la Formación de Consultores en Diagnósticos Energéticos de Primer Nivel.** *Fondo para el ahorro de Energía* Comisión Nacional para el Ahorro de Energía Cuernavaca, Mor., México, 1993

PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

3.1 REFRACTARIO

Una caldera aislada se verá con muchas pérdidas de calor si el material refractario no es el adecuado

Un material refractario que soporte las condiciones de operación del equipo como son choque térmico, compresión, erosión, ataques químicos etc, no será el más idóneo sino es capaz de retener al calor. Una breve descripción de estos materiales se muestra a continuación. Además, se incluye la presentación de un equivalente funcional como son las paredes de agua.

3.1.1 LADRILLO REFRACTARIO

Cada fabricante tiene sus propios ladrillos refractarios, los cuales pueden ser cerámicos o fabricados en base a cementos plásticos.

Las características termotécnicas importantes de estos materiales refractarios son:

1. Conductividad térmica a diversas temperaturas.
2. Calor específico; el cual condiciona la cantidad de calor almacenado en el propio material

3. Densidad.
4. Difusividad térmica.
5. Emisividad que regula la cantidad de calor radiada o absorbida por las paredes, techo y suelo.

Por lo que respecta a la conductividad térmica, en la Fig. 3.1 se pueden ver las conductividades térmicas de diferentes materiales refractarios para altas temperaturas, desde 300 hasta 1,100°C, al igual que otros datos tales como la porosidad.

FIG. 3.1: CONDUCTIVIDAD TERMICA DE MATERIALES REFRACTARIOS

Características	Ladrillo Refractario			Ladrillo de Alumina	Ladrillos de Sílice		Ladrillos de Zirconio			Ladrillo de Magnesita	Ladrillos de Carburo de Sílice		
				41% Al ₂ O ₃	46% SiO ₂	51% SiO ₂	55% ZrO ₂	55% ZrO ₂	30% ZrO ₂		90% SiC	77% SiC	50% SiC
	1,300	1,410	1,460	1,450	1,460	1,460	-	-	1,450	-	1,435	1,310	1,310
Temperatura max.(°C)	30	25.8	26.5	25.1	24.0	28.1	30	32.5	18.9	-	25.6	21.6	22.9
Porosidad (%)	0.76	0.90	1.03	2.02	1.16	1.01	-	-	2.61	-	-	11.16	4.09
Conductividad K (kcal-m-h-m ² -°C)	0.84	0.96	1.10	1.90	1.25	1.19	0.74	1.51	2.15	3.08	13.40	9.92	3.96
a 300 °C	0.90	1.00	1.15	1.83	1.34	1.21	0.75	1.36	1.92	2.55	11.16	8.80	3.72
500 °C	0.93	1.03	1.17	1.80	1.44	1.29	0.76	1.26	1.76	2.16	9.55	7.81	3.53
700 °C	0.94	1.04	1.18	1.79	1.52	1.37	0.77	1.19	1.64	1.83	8.55	6.82	3.35
900 °C													
1,100 °C													

Al mismo tiempo, los ladrillos refractarios deben reunir una serie de propiedades mecánicas que garanticen su resistencia en el transporte, y a la abrasión en aquellos casos donde se realice una combustión con aire que contenga muchas partículas

Por otro lado, los ladrillos refractarios deben cumplir algunas especificaciones físico-químicas relativas a la solubilidad en los gases de combustión o, en el caso de hogares donde se quema carbón, en la pasta formada por la escoria y el carbón fundido.

El aislamiento del hogar debe completarse con una segunda capa de material aislante. Según sean las características termotécnicas de esta segunda capa, viene condicionado el espesor de la capa de ladrillo refractario. Como consecuencia, conviene elegir una combinación adecuada de ladrillo refractario y aislante, de tal forma que el espesor total de la pared del hogar

sea el adecuado para que en él no se almacene una cantidad muy alta de calor, el cual se perdería en las paradas y arranques, así como en las variaciones de la carga que tuvieran como consecuencia variaciones en la temperatura del hogar.

3.1.2 TAMAÑO DE LOS LADRILLOS

Ciertas fábricas usan ladrillos comunes de 220 x 110 x 60 mm. Otras prefieren ladrillos de 300 x 150 x 75 mm. Los ladrillos más grandes tienen diversas ventajas

- a) Se colocan más fácil y rápidamente
- b) Por lo tanto necesitan menos mano de obra
- c) Consumen menos mezcla porque tienen una menor área en las juntas para el mismo volumen
- d) Cuestan un poco menos por unidad de volumen

Por otro lado tienen un inconveniente: como sus dimensiones son mayores, son menos elásticos y es más difícil dar a las paredes las dimensiones previstas. Es necesario tomar un múltiplo de su largo y/o de su ancho

3.1.3 RESISTENCIA AL FUEGO

A la fecha es posible obtener temperaturas de 1,350°C en hornos comunes de aire frío, y de 1,450°C en hornos provistos de precalentadores de aire

Para ambos casos deben elegirse:

- a) En el primero: ladrillos que contienen por lo menos, del 20 al 22% de óxido de aluminio.
- b) En el segundo, ladrillos que contienen por lo menos, del 30 al 33% de óxido de aluminio.

3.1.4 JUNTAS DE EXPANSION

En todos los muros de ladrillo del horno y de la caldera, deben construirse juntas de expansión de 5 mm cada 600 mm. Estas juntas no se construirán en las paredes de la herradura de un horno de este tipo.

En los arcos, los ladrillos se colocarían en hileras yuxtapuestas. De esta manera, el arco es realmente una serie de pequeños arcos independientes de la misma longitud de un arco de una sola hilera. En esta forma se evitan medios ladrillos. Debe colocarse entre ellos una junta de expansión de 5 mm, cada tres arcos.

3.1.5 SECADO DE LOS MUROS

Cuando se termina la construcción de los hornos o ductos, deben secarse cuidadosamente, encendiendo un fuego pequeño que se aumentara progresivamente, durante por lo menos tres días.

3.1.6 PAREDES DE AGUA

En calderas grandes no es posible construir el hogar solamente con ladrillo por las siguientes razones:

1. Debido a la altura, el esfuerzo de compresión creado por el peso de los ladrillos sería mayor que la resistencia mecánica.
2. Debido a los diferentes tipos de combustible que pueden utilizarse, las temperaturas que se alcanzarían en el hogar serían demasiado elevadas.
3. En calderas grandes de carbón pulverizado se depositarían cenizas y escorias en los ladrillos.
4. Es más económico aprovechar la superficie del hogar como superficie de calefacción en la caldera.

5. La dilatación de la estructura y de la caldera originaría problemas en la construcción de la obra de ladrillo.

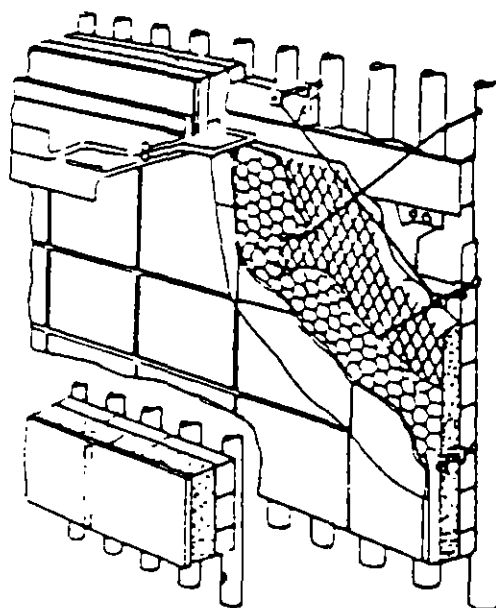
Como consecuencia de lo anterior se utilizan paredes de agua en los hogares, las cuales pueden ser de muy diversos tipos:

- a) Paredes de tubos y ladrillos. En la Fig. 3.2 se puede ver un esquema de la disposición de los tubos, de los ladrillos refractarios y de las capas de aislante. En el esquema, los tubos se encuentran distanciados, pudiendo variar esta distancia de unas calderas a otras.
- b) Paredes de tubos tangentes y ladrillos. Responden al mismo esquema anterior pero con los tubos prácticamente juntos entre sí. En la Fig. 3.3 se plantean estas paredes en dos casos diferentes: con carcasa exterior metálica (parte b) o sin carcasa exterior metálica (parte a).
- c) Paredes de tubos con membrana metálica. En este tipo de pared de agua los tubos llevan aletas longitudinales, formando una membrana metálica aplicada a lo largo de toda su longitud y constituyendo, por lo tanto, una pared totalmente metálica. En la Fig. 3.4 está ilustrado este caso.

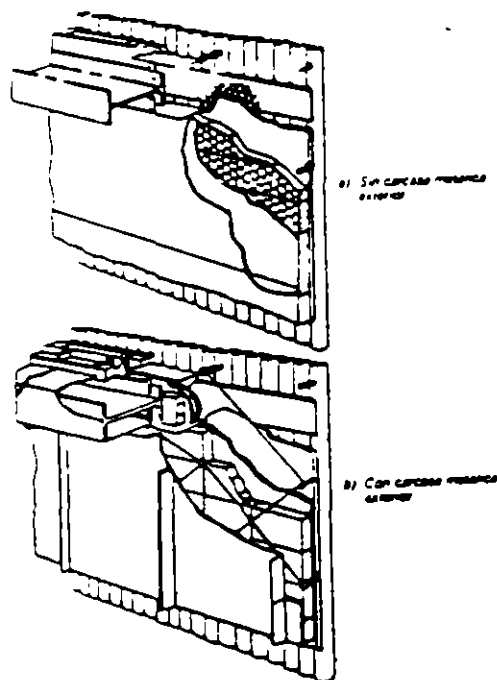
La utilización de los diferentes tipos de pared de agua está condicionada por diversos factores, tales como carga de la caldera, tipo de combustible, tamaños del hogar, y otros muchos que la práctica aconseja. Por otro lado, los aislantes y los refractarios que han de ser utilizados será en función de cómo se encuentren situados los tubos y de la utilización o no de una carcasa metálica exterior.

Por último, y a fin de ilustrar la variación de temperatura en una pared de agua, se incluye como ejemplo una pared de tubos y ladrillos. (ver Fig. 3.5)

**FIG. 3.2: PARED DE AGUA DEL HORNO DE UNA CALDERA
CONSTRUIDA DE TUBOS Y LADRILLOS**



**FIG. 3.3: PARED DE AGUA DEL HOGAR DE UNA CALDERA
CONSTRUIDA DE TUBOS Y LADRILLOS**



PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

FIG. 3.4: PARED DE AGUA DEL HOGAR DE UNA CALDERA CONSTRUIDA DE TUBOS CON MEMBRANA METALICA

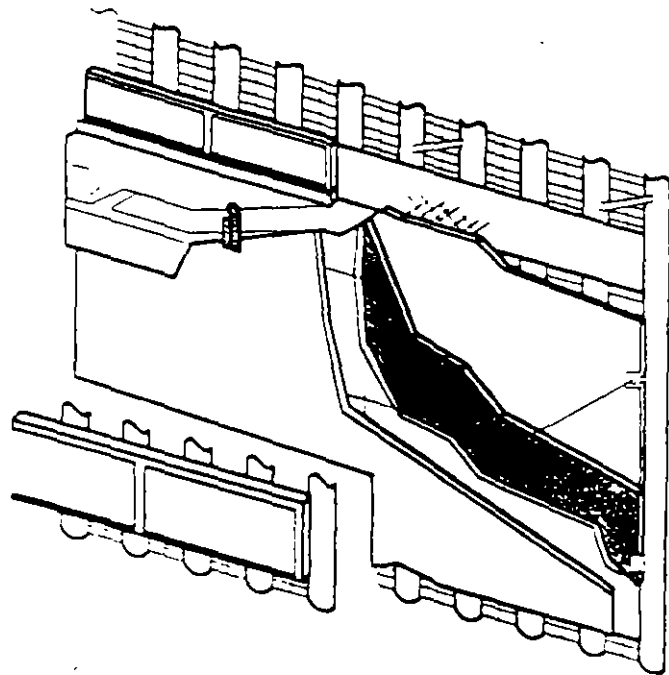
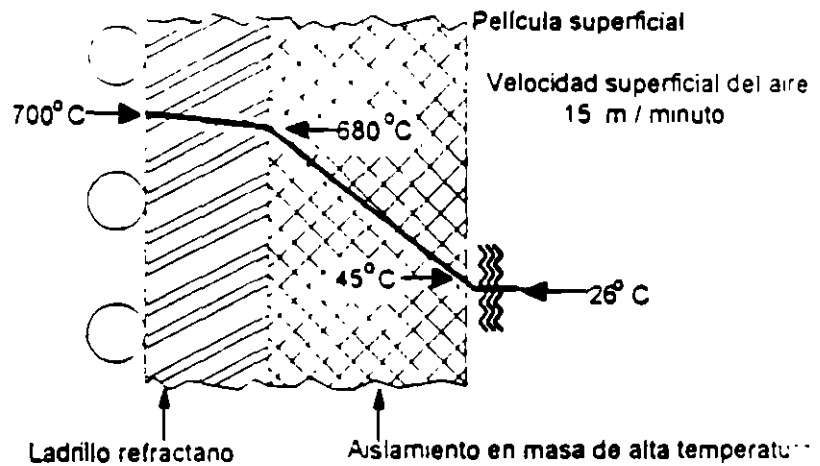


FIG. 3.5: LEY DE VARIACION DE LA TEMPERATURA EN UNA PARED DE AGUA DE TUBOS Y LADRILLOS CON AISLAMIENTO DE ALTA TEMPERATURA



PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

3.2 TIRO

Para mantener la temperatura a la marcha de la combustión, se requiere pasar por el horno y sobre el combustible, la cantidad de aire necesaria. Como el trayecto del aire es complejo y existen diversas resistencias a su paso. (a través del colchón de combustible y entre los tubos de la caldera, diversos cambios de dirección, etc.) y dado que es necesario dar a los gases una velocidad relativamente alta, el mantener esta corriente de gas exige cierto gasto de energía que normalmente se da en la forma de presión

Esta presión motriz, puede obtenerse de dos fuentes:

- a) De la energía térmica producida por la combustión, es decir, tiro natural
- b) De una fuente externa, ventilador u otro medio, es decir tiro forzado

3.2.1 TIRO NATURAL

En el tiro natural la succión se crea evacuando los gases de la combustión por la chimenea. Siendo estos gases calientes, el peso de la columna gaseosa así formada es menor que el peso de la misma altura de aire ambiente. La masa de gases contenida en la chimenea tiende entonces a subir, empuja por el aire ambiente que la reemplaza progresivamente y que a su vez se calienta al atravesar el horno

La obtención de un buen tiro natural, es más difícil que la de un tiro forzado. Necesita el conocimiento de las relaciones que existen entre los siguientes elementos:

- | | |
|--|-------|
| 1. Velocidad de los gases en los ductos | V_c |
| 2. Tiro a la salida de los ductos | d |
| 3. Velocidad de los gases que deja la chimenea | V_s |
| 4. Sección transversal de la chimenea | S_s |
| 5. Altura de la chimenea | H |

Velocidad de los Gases en los Ductos

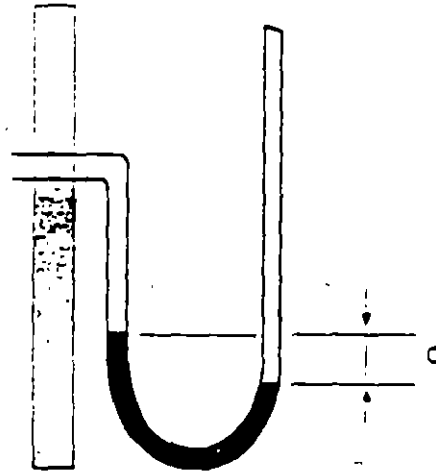
Esta velocidad no debe pasar de 5m/seg. en el caso del tiro natural. Puede tomarse:

$$V_s = 4 \text{ a } 5 \text{ m/seg} \quad (3.1)$$

Tiro a la Salida de los Ductos

El tiro a la succión es la diferencia entre la presión exterior y la presión en el interior del ducto. Se mide fácilmente en una instalación existente, con la ayuda de un pequeño tubo en U que contenga agua (Fig. 3.6) y se expresa en mm de agua.

FIG. 3.6: MEDIDA DEL TIRO



Velocidad de los Gases que Dejan la Chimenea

La velocidad de los gases que dejan la chimenea, corresponde a la energía perdida. Desde el punto de vista de la economía en la instalación (altura mínima de la chimenea por construirse, por ejemplo) es conveniente que la velocidad V sea lo más baja posible.

Sin embargo, debe ser suficiente para evitar que la componente vertical de los vientos dominantes pueda perturbar el funcionamiento de la chimenea. En los países tropicales es ventajoso tener por lo menos 4 m/seg y aun 5 m/seg. No es necesario excederse de esta última cifra, porque se producirá una chimenea innecesariamente alta y costosa. V debe elegirse entonces de tal manera, que:

$$4 < V \leq 5 \text{ m/seg,}$$

de acuerdo con la importancia de los vientos dominantes

La velocidad teórica de los gases se calcula con la ecuación siguiente,

$$V = \sqrt{2gHC \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{ge}} \right)} \quad (3.2)$$

Donde:

V	=	Velocidad teórica de los gases m/seg
g	=	9.81 m/seg ²
H	=	Altura de la chimenea, m
T_{ge}	=	Temperatura absoluta de los gases a la entrada de la chimenea, °K
T_a	=	Temperatura absoluta del aire exterior, °K

Para chimeneas de ladrillo, piedra o concreto, la velocidad real de los gases oscila entre 30 y 50% de la teórica, a causa de la rugosidad en la superficie interior.

Sección Transversal de la Chimenea

La elección de la velocidad de los gases de la chimenea, incluye la determinación de la sección transversal en la parte superior. Se sabe que el flujo de gases debe ser:

$$Q = W_c \times U_{ge} \times D_g \quad (3.3)$$

Donde:

- Q = Flujo de gases que deben pasar por la chimenea
 m^3/seg
 W_c = Consumo de combustible, kg/h
 U_{gc} = Razón de gases producidos, kg gases/kg
 combustible
 D_g = Densidad de los gases, kg/m^3 ,

y el área de la sección transversal de la chimenea está dada por

$$A = Q/KV \quad (3.4)$$

Donde:

- A = Área de la sección transversal, en la base de la
 chimenea, m^2
 K = Coeficiente de velocidad, de 0.3 a 0.5

Altura de la Chimenea

La altura de la chimenea puede determinarse de acuerdo con la segunda fórmula de Tripiet:

$$H = \frac{dD}{164 p_a \left(\frac{1}{T_a} - \frac{b}{T_{gc}} \right)} \quad (3.5)$$

Donde:

- d = Tiro en la base de la chimenea, en mm de agua,
 dado para el caso del tiro natural
 D = densidad del fluido en el aparato medidor de tiro,
 kg/m^3
 P_a = Presión barométrica, en mm de agua (760 mm de
 $\text{Hg} = 10,336 \text{ mm de agua}$)

- b = Coeficiente numérico que toma en cuenta el enfriamiento de los gases mientras pasan a través de la chimenea y que tiene el valor siguiente.
- 1.05 Para chimenea de ladrillo
 - 1.08 Para chimenea de concreto reforzado
 - 1.12 Para chimenea de lámina

Ventajas y Desventajas del Tiro Natural

El tiro natural presenta las siguientes ventajas:

- (a) Una larga vida las chimeneas duran 100 años
- (b) Seguridad: no existe ningún riesgo por la ruptura de un ventilador
- (c) Economía en la operación: no se necesita ningún motor, no se consume potencia

Sin embargo, presenta algunas desventajas:

- (a) Necesita una buena cimentación, por el peso de la chimenea
- (b) Ocupa un espacio considerable, por las dimensiones de la base de la chimenea
- (c) Puede producir sólo un tiro limitado, a menos que se dé una altura excesiva
- (d) No tiene ninguna flexibilidad cuando ocurren cargas inesperadas

3.2.2 TIRO MECANICO

Existen 3 sistemas principales de tiro mecánico:

1. Tiro forzado
2. Tiro inducido
3. Tiro inducido por "inyección"

Tiro Forzado. En este tiro el aire se sopla abajo de la parrilla cerrando el depósito de cenizas.

Este sistema tiene la ventaja de permitir la introducción de aire a presión atmosférica en la cámara de combustión, y consecuentemente evita la entrada de aire por cualquier intersticio, a pesar de que existan grietas o fugas en la albañilería de la caldera.

Se emplea principalmente cuando se instala un calentador de aire.

Tiro Inducido. Este es el sistema más común. En lugar de colocar el ventilador en la parrilla, se coloca en el extremo de los ductos y en la base de la chimenea.

Tiro de Inyección. Esta es otra forma del tiro inducido. La succión se produce no con un ventilador, sino con una boquilla de vapor que descarga en la chimenea y produce en los gases el efecto de Giffard. Puede emplearse también un ventilador fuera de circuito y producir el efecto de Giffard, tomando del ducto una fracción de los gases y retornándolos por medio de una boquilla similar a la utilizada con el vapor.

Ventajas y Desventajas

El tiro mecánico necesita de un ventilador, por lo tanto, existen posibilidades de accidentes y es necesario parar para revisar y mantener el ventilador, sin embargo, se emplea cada vez más por las siguientes razones:

- (a) El costo inicial de instalación es muy bajo
- (b) Necesita menos espacio
- (c) Y sobre todo, es flexible, con un motor de velocidad variable el tiro puede regularse inmediatamente

Es posible también instalar en el motor un regulador automático de tiro, que asegure una marcha flexible y regular a la fábrica y permita proporcionar en todo momento el vapor suficiente para las necesidades de la misma.

3.2.3 VENTILADORES

En un principio se empleaban grandes ventiladores de baja velocidad. En la práctica moderna se prefieren ventiladores de alta velocidad que son mas

pequeños y por lo tanto más económicos en su instalación y en el espacio que necesitan.

Potencia Necesaria

Si un ventilador tiene que proporcionar un volumen dado de gas y mantener al mismo tiempo un tiro determinado, la potencia que empleara tendrá por valor:

$$T = V d \quad (3.6)$$

Donde:

- T = Potencia neta que debe proporcionarse en kgm/seg
 V = Flujo de gas que debe manejarse, en m³/seg
 d = Tiro producido en mm de agua (= kg/m²)

La potencia necesaria en la flecha del ventilador será entonces

$$T = \frac{V d}{p} \quad (3.7)$$

Donde:

- p = Rendimiento del ventilador

Este rendimiento es muy bajo y varía sustancialmente con la potencia del ventilador. Pueden emplearse las cifras de la tabla siguiente

RENDIMIENTO DE LOS VENTILADORES

Ventiladores pequeños	0.20 - 0.50, promedio 0.30
Ventiladores grandes	0.40 - 0.70, promedio 0.50

No olvidarse que la potencia T es la potencia que se aplica a la flecha del ventilador. La potencia que debe darse al motor debe incluir la eficiencia de éste y también la de las bandas, cuando se emplea este tipo de transmisión

Influencia de la temperatura del gas. Se notará que la potencia T indicada arriba, depende fuertemente del volumen de los gases. Consecuentemente, para un gasto dado y en términos de peso del mismo, se necesitará más potencia si el gas es caliente, que si es frío.

3.2.4 EJEMPLO

Un tren de calderas de vapor quema carbón a razón de 8.500 kg/h, produciendo 20 kg de gases por kg de combustible quemado. La temperatura del aire ambiente es 30°C, la temperatura media de los gases al entrar en la chimenea es de 343 °C y la temperatura media de los mismos en el interior de ésta es 250°C. El fluido en el aparato medidor de tiro tiene una densidad de 996 kg/m³ y el tiro teórico es de 23 mm de agua en la base de la chimenea, siendo la presión barométrica de 730 mm Hg.

Calcular las dimensiones de la chimenea requerida, si esta es de concreto

Solución:

Tomando un coeficiente de velocidad de 0.4 y asumiendo que la densidad de los gases sea igual a la del aire a 343 °C, esto es 0.576 kg/m³, tenemos:

$$H = \frac{23 \times 996}{164 \times 730 \left(\frac{1}{303} - \frac{1.08}{523} \right)} = 54.7 \text{ m}$$

$$V = \sqrt{2 \times 9.81 \times 54.7 \left(\frac{523}{303} - 1 \right)} = 28 \text{ m/seg}$$

$$Q = 8.500 \times 20 / (60 \times 60 \times 0.576) = 82 \text{ m}^3 / \text{seg}$$

$$A = 82 / (0.4 \times 28) = 7.32 \text{ m}^2$$

3.2.5 FILTROS DE ENTRADA DE AIRE

Cuando las condiciones ambientales de la zona donde se capta el aire comburente son tales que el aire admitido puede contener impurezas que afecten a elementos mecánicos o al mismo proceso de combustión, conviene colocar filtros en la entrada de los conductos.

Es recomendable colocar filtros si:

- 1 El aire contiene solidos abrasivos que pueden producir desgastes en los elementos mecanicos del circuito de aire.
- 2 El aire aspirado esta contaminado con sustancias que pueden interferir el proceso de combustión, o que pueden contaminar, a su vez, los gases de combustión
- 3 El aire aspirado esta contaminado con sustancias que pueden actuar como catalizadores en los procesos de corrosión asociados al SO_2

Sin embargo, en muchos casos no es necesario colocar filtros a la entrada del aire comburente y de hecho, gran parte de las calderas de vapor carecen de ellos

3.3 CHIMENEAS

Una chimenea es el ducto, de sección circular o cuadrada, por el cual se conducen los gases producto de combustión hasta un lugar conveniente y seguro

La chimenea se puede construir de cualquier material, empleándose generalmente lámina de acero, concreto o ladrillo, siempre y cuando garantice resistencia al calor y a la corrosión, así como a la presión de viento y sismos.

3.3.1 REQUISITOS PARA LAS CHIMENEAS

El reglamento para generadores de vapor de la Secretaria del Trabajo, establece en el Art. 33, que a continuación se transcribe, los requerimientos para una chimenea:

"Artículo 33 CHIMENEAS. Deberán reunir los requisitos siguientes:

1. Tendrán la capacidad suficiente para dar salida a todos los gases producidos por la combustión.

2. Tendrán la altura necesaria para que llenen debidamente su objetivo y, en todo caso, la mínima deberá ser tal que sobresalga un metro veinticinco centímetros del techo del edificio o cuarto de generadores cuando no hay edificio cercano, o tres metros del edificio más alto que se encuentre dentro del perímetro de diez metros alrededor de ellas.
3. Deberán ser construidas de manera que garanticen su completa estabilidad y podrán ser metálicas, de concreto armado, de piedra o de ladrillo con mortero de cemento. Cuando se usen materiales alterables al fuego, deberán revestirse interiormente con materiales a prueba de fuego hasta la altura que fuere necesaria, según la temperatura de los gases de salida. Deberá estar convenientemente atirantada para lograr su estabilidad.
4. Cuando las dimensiones de la chimenea lo requieran, deberán contar con aberturas practicadas en su base con puertas de cierre para que pueda fácilmente ser limpiada e inspeccionada."

3.3.2 PUERTOS DE MUESTREO

La Secretaría de Desarrollo Social, para facilitar la toma de muestras de los gases en la chimenea, ha establecido en la norma CCAT-FF-001 que aquella debe contar con puertos de muestreo según se muestran en las Figs. 3 7, 3 8, y 3 9.

FIG. 3.7: VISTA LATERAL DE PUERTOS Y PLATAFORMA PARA MUESTREO

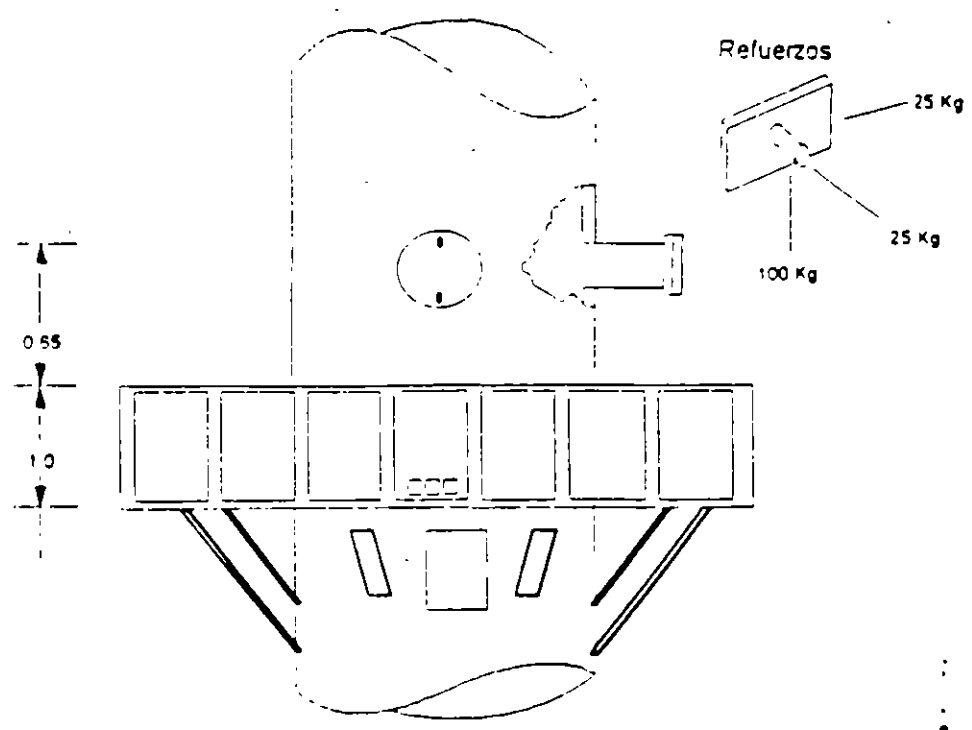


FIG. 3.8: PERFIL DE PUERTOS Y PLATAFORMA PARA MUESTREO

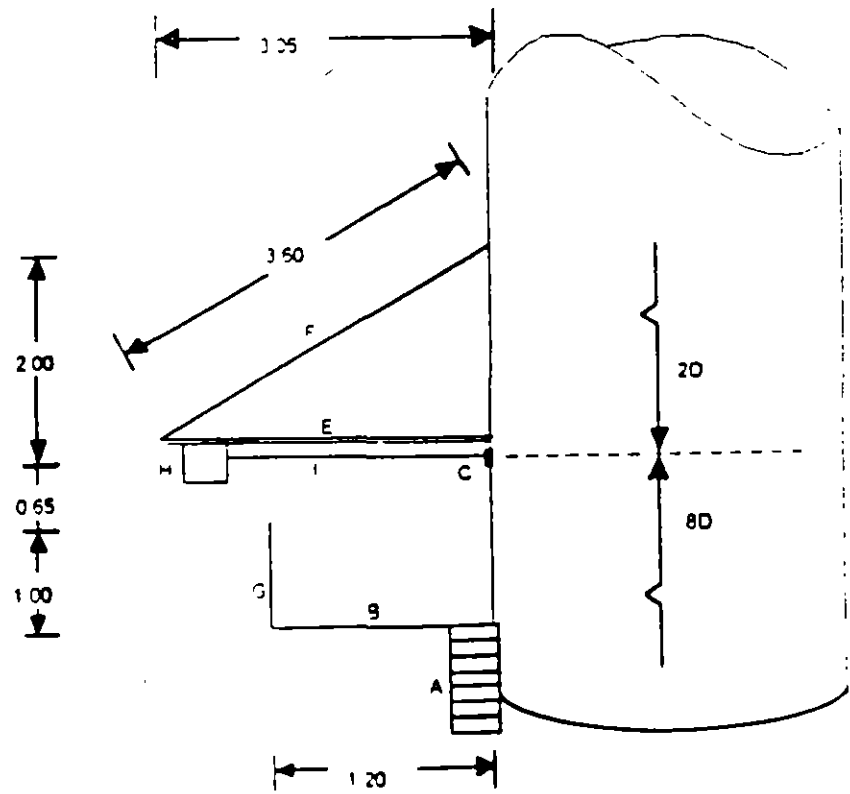
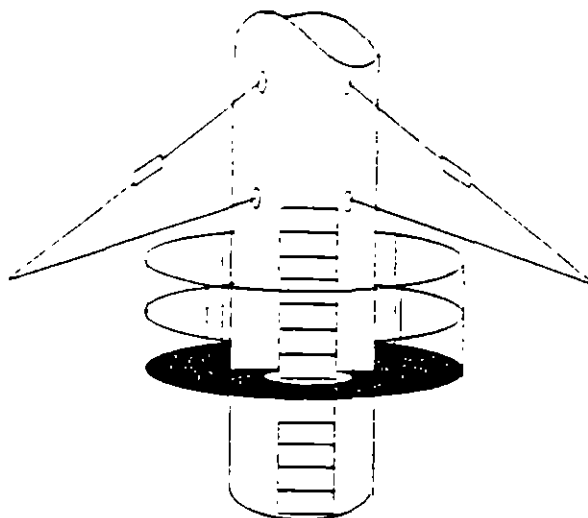


FIG. 3.9: INSTALACION COMPLETA DE PUERTOS Y PLATAFORMAS DE MUESTREO



3.4 CALENTADORES DE AIRE

Una forma de recuperar el calor sensible de los gases se produce mediante el uso de calentadores de aire, cuya misión es aumentar la temperatura del aire de combustión, por lo tanto son unos elementos que recuperan parte del calor sensible de los gases de combustión y lo añaden al aire requendo para quemar el combustible.

Cuando se utilizan calentadores de aire se producen los siguientes efectos

- 1° Se reducen las pérdidas de calor en los gases de combustión. Aproximadamente, por cada 20°C de reducción en la temperatura de dichos gases se obtiene un 1% de ahorro de combustible.
- 2° Se aumenta la temperatura de la llama en la zona de combustión
- 3° Se reducen los excesos de aire.

Prácticamente todas las calderas que queman carbón pulverizado necesitan precalentar el aire desde 15°C hasta 315°C para poder secar el combustible

Las calderas con parrilla para carbones bituminosos operan más eficientemente con aire precalentado aproximadamente a 175°C. De hecho no puede calentarse más, ya que los componentes (sobre todo móviles) tienen un límite de diseño a estas temperaturas.

3.4.1 TIPOS DE CALENTADORES DE AIRE

Existen diferentes tipos de calentadores de aire, los cuales funcionan a diferentes temperaturas. Por lo tanto, la temperatura es la base de la clasificación. En la Fig. 3.10 se indican los diferentes tipos y a continuación se describe uno a uno

Cabe hacer notar que en Europa, aparecieron de manera reciente intercambiadores de plástico poco sensibles a la corrosión. Actualmente es demasiado pronto para conocer el porvenir de este tipo de equipo.

FIG. 3.10: TIPOS DE CALENTADORES DE AIRE. RANGOS DE TEMPERATURA DE APLICACION

Tipos	Gases	
	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima para Combustibles con Azufre
A.E.S.S.	500-600	160-180
Acero con superficies extendidas	400-500	160-180
Hierro fundido con aletas	400-500	140-160
Vidrio borosilicato	230-250	100-120

Calentadores de Tubos Lisos de Acero

Consisten en un conjunto de tubos formando circuito, incluido en una carcasa exterior. En la Fig. 3.11 aparece un precalentador de aire de este tipo utilizado en contracorriente. El aire frío entra por la parte superior y sale caliente por la inferior.

El camino de los gases es inverso, circulando por el interior de los tubos. Puede verse en la Fig. 3.12 que existe un bypass para el aire, de forma que

sólo se introduzca parte de él en el calentador, lo cual garantiza una temperatura de las superficies de intercambio por encima de aquélla para la que se puede producir el rocío ácido.

En la Fig. 3.12 aparecen algunas de las diversas posibilidades de arreglo de los flujos de aire y gases de combustión en un calentador de aire. La versatilidad de estos equipos permite multitud de disposiciones.

De Tubos de Acero con Superficies Extendidas

Al igual que en los economizadores, es posible utilizar tubos con aletas, lo cual aumenta la superficie de transferencia y permite reducir el volumen total del calentador.

De Hierro Fundido con Aletas

En este tipo de calentadores de aire se utilizan tubos de sección rectangular con aletas interiores y exteriores. En la Fig. 3.13 aparece uno de los tubos. El conjunto de los tubos se coloca horizontalmente, de forma que el aire fluye en esta dirección por su interior. Externamente fluyen los gases de combustión en flujo cruzado. En la Fig. 3.14 aparece un calentador de aire de este tipo, combinado con tubos de vidrio borosilicato.

De Tubos de Vidrio Borosilicato

Para temperaturas bajas de gases, se han desarrollado calentadores de aire de tubos de vidrio borosilicato los cuales, para estas temperaturas, presentan ciertas ventajas con respecto a otros tipos de calentadores.

En este diseño puede circular cualquiera de los dos flujos por el interior de los tubos, aunque habitualmente lo hace el aire.

Los calentadores de aire de vidrio borosilicato presentan como ventajas: la alta transferencia de calor, la facilidad de limpieza y la resistencia a la corrosión. Como desventajas principales se tienen las derivadas de la fragilidad del vidrio y de los problemas de dilataciones.

FIG. 3.11: CALENTADOR DE AIRE TUBULAR PARA CONTRACORRIENTE GASES/AIRE CON BYPASS EN LA ENTRADA DE AIRE

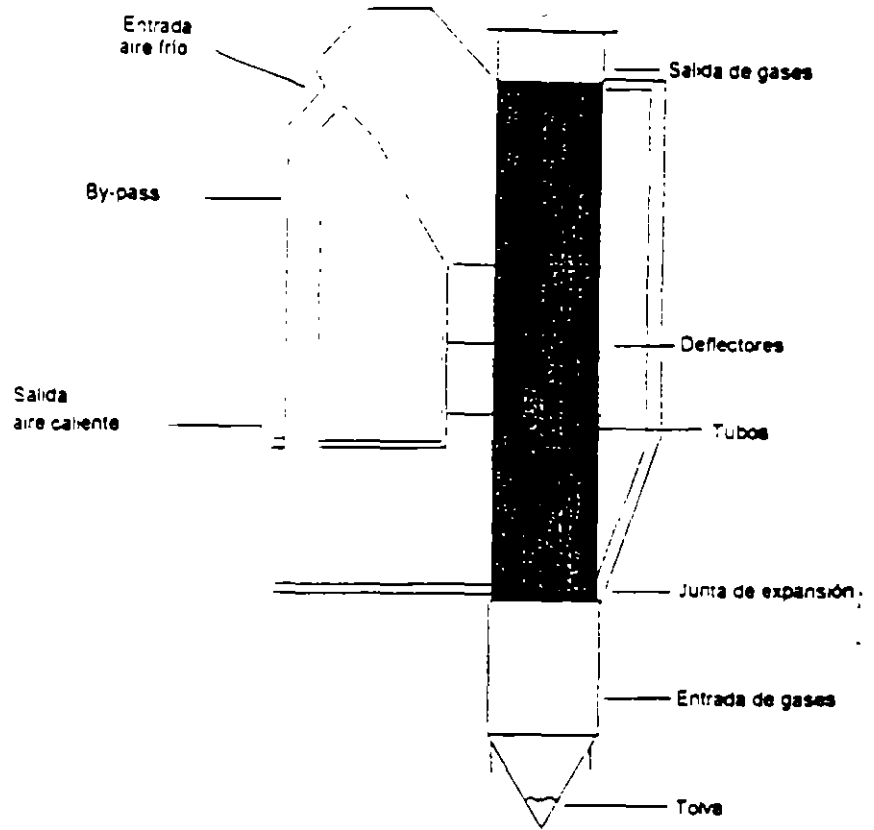
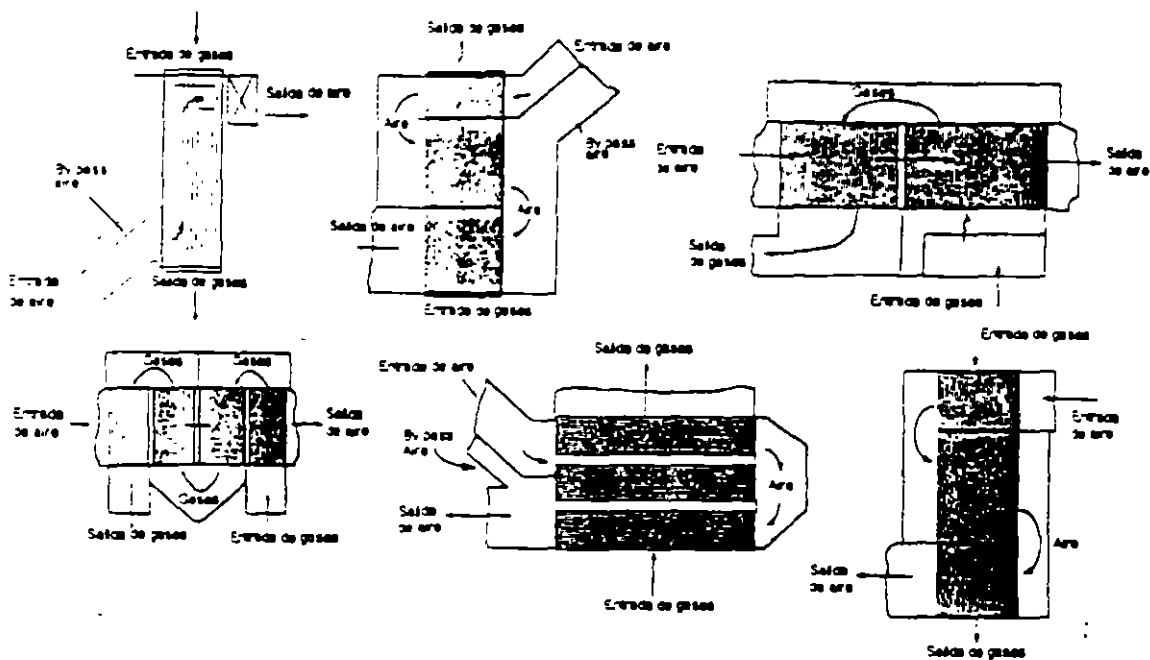


FIG. 3.12: ALGUNOS ARREGLOS DE CALENTADORES DE AIRE TUBULARES SEGUN DIRECCION DE LOS FLUJOS DE GASES Y DE AIRE



En general, no se producen incrustaciones sobre los tubos, ya que su rugosidad es muy baja y los fluidos circulan a gran velocidad. Por lo tanto, la limpieza se puede realizar por inyección de agua con boquillas difusoras situadas en puntos estratégicos del calentador. Como consecuencia de todo lo anterior, con este tipo de calentador se producen economías importantes de energía.

3.4.2 DISPOSICIONES MAS FRECUENTES

La práctica habitual de la instalación de calentadores de aire se resume en los siguientes casos:

En Relación a la Posición del Calentador de Aire con Respecto al Flujo de Gases

Se puede adoptar la disposición bypass o la disposición en serie

Dicha disposición sería similar a la de los economizadores indicados en las Figs. 3 18 y 3 19: en el sistema de disposición en serie el calentador de aire se intercala en el conducto de gases, de forma que estos pasan siempre a través del mismo. En el caso de bypass, puede aislarse el calentador de aire del flujo de gases, de tal forma que por un conjunto de cortatiros se puede conseguir que nada, parte o el total del flujo de gases pase a través del mismo.

Las especificaciones generales a cumplir en el diseño y la instalación de calentadores de aire deberán seguir la línea expuesta para economizadores

En Relación al Circuito de Aire

Es conveniente que exista un bypass en el circuito de aire, a fin de garantizar que la temperatura de las superficies de intercambio no descienda de la mínima necesaria para evitar los problemas asociados al rocío ácido

Sistemas Bi-transfer

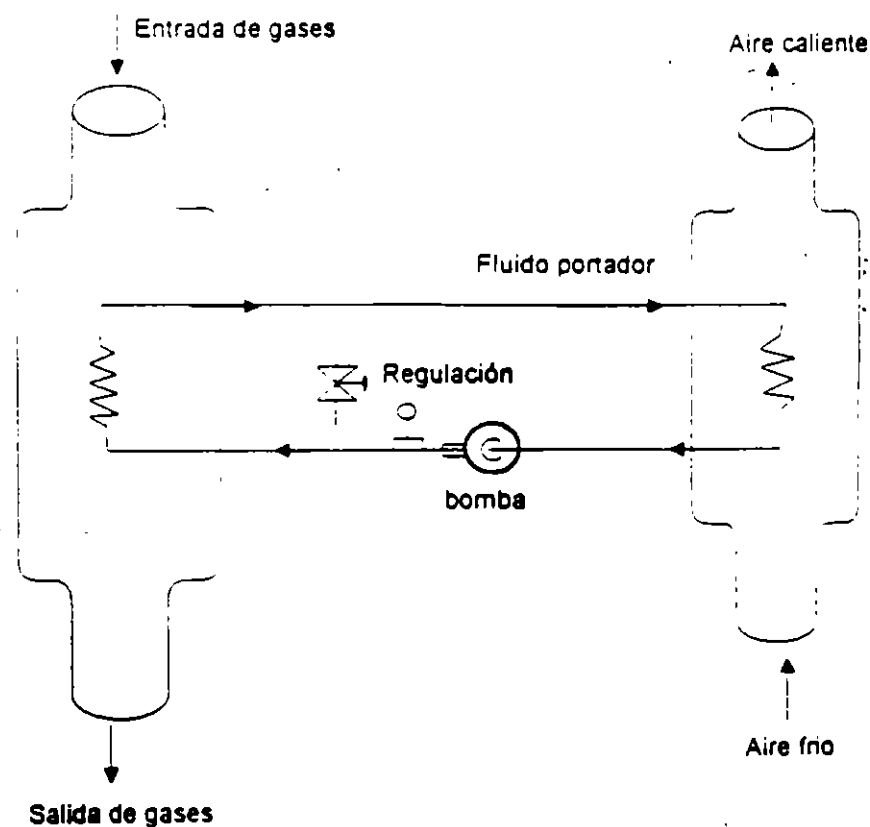
El sistema bi-transfer ha sido desarrollado como una alternativa a los métodos tradicionales de intercambio de calor entre dos fluidos, y es particularmente útil cuando se trata de intercambiar calor entre dos gases, por ejemplo, para calentar el aire comburente de una caldera de vapor a partir del calor de los gases que salen de la misma.

Estos sistemas consisten básicamente en un circuito de fluido térmico y dos intercambiadores de calor:

- Gases - fluido térmico, donde los gases calientan el fluido térmico.
- Fluido térmico - aire, donde se enfría el fluido térmico calentando el aire.

En los sistemas bi-transfer se realizan, por tanto, intercambios de calor gas-liquido, tal como se representa en la Fig. 3.15 y, por ello, puede emplearse ventajosamente la tecnología de las superficies extendidas.

FIG. 3.15: SISTEMA BI-TRANSFER



Normalmente se utilizan para su construcción tubos con aletas transversales redondas o cuadradas, siendo las más habituales:

- AF, formados por tubos de a.e.s.s. recubiertos con piezas de fundición con aletas.
Estos tubos suelen emplearse en el cambiador gases - fluido térmico, cuando el combustible contiene azufre.
- AA, formados por tubos de a e s s con aletas de acero. Estos tubos se emplean en el cambiador aire-fluido térmico y en el cambiador gases-fluido térmico, cuando lo permiten las características del proyecto (Combustibles exentos de azufre, o altas temperaturas del fluido térmico).

Habitualmente se emplean dos tipos de fluido térmico: aceites térmicos y agua.

El agua, por sus parámetros termodinámicos, es el mejor fluido térmico que existe, pero su utilización está limitada por las elevadas presiones que impone, de forma que no es práctico emplear agua como fluido térmico por encima de 200°C. Por el contrario, los aceites térmicos tienen tensiones de vapor muy bajas, y pueden utilizarse para transmitir calor a temperaturas altas con presiones ligeramente superiores a la atmosférica.

Para el intercambiador gases - fluido térmico, se puede adoptar la disposición bypass (Fig. 3 18) o en serie (Fig. 3 19).

Para el arreglo en serie, el intercambiador se intercala en la chimenea de tal forma que los gases de combustión pasan siempre a través del mismo. En el caso de bypass puede aislarse el intercambiador del flujo de gases, de modo que, con un conjunto de cortatiros, se puede conseguir que nada, parte o el total del flujo de gases pase a través del equipo. Evidentemente, esto es una ventaja de la disposición bypass con respecto a la serie, ya que ninguna operación de mantenimiento o reparación que hubiera que realizarse en el intercambiador, implicaría la parada de la caldera o del elemento generador de los gases.

3.4.3 METODOS DE CALCULO EN CALENTADORES TUBULARES

Condiciones a Considerar en Cada Diseño

El diseño de un calentador de aire debe realizarse a partir de los siguientes datos iniciales:

- Temperatura de gases (°C)
- Temperatura del aire comburente (°C)
- % medio de (CO₂ + SO₂) en los gases (%)
- Tipo de combustible
- Configuración de la caldera, horno o secador, para estudiar sus pérdidas

Es conveniente definir varias marchas típicas y conocer los datos anteriores en cada una de ellas. También deberán tomarse en cuenta los siguientes datos del propio calentador:

- Tipo de material a emplear
- Tipo de calentador de aire a emplear
- Incremento permitido en la presión de los gases como consecuencia de las pérdidas de carga debidas a la interposición del calentador de aire

Transmisión de Calor en Tubo Liso

Para el cálculo del precalentador de aire, que es similar al del economizador, ver las secciones 3.5

3.5 ECONOMIZADORES

De los generadores de vapor y de las calderas de agua caliente, de agua sobrecalentada y de fluido térmico, por lo regular salen los gases a temperaturas altas desde el punto de vista de su aprovechamiento energético.

En la actualidad, el equipo que más se utiliza para realizar esta función es el economizador, el cual es un intercambiador de calor gases-agua, que se instala en una caldera de vapor para elevar la temperatura del agua de alimentación a esa y, de esta forma, obtener un ahorro de combustible. Por extensión en este trabajo, se llamará economizador a todo intercambiador de gases de combustión-agua.

La idea de realizar este aprovechamiento data de mucho tiempo, de manera que a las primeras calderas de vapor ya se les dotaba de un economizador para este fin. A lo largo de su dilatado tiempo de utilización, la tecnología de los economizadores ha recibido multitud de aportaciones

Antes de la crisis de la energía, es decir, mientras los precios de la energía eran notablemente bajos, el empleo de economizadores presentaba limitaciones económicas. En esta línea, nadie dudaba de su necesidad en las calderas grandes, mientras que en las calderas pequeñas (potencia inferior a 5,000 Mcal/h) no se utilizaban nunca, y en las restantes calderas se instalaban sólo en casos particulares, ya que su rentabilidad era dudosa.

El desarrollo de la tecnología de diseño y construcción de economizadores ha hecho que las inversiones precisadas para su instalación hayan disminuido en valor constante. Por otra parte, al aumentar el costo de los combustibles han aumentado considerablemente los valores de las recuperaciones o ahorros que con estos equipos se obtienen.

3.5.1 TIPOS DE ECONOMIZADORES

Los economizadores están compuestos, básicamente, por un haz de tubos agrupados convenientemente. Por el interior de los tubos circula el agua a calentar, mientras que los gases de la combustión bañan su superficie exterior.

El desarrollo tecnológico ha ido siempre en la línea de modificar los diseños de los tubos con el fin de aumentar la transmisión de calor en un intento de maximizar la rentabilidad y de resolver, al mismo tiempo, algunos problemas colaterales que el empleo de los economizadores plantea, tales como limpieza, corrosión, etc.

A lo largo del tiempo han sido muchos y muy variados los diseños y realizaciones de economizadores. Sin embargo, en el estado actual de la tecnología se ha llegado a un número limitado de tipos que son los que habitualmente aparecen en la oferta mundial de estos equipos.

Generalmente, los economizadores se clasifican en función de las características de los tubos, existiendo cuatro tipos fundamentales:

AESS: Tubos de Acero Estirado sin Aletas

En algunos economizadores se emplean tubos comerciales de este tipo, siendo su aplicación más importante cuando la temperatura de los gases es muy alta y por lo tanto se tienen saltos térmicos muy altos y gran transferencia de calor

AA: Tubos de Acero Estirado con las Aletas Transversales de Acero

Normalmente, se dota a los tubos comerciales de acero estirado de aletas transversales de acero. Estas aletas son cuadradas o redondas. La continuidad entre el tubo y las aletas se obtiene por soldadura o por encastrado por deformación en frío o en caliente. Este tipo de tubos se emplea en todos los procesos de transferencia de calor, siempre que no haya riesgo de

corrosión de los mismos por el ácido sulfúrico procedente del azufre del combustible.

F: Tubos de Hierro Fundido con Aletas

Estos tubos se obtienen directamente por fundición con sus aletas redondas o cuadradas. Este tipo, que fue el más empleado en el pasado, ha quedado hoy en día relegado debido a su alto costo y a su deficiente resistencia mecánica

AF: Tubos de Acero Estirado Recubiertos con Piezas de Hierro Fundido, con Aletas Redondas, Cuadradas o Rectangulares

Estos tubos son los más empleados en la actualidad, ya que presentan las ventajas de la fundición frente a la corrosión ácida y las ventajas del acero estirado en cuanto a la resistencia mecánica.

Para la fabricación de estos tubos se parte de tubo comercial de acero estirado y de piezas de hierro fundido con aletas. Se introduce el tubo de acero en el interior de las piezas, y, para dar continuidad entre ambos materiales se realiza un apriete fuerte entre ellos, mediante calado en caliente o deformación plástica del acero en frío, por la aplicación de presión interna u otros métodos. En las Figs. 3.16 Y 3.17 se incluyen tres modelos de tubos de los tipos AA y AF.

Otra clasificación típica de los economizadores los divide en vaporizadores y no vaporizadores, atendiendo a que en el interior de los tubos el agua pueda alcanzar o no su temperatura de saturación.

Obviamente, en los economizadores vaporizadores se puede utilizar cualquiera de los tipos de tubos AESS, AA y AF, mientras que la fragilidad de la fundición no aconseja el empleo de los tubos F.

FIG. 3.16: TUBOS CON ALETAS TIPO AA

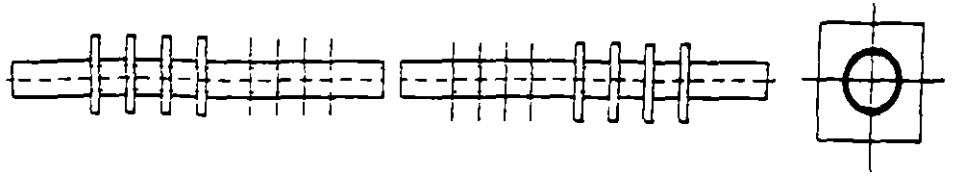
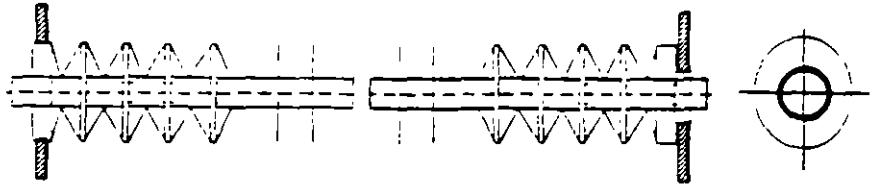


FIG. 3.17: TUBOS CON ALETAS TIPO AF



3.5.2 ARREGLOS MAS FRECUENTES

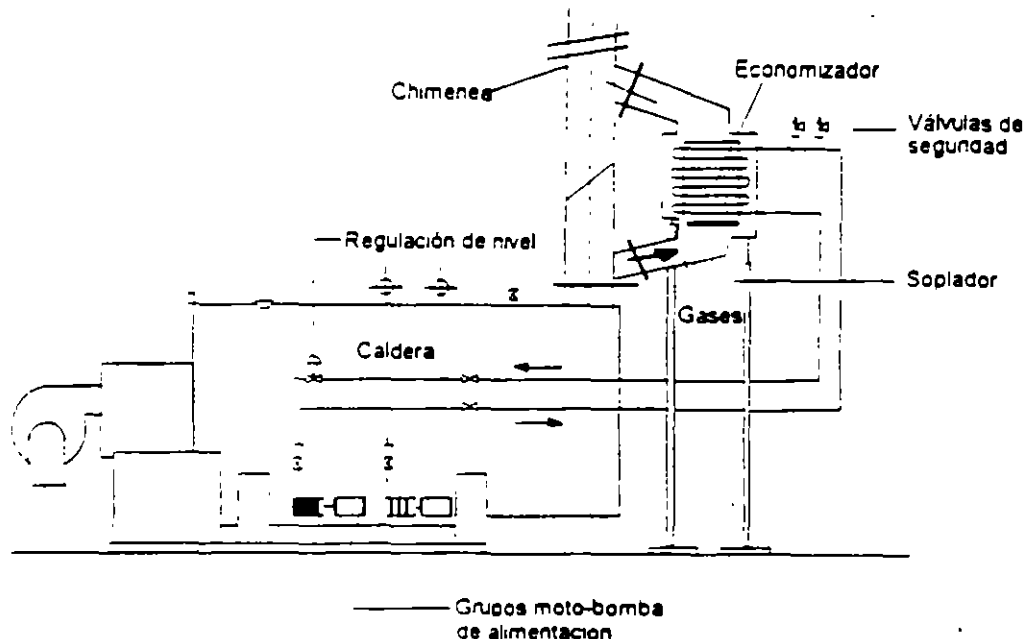
En general, las calderas pequeñas y medianas suelen ser de diseño compacto. La práctica habitual de la instalación de economizadores se resume en los siguientes casos:

Posición del Economizador con Respecto al Flujo de Gases

Se puede adoptar la disposición bypass o la disposición en serie. En las Figs. 3 18 y 3 19 se pueden ver ambas disposiciones.

En el sistema de disposición en serie, el economizador se intercala en la chimenea, de tal forma que los gases de combustión pasan siempre a través del mismo. En el caso de bypass, se instala el economizador en paralelo con el flujo de gases, de tal forma que por un conjunto de cortatiros se puede conseguir que nada, parte o el total del flujo de gases pase a través del economizador. Evidentemente, esto es una ventaja de la disposición bypass con respecto a la serie, ya que ninguna operación de reparación que hubiera de realizarse en el economizador implicaría la parada de la caldera.

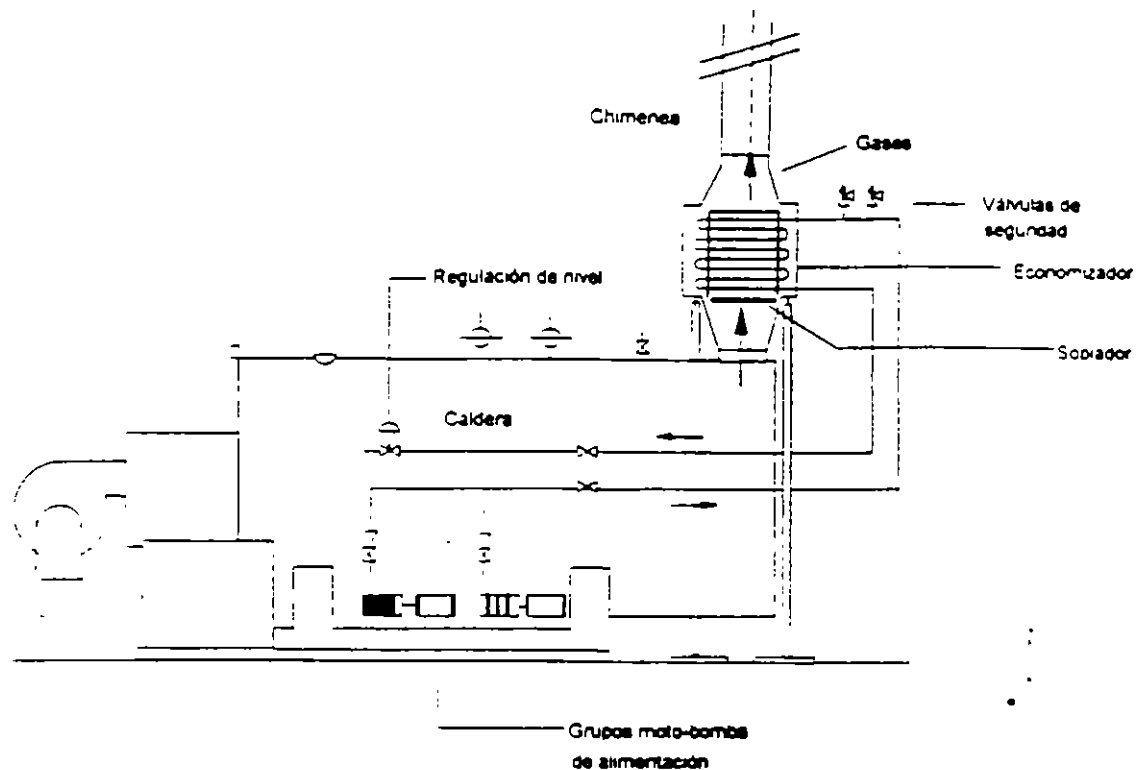
FIG. 3.18: INSTALACION DE ECONOMIZADOR EN CALDERA COMPACTA (En Bypass)



Aunque en los croquis no está indicado, a la hora de realizar la instalación de un economizador se han de satisfacer las siguientes especificaciones generales (en cada caso concreto habrá otra serie de especificaciones particulares que fijará el diseñador).

- Las válvulas para agua deben ser de cuerpo de acero. Es recomendable que sean válvulas de asiento.
- Debe instalarse un equipo de regulación del nivel de agua en la caldera, de forma que la alimentación de agua sea continua y se obtenga el mejor aprovechamiento energético.
- Se instalarán dos válvulas de seguridad, de acuerdo al reglamento vigente de recipientes a presión.
- Los conductos de gases deberán estar dimensionados para el máximo flujo de gases y contruidos de acuerdo a las recomendaciones habituales para evitar pérdidas de carga excesivas. El espesor mínimo será de 4 mm. Las soldaduras de placas se efectuarán con cordón interior y exterior. Las uniones atornilladas llevarán juntas de estanqueidad de amianto.

FIG. 3.19: INSTALACION DE ECONOMIZADOR EN CALDERA COMPACTA (En serie)



- Los cortatiros estarán previstos para trabajar con gases calientes y con las holguras suficientes para ser accionados con suavidad.
- Se instalarán las plataformas y escaleras necesarias para un fácil acceso para inspección y mantenimiento.
- Se instalarán en los conductos de gases dos termómetros, antes y después del economizador, de caña lo suficientemente larga para llegar al centro del conducto.
- Se instalarán dos termómetros en las tuberías de entrada y salida de agua al economizador, con vainas de acero inoxidable.
- Se debe dotar al equipo de los sopladores precisos para una fácil limpieza de las superficies de intercambio.
- El equipo deberá ir provisto de cierres metálicos que eviten salidas de gases, y de puertas para acceso a los tubos, atornilladas y con juntas de amianto.

PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

- Deben aislarse, para reducir pérdidas de calor y proteger al personal
 - Tuberías de llegada y salida de agua, en todo su recorrido
 - Tuberías de vapor de soplado.
 - Conductos de llegada de gases
 - El economizador.
 - Conductos de salida de gases en caso de peligro para el personal o riesgo de formación de rocío ácido.

Es recomendable utilizar aislamiento de fibras de vidrio o lana mineral, forrada con lámina de aluminio u otro similar.

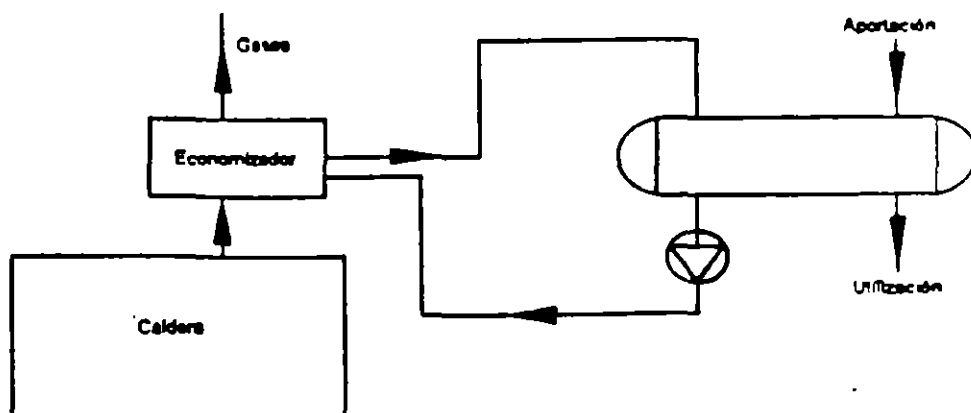
Circuito del Agua

Básicamente pueden adoptarse dos disposiciones en el circuito de agua.

- Que el agua, una vez calentada en el economizador, pase directamente a la caldera. Este es el caso representado en las Figs. 3 18 y 3 19. Habitualmente se instala un juego de válvulas para aislamiento y bypass del equipo
- Que el agua caliente del economizador pase a otros circuitos

En la Fig. 3 20 se muestra un ejemplo de esta última disposición, que se emplea frecuentemente para recuperar calor de los gases de las calderas de fluido térmico, por ejemplo.

FIG. 3.20: RECUPERACION DEL CALOR DE GASES PARA TRANSFERIRLO A OTROS CIRCUITOS



3.6 SOBRECALENTADORES

Ninguna caldera puede producir vapor recalentado a menos que se trate de una de tubos de agua provista de un tambor seco

La cantidad de humedad en el vapor presente en el vapor crece con el régimen de evaporación y en grandes capacidades es común el arrastre de humedad.

Cada 1% de humedad en el vapor reduce el rendimiento en un 2%

Por otro lado, el recalentamiento reduce consumo de vapor en las maquinas que lo utilizan, por tanto disminuye el consumo de vapor por unidad de potencia producida.

La experiencia demuestra que para eliminar cada 1% de humedad en la entrada se requieren aproximadamente, como 3 °C de recalentamiento.

Por otra parte, existen condiciones iniciales de trabajo como en una turbina, que requieren de 425 a 570°C, las cuales son imposible de alcanzar sin recalentamiento, ya que la temperatura de saturación incluso a la presión critica de 226 kg/cm² es sólo de 374°C. El rendimiento en un ciclo Rankine de una turbina en trabajo escalonado con vapor recalentado vana del 80 al 97%, mientras que el del escalón cuyos álabes trabajan con vapor húmedo puede ser tan bajo como 60%. El recalentamiento no sólo reduce las erosiones, sino que, aumenta el rendimiento general.

3.6.1 METODOS PARA RECALENTAR EL VAPOR

Hay dos métodos, en general, para recalentar el vapor, y ambos utilizan el calor de los humos o gases de combustión para eliminar las últimas trazas de humedad y aumentar la temperatura del vapor; estos son:

1. Recalentamiento por convección.
2. Recalentamiento por radiación.

3.6.2 RECALENTADORES PARA ALTAS TEMPERATURAS DE VAPOR

La demanda hoy en día se encuentra en temperaturas de vapor de 482 a 566°C, con una temperatura relativamente constante a lo largo de la zona de trabajo elegida, permitiendo variaciones de $\pm 14^\circ\text{C}$, y en condiciones normales de $\pm 5^\circ\text{C}$.

Por su parte, la temperatura de la flama, para obtener que la del vapor sea más elevada, se acerca a la temperatura de fusión de la ceniza en el carbón y existe una tendencia de ésta a depositarse en forma fluida sobre los tubos de los recalentadores, es decir, forma escoria.

Para estos problemas se tienen las siguientes soluciones:

1. Sitúe el recalentador cerca del hogar para obtener la temperatura de vapor requerida
2. Sitúese un banco de tubos de pantalla en el frente del recalentador, para limitar la acumulación de escorias. La experiencia demuestra que estos tubos deben hallarse bastante separados (30 a 35 cm).

3.6.3 CONTROL DE TEMPERATURA EN RECALENTADORES DE CONVECCION

Un método de control de temperatura de vapor, usual hasta hace poco, era el de desviar (bypass) una parte de los gases de la combustión para que no pasen por la superficie del recalentador durante las altas producciones del vapor. En efecto, al aumentar la producción de la caldera, más gases y a mayor temperatura atraviesan el haz de tubos del recalentador, lo cual, al permanecer constante la superficie de transferencia de calor, origina que la temperatura total del vapor aumente más de lo que puede resistir la máquina accionada. Tal como se muestra en la Fig. 3.21, puede disponerse un canal de desviación con un registro. La resistencia disminuida del gas da lugar a un flujo de éste a través del canal de desviación, permitiendo con ello controlar el proceso de recalentamiento. Las dificultades que presenta el empleo de materiales que den resultado satisfactorio en lo referente a resistencia a la

corrosión y a elevadas temperaturas en los canales de gas, ha limitado el empleo del método de control a base de registro.

FIG. 3.21: CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR POR FLUJO DE GAS

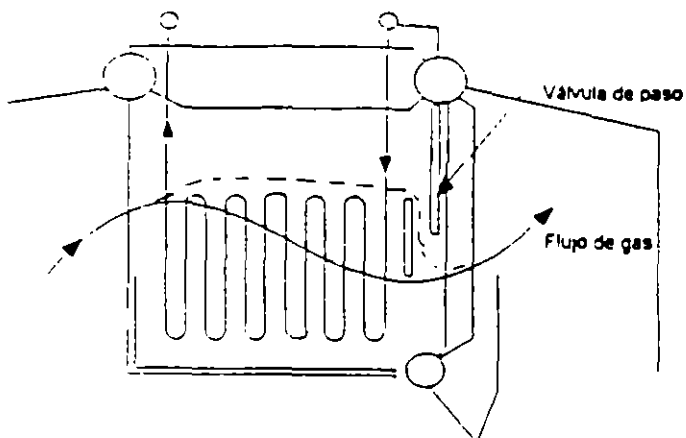
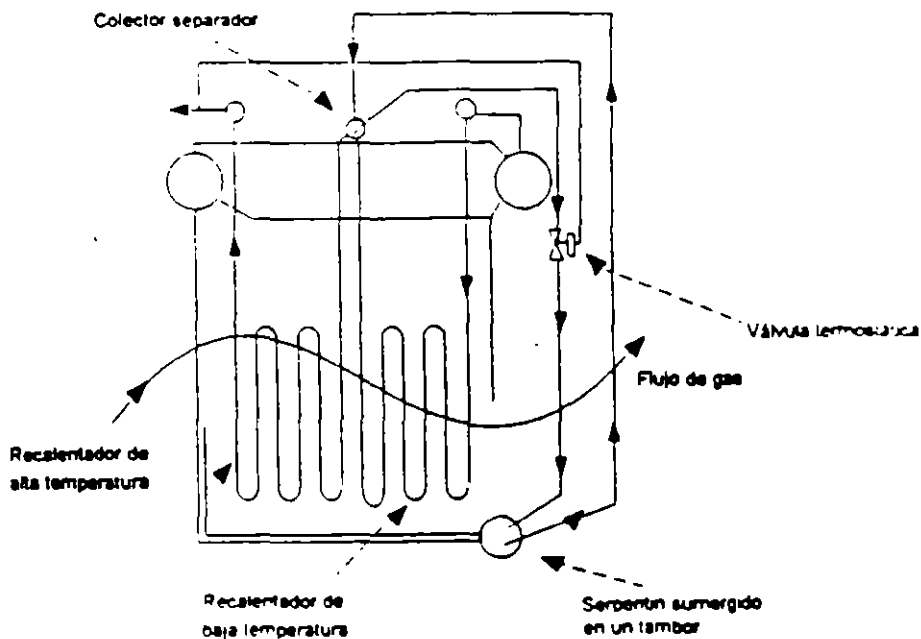
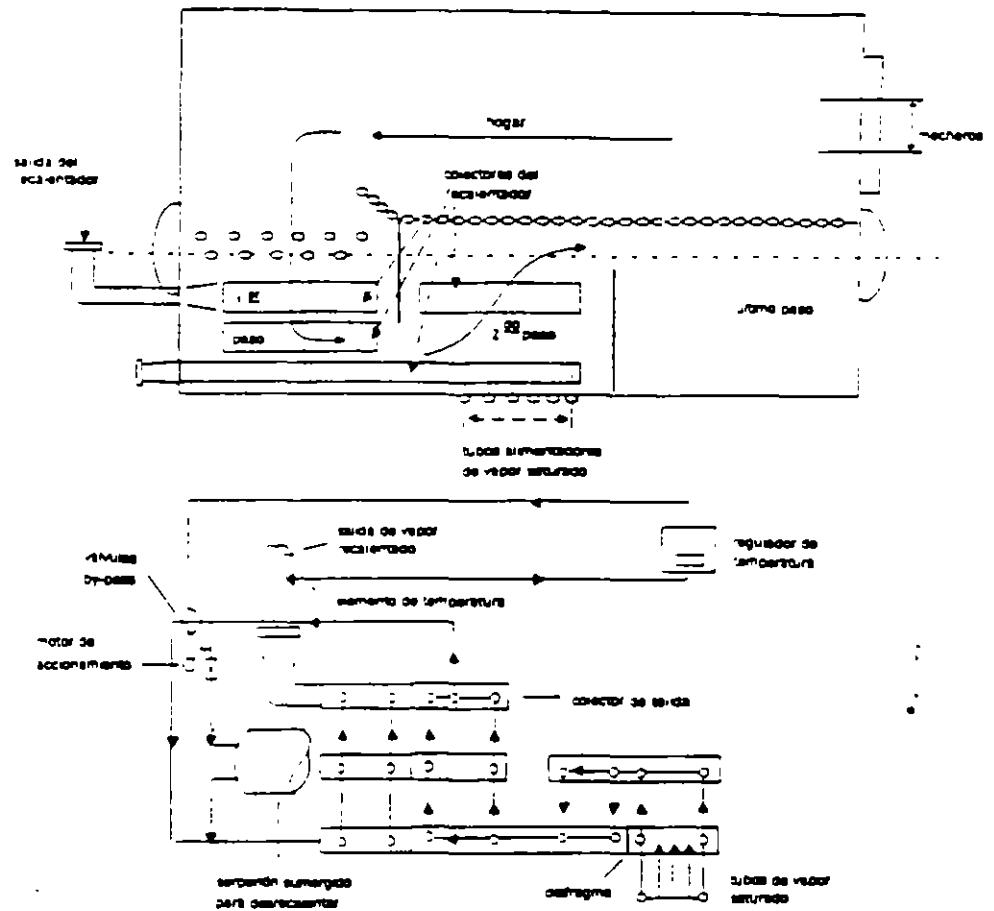


FIG. 3.22: DESRECALENTADOR DE SERPENTIN SUMERGIDO EN EL TAMBOR



PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

FIG. 3.23: ESQUEMA DE LA CIRCULACION DEL VAPOR Y DE LA REGULACION DE TEMPERATURA



Otro método se muestra gráficamente en la Fig. 3.22. Una parte del vapor de la sección de baja temperatura del recalentador es desviada a un serpentín sumergido en el tambor inferior de la caldera controlado por una válvula de paso; esta última es accionada según la temperatura final del vapor, con lo que el dispositivo resulta automático. El vapor desrecalentado es devuelto y se mezcla con el vapor que no ha sido desrecalentado, en un colector de ambos vapores y por último, el recalentamiento final tiene lugar en el recalentador del segundo escalón. Este dispositivo presenta la ventaja de que no hay mecanismos expuestos a la acción corrosiva de los gases de

combustión. Por consiguiente no existe un sobrecalentamiento del metal a altas temperaturas.

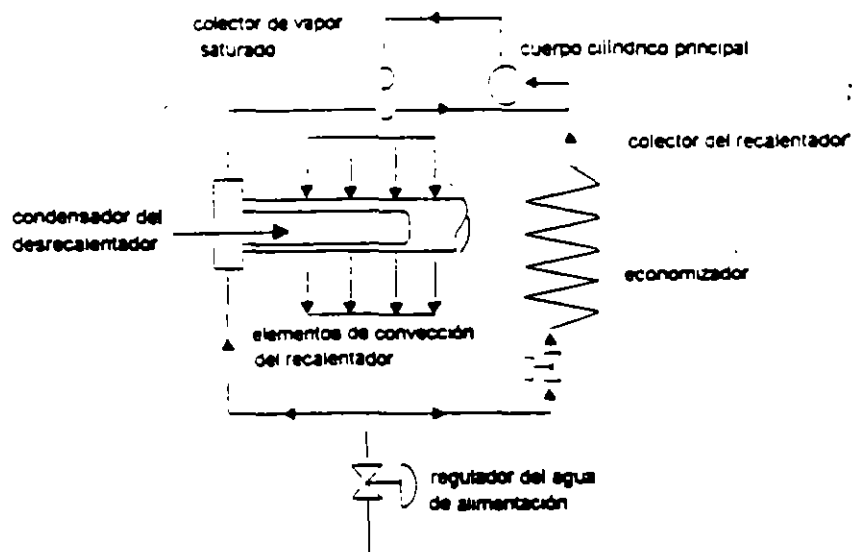
La Babcock & Wilcox Company ha utilizado este sistema durante años. Una instalación de estos últimos tiempos se muestra en esquema en la figura 3 23 aplicada a un generador de vapor normalizador de tipo F. Los gases fluyen horizontalmente a la parte posterior del hogar penetrando por el primer paso y pasando a continuación de éste al segundo y último paso, desplazándose verticalmente al equipo de recuperación de calor. Tal como muestra el diagrama, el vapor saturado del cuerpo cilíndrico superior penetra en la sección del segundo paso de un recalentador y después al colector opuesto, es decir, también en el segundo paso, y retrocede al colector primitivo. Un diafragma divide las dos secciones del colector del recalentador; entonces el vapor pasa a través de tubos a una sección del colector de salida. En este punto, todo el vapor sale de la caldera y una parte de vapor parcialmente recalentado se desrecalienta, uniéndose después las dos corrientes de vapor que pasan a través de la sección final del recalentador de alta temperatura. Un control automático de temperatura mantiene una regulación precisa.

Otro método de control se muestra en el esquema de la Fig. 3 24. Este esquema controla el flujo de agua a la caldera de acuerdo con la temperatura de vapor requerida. Una parte del agua de alimentación de la caldera, después de desviarse del regulador de agua, pasa a un desrecalentador-condensador situado en la admisión del colector del recalentador. El vapor procedente del cuerpo cilíndrico penetra en el colector del recalentador y se humidifica por la superficie de calefacción situada en el colector. Un control automático regula la cantidad de agua de alimentación que se desvía.

El comparativo de los resultados obtenidos al desviar el gas por un bypass con relación al desrecalentamiento, se indican en la Fig. 3 25. Esta caldera suministra vapor a una máquina con tres calentadores de agua de alimentación. La temperatura del agua de alimentación, con todos los calentadores en funcionamiento, varía desde 99°C al 20% de producción de la caldera hasta 149°C al 100%. Si el calentador de alta presión está fuera de servicio, la temperatura del agua de alimentación es constante debido a un desaerador a presión constante, y el recalentador de vapor funcionará de forma que proporcione un vapor a temperatura constante. La temperatura del agua de alimentación se indica en la parte inferior de la figura. El efecto

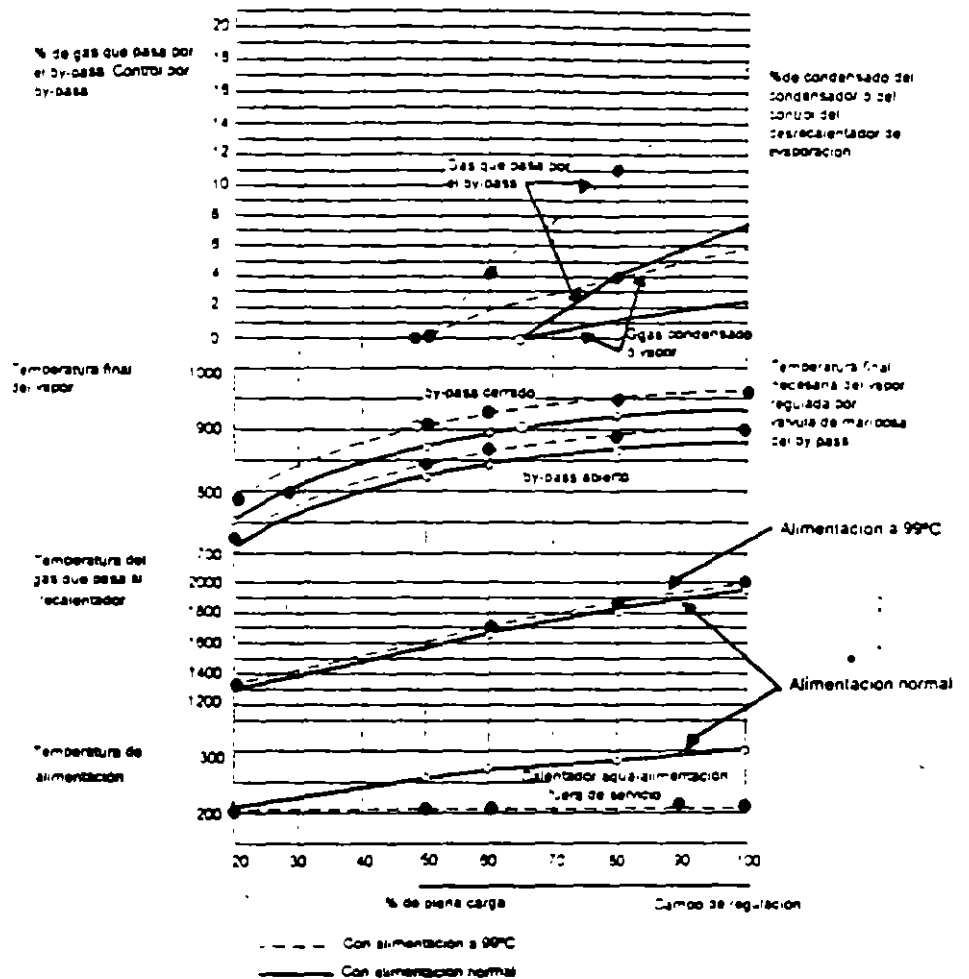
de la temperatura del gas sobre el recalentador se indica más arriba. Siguen a continuación las curvas características de temperatura de vapor y convección del recalentador. Una disminución de la temperatura de alimentación aumenta el flujo de gas y eleva la temperatura del vapor. El desviar por by-pass el gas de combustión rebaja la temperatura de vapor. Con agua de alimentación normal se alcanza la temperatura de vapor deseada con una carga de 85% y con agua de alimentación a 99°C para un 48% de carga, es decir 482°C. Desviando por by-pass hasta un 7% del flujo de gases de combustión con temperaturas de alimentación normal, mantiene constante la temperatura de vapor para una carga de 100%. En la misma forma, el desviar por by-pass hasta un 17% de los gases de combustión, mantiene constante la temperatura del vapor (agua de alimentación) hasta un 100% de la carga de la caldera.

FIG. 3.24: CONTROL DE TEMPERATURA DEL VAPOR EN EL CONDENSADOR FOSTER-WHEELER DE DESRECALENTAMIENTO



PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

FIG. 3.25: COMPARACION DE CARACTERISTICAS Y SISTEMAS DE CONTROL DE DESRECALENTADOR POR VALVULAS DE BY-PASS, CONDENSADOR Y EVAPORADOR



El mismo control de temperatura de vapor podría obtenerse desviando un 28% del agua de alimentación, utilizando un condensador desrequeador con agua de alimentación normal. También el desviar un 6% del agua de alimentación mantendrá constante la temperatura del vapor con agua de alimentación a 99°C.

PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

3.6.4 SUPERFICIE DE CALEFACCION EN UN SOBREALENTADOR

Al calcular la superficie necesaria en un recalentador de convección, se suele conocer la cantidad de vapor a recalentar y las temperaturas inicial y final. Se pueden deducir las temperaturas de entrada y salida de los humos tras un cuidadoso estudio del tipo de caldera que nos ocupe con ayuda, además, de datos empíricos sobre la absorción de calor en las distintas partes de la caldera. La temperatura inicial naturalmente, depende de la posición del recalentador y del régimen de la caldera. La siguiente fórmula que es una expresión de la transmisión térmica basado en la media aritmética de la diferencia de temperaturas, da un camino para enfrentarse con el problema:

$$A = \frac{Q(h_2 - h_1)}{\left(\frac{T_1 - T_2}{2} - \frac{t_1 - t_2}{2} \right) U} \quad (3.15)$$

Donde:

A	=	superficie de calefacción, en m ² ,
Q	=	producción de vapor, en kg/hora,
T ₁	=	temperatura de los humos al entrar al recalentador, en °C
T ₂	=	temperatura de los humos al salir del recalentador, en °C
t ₁	=	temperatura del vapor al entrar en el recalentador, en °C
h ₁	=	entalpia del vapor que llega al recalentador
h ₂	=	entalpia del vapor que sale del recalentador
t ₂	=	temperatura del vapor al salir del recalentador, en °C
U	=	coeficiente de transmisión, Kcal/h-m ² -°C.

Para recalentadores por convección, pueden emplearse valores de U desde 25 a 60, según sea lenta o veloz la corriente de humos.

3.6.5 EJERCICIO

Un recalentador integrado a una caldera funciona con los datos siguientes:

Presión	=	36 kg/cm ² abs
Temperatura de entrada al sobrecalentador, t_1	=	243°C
h_1	=	675.9 kcal/kg
Temperatura de salida del sobrecalentador, t_2	=	525°C
h_2	=	834.3 kcal/kg
Temperatura de los humos al sobrecalentador, T_1	=	1010°C
Temperatura de los humos a la salida del sobrecalentador, T_2	=	605°C
Capacidad nominal de la caldera	=	80 t/h. (masa de los humos, 130,000 kg/h)

¿Cuál será la superficie del recalentador?

Solución

$$A = \frac{80,000(834.3 - 675.9)}{25 \left(\frac{1,010 + 605}{2} - \frac{525 + 243}{2} \right)} = \frac{12,672,000}{\left(\frac{1,615}{2} - \frac{768}{2} \right) 25} = \frac{12,672,000}{29,912.5} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A = 425.41 \text{ m}^2$$

3.7 DEAREADORES

La exigencia actual de altas temperaturas, superficies limpias y agua de alimentación pura, hace de la corrosión un serio problema en las calderas y equipos que operan con vapor. La conservación de un alto grado de alcalinidad en el agua de la caldera ha sido utilizada para reducir la corrosión, pero mucho mejor resultado produce la eliminación del oxígeno. En algunas ocasiones se ha mencionado el fenómeno de la disociación del agua en el recalentado, formando oxígeno naciente que reacciona con el metal de los tubos, como causa también de corrosión.

3.8 PURGAS DE UNA CALDERA

La evaporación continua de agua en una caldera produce inevitablemente, un aumento en la concentración de los sólidos suspendidos en el agua que se encuentra en ella, haciéndose necesario eliminarlos periódicamente o en forma continua.

Una purga se define como la mecánica que se sigue para desalojar lodos, grasas, incrustaciones y el mismo aire de la caldera.

3.8.1 TIPOS DE PURGAS

Las purgas en una caldera pueden clasificarse como

- a) De fondo
- b) De superficie
- c) De cristal de nivel
- d) De columna
- e) De instrumentos
- f) De venteo

Purga de Fondo

Esta purga consiste en desalojar los lodos que se sedimentan en el fondo de la caldera al evaporarse el agua. Esta purga es muy importante, ya que evita el recalentamiento de las partes más bajas de la caldera y permite disminuir la concentración de sólidos en suspensión.

En instalaciones de presión moderada existen dos válvulas que nos permiten realizarla: una válvula de apertura rápida y una de cierre lento. El procedimiento para realizar esta purga es el siguiente:

- 1) Subir el nivel del agua en la caldera a medio cristal.

- 2) Abrir primero la válvula de apertura rápida, después la de cierre lento.

Frecuencia.- La norma UNE-9075 indica los límites recomendables en las características del agua en el interior de las calderas. La Fig. 3.29 indica estos valores tanto en calderas, tubos de agua, así como tubos de humo, en función de la presión.

FIG. 3.29: NORMAS UNE-9075 SOBRE LÍMITES EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA EN EL INTERIOR DE LAS CALDERAS

Tipo de caldera	Presión kg/cm ²	Salinidad Total en CaCO ₃ (mg/l)	Silice en SiO ₂ (mg/l)	Sólidos en suspensión (mg/l)	Cloruros en Cl (mg/l)
TUBOS DE AGUA (ACUOTUBULARES)	0-20	3.500	100	300	2.000
	20-30	3.000	75	250	1.500
	30-40	2.500	50	150	1.000
	40-50	2.000	40	100	800
	50-60	1.500	30	60	650
	60-70	1.250	25	40	500
	70-100	1.000	15	20	350
TUBOS DE HUMO (PIROTUBULARES)	0-15	7.000	100	300	3.000
	15-25	4.500	75	300	2.000

Con estos valores y los resultados de los análisis del agua que realice el Ing Químico de la planta, establecerá la frecuencia de esta purga.

Cuando no se cuenta con estos análisis, lo cual no es deseable, se recomienda hacer la purga cada 8 horas como mínimo, para prevenir problemas en la operación del sistema de vapor.

En calderas de alta presión, cuyo vapor se utiliza fundamentalmente en turbinas, el problema principal no son los sólidos disueltos totales sino el contenido de SiO₂. El motivo radica en que el silice disuelto en el agua busca

un equilibrio electroquímico con el silice del vapor, de tal forma que a mayores presiones es mayor el contenido porcentual del silice en el vapor

Este elemento se elimina con productos químicos y con las purgas de fondo y superficie.

Purga de Superficie

La purga de superficie también llamada "continua", es el mecanismo empleado para eliminar sustancias en suspensión, tales como espumas, grasas o basura presentes en la superficie libre del agua frente a la cámara de vapor

Para lograr esta purga solo se requiere sumergir de 2 a 3 cm por debajo del nivel libre del agua un tubo enflautado (perforado) con una salida hacia el drenaje o algún sistema de recuperación de calor, controlando esta purga con una válvula medidora que permanece abierta lo suficiente durante todo el tiempo de operación de la caldera.

Frecuencia.- Ininterrumpida (constante)

Purga de Cristal de Nivel

Por disposición de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, todas las calderas cuentan con una "munilla" del nivel del agua dentro de la caldera, llamada "cristal de nivel"

Este tubo de cristal se tapa o incrusta con los lodos de la caldera, falseando su nivel, por lo que es necesario purgarlo. Para hacerlo, el fabricante incluye una válvula en su diseño.

Frecuencia.- Esta purga se debe realizar cada vez que se arranque el equipo, en cambios de turno y al mismo tiempo que la purga de columna (con asiento en los registros o bitácoras).

Purga de Columna

Esta purga se realiza, obviamente en equipos que cuenten con una columna de agua que se encargue de mantener el nivel del agua dentro de la caldera.

La columna de agua es un depósito donde se acumulan los lodos

La purga se realiza por medio de una válvula localizada en el fondo de la columna.

Frecuencia.- La misma que para la purga de fondo.

Purga de Instrumentos

Todos los instrumentos conectados a líneas o venas de vapor corren el riesgo de quedar obstruidos por incrustación, por lo que se hace necesario purgar los conductos donde se insertan. Esta purga se realiza por medio de una válvula localizada al final de la línea de instrumentos o arrojando estos lo suficiente para liberar vapor.

Frecuencia.- Esta purga se debe realizar cuando la caldera cuente con presión, 1 vez al mes

Venteo

Esta purga de venteo consiste en liberar el aire atrapado en el domo superior y conductos de vapor cuando el sistema empieza su operación

La presencia de aire en líneas e incluso en la caldera, producirá golpes, oleajes y ruido, que pueden dañar los equipos instalados.

Esta purga se realiza abriendo las válvulas localizadas convenientemente en la caldera o en las líneas de vapor

Frecuencia.- Esta purga se debe realizar cada vez que comience la operación de la caldera, si es que en dicho momento la presión manométrica es cero

3.9 VALVULA DE SEGURIDAD

3.9.1 CLASIFICACION DE LAS VALVULAS DE SEGURIDAD

Una válvula de seguridad tiene como función liberar el excedente de presión o energía del recipiente donde se encuentra instalada, siendo la capacidad de destóque requerida equivalente a la capacidad de generación del equipo. Las válvulas de seguridad, se clasifican básicamente, en

- a) Válvula de alivio, la cual abre proporcionalmente en respuesta al incremento de presión que se presente corriente arriba de ella. Este tipo de válvula se utiliza para líquidos.
- b) Válvula de seguridad propiamente dicha, caracterizada por abrir completamente en forma rápida. Este tipo de válvula se emplean para vapor o aire.

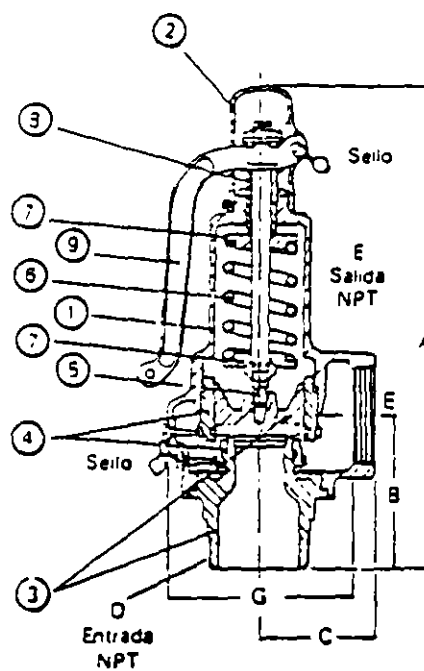
Las válvulas de seguridad se localizan instaladas en la parte superior de la caldera de vapor (domo superior).

Las válvulas de alivio también están colocadas en la parte superior, pero de calderas que producen agua caliente; su descarga puede estar conectada a un tanque de expansión para producir vapor instantáneo aprovechando el cambio de presión.

Se debe tener mucho cuidado en la calibración de cualquiera de los dos tipos de válvula, ya que una presión de ajuste arriba de la necesaria permittina, en un momento dado, que la caldera trabaje a presión mayor de la debida, con los consiguientes riesgos operacionales, en tanto que, una presión de ajuste inferior a la requerida ocasionaria que las válvulas abrieran con demasiada frecuencia, ocasionando desperdicios de energía.

FIG. 3.33: VALVULA DE SEGURIDAD

PARTE	MATERIAL
1 Bonete	Bronce
2 Casquillo	Bronce
3 Base y disco	Bronce
4 Anillos de ajuste	Bronce
5 Vástago	Acero al carbón
6 Resorte	Acero al carbón
7 Roldanas	Latón
8 Tornillos de compresión	Latón
9 Palanca	Bronce



PARTES COMPONENTES DE UN GENERADOR DE VAPOR

3.9.2 *NORMATIVIDAD PARA INSTALACION DE VALVULAS DE SEGURIDAD*

La instalación de las válvulas de seguridad y alivio, así como su selección y cálculo, están normadas en los artículos 43, 44, 45, 46, 47, 48 y 108, del Reglamento para Inspección de Generadores de Vapor y Recipientes Sujetos a Presión, de la Secretaría del Trabajo, mismos que se transcriben a continuación:

Artículo 43° Válvulas de Seguridad

Todo generador, cuya superficie de calefacción sea menor de cincuenta metros cuadrados, o que su capacidad evaporativa sea hasta de mil kilogramos de agua por hora, tendrá una válvula de seguridad.

Cuando su superficie de calefacción o capacidad evaporativa sea mayor que los valores indicados anteriormente, tendrá dos o más válvulas de seguridad.

Todo recipiente sujeto a presión deberá tener las válvulas necesarias para su seguridad, debidamente calculadas.

Artículo 44° Tipo de Válvulas de Seguridad Permitido

Sólo se permitirá el empleo de válvulas de seguridad del tipo "Resorte" de carga directa. Queda prohibido el empleo de válvulas de seguridad llamadas de "palanca" y "Peso directo".

Artículo 45° Ajuste

Una o más válvulas de seguridad del generador se ajustaran a la presión máxima de trabajo permitida, pudiéndose ajustar el resto de ellas dentro de un tres por ciento en exceso, para cada una sin que la suma de por cientos de exceso en el ajuste de todas ellas exceda del diez por ciento de la presión máxima de trabajo permitida.

Artículo 46° Capacidad

La capacidad máxima de descarga de una válvula de seguridad deberá determinarse a una presión de tres por ciento mayor a la que tenga de ajuste, con una diferencia entre presiones de apertura y de cierre no mayor de cuatro por ciento de la de ajuste, no debiendo ser esa diferencia, en ningún caso, menor de ciento cuarenta y un gramos por centímetro cuadrado

El diámetro de la válvula o válvulas de seguridad se calculará de acuerdo con la fórmula señalada en el artículo 108.

Artículo 47° Instalación

La instalación de las válvulas de seguridad en los generadores deberá llenar los requisitos siguientes

1. Todo generador deberá tener conexiones apropiadas para la válvula o válvulas de seguridad requeridas, independientemente de cualquiera otra conexión de vapor, debiendo ser el área del orificio igual al área o la suma de las áreas de la válvula o válvulas que de él dependan.
2. Las válvulas de seguridad deberán colocarse lo más cerca posible del generador y, en ningún caso, se permitirá que haya válvulas de cierre entre ambos, ni tampoco en el tubo de descarga de las mismas a la atmósfera.
3. Cuando se usen tubos de descarga, éstos deberán tener un área no menor que la de la válvula y estarán equipados con dispositivos de desagüe para evitar que el agua se acumule en la parte superior de la válvula.
4. Cuando se coloque un codo en el tubo de descarga de la válvula se pondrá cerca de ésta, debiendo estar el tubo fijamente sostenido.
5. Si se usa un silenciador en la válvula, el área de salida deberá ser lo suficientemente amplia para evitar que la contrapresión entorpezca la operación o disminuya la capacidad de descarga. Además estará

construido de manera de evitar que se obstruya la salida del vapor, depósitos o desprendimientos de sus partes constitutivas.

- 6 La descarga de la válvula o válvulas de seguridad deberá hacerse siempre fuera de las plataformas o andamios de trabajo de los generadores.

Artículo 48° Válvulas de Seguridad de Recalentadores

Dentro de la capacidad de descarga de la válvula o válvulas de seguridad de todo recalentador, unido a su generador, deberá estar incluida la de las válvulas de seguridad del generador, siempre que no haya válvulas intermedias entre la de seguridad del recalentador y la del generador, y siempre también que la capacidad de descarga de la válvula o válvulas de seguridad del generador sea por lo menos de setenta y cinco por ciento de la capacidad total requerida.

Artículo 108° Diámetro de las Válvulas de Seguridad

El diámetro de las válvulas de seguridad se determina por la siguiente ecuación:

$$D = 26 \sqrt{\frac{H}{0.59 - P}} \quad (315)$$

Donde:

H	Superficie de calefacción en m ²
P	Presión de máxima del trabajo, kg/cm ²
0.59 y 26	Constantes de ajuste de unidades
D	Diámetro, mm

Nota: El diámetro calculado por esta fórmula puede ser sustituido por más de una válvula, siempre y cuando la suma de las AREAS de estas sea igual a la del diámetro calculado.*

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, 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 muestreo e instrumentos.
- G. Cámara de TV para observación de los fuegos en el hogar.
- H. Purgas y venteos.- A lo largo de la tubería y colectores de las calderas se proveen válvulas de purgas o drenajes y venteos.

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

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

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

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

Las purgas y venteos en un generador de vapor se proveen con una válvula 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.

CIRCULACIÓN DEL AGUA EN LA CALDERA

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para la producción continua de vapor en el sistema hervidor, es necesario una circulación constante en las paredes, pantallas, bancos, cabezales y tubos para que el vapor formado en las paredes de tubos y elementos hervidores 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 y el flujo de vapor producido W_v en la siguiente forma:

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

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 $n = 1 (Y/1)$ 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 éste 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 degradación 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. 1. Al tubo descendente llega un flujo de calor menor que al tubo elevador (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_1 del fluido en esta columna va a ser menor que el peso específico P_2 del fluido de la columna (2) y en consecuencia en el punto de unión (3) la columna (1) va ejercer una presión estática menor que la ejercida por la columna (2). La diferencia entre las 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.

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.
- * Circulación controlada.
- * Circulación forzada.
- * Circulación combinada.

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

CIRCULACIÓN NATURAL

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

CIRCULACIÓN CONTROLADA

En las calderas que funcionan a presión elevada (más de 150 kg/cm²), 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/cm² 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 corners) 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.

La fabricación de esta 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.

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.

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.

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 helicoidalmente en la pared interior para generar un flujo centrífugo en el interior del tubo; esta 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.

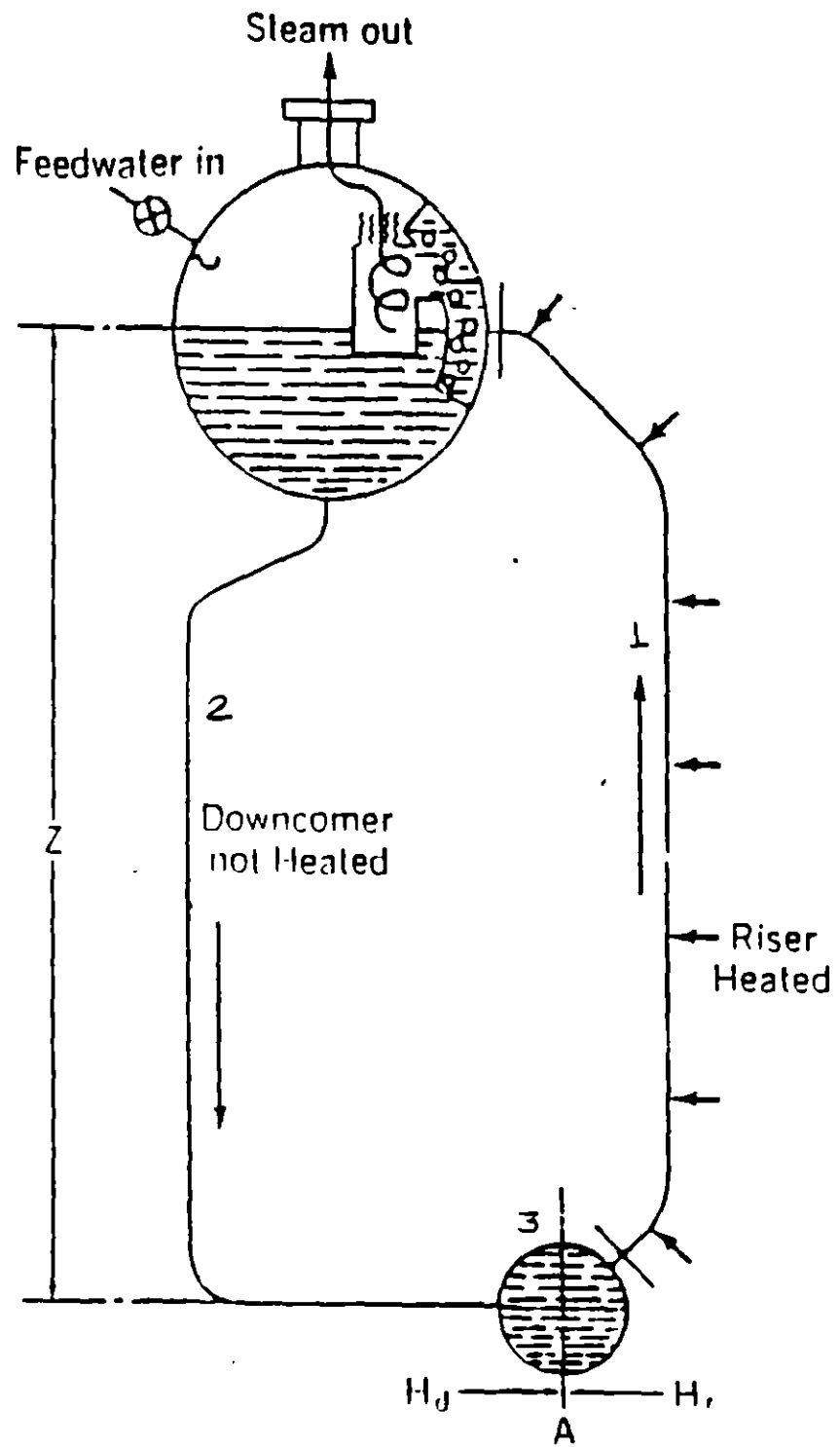


Fig. 1 Simple natural-circulation circuit (diagrammatic) including primary steam separator in drum.

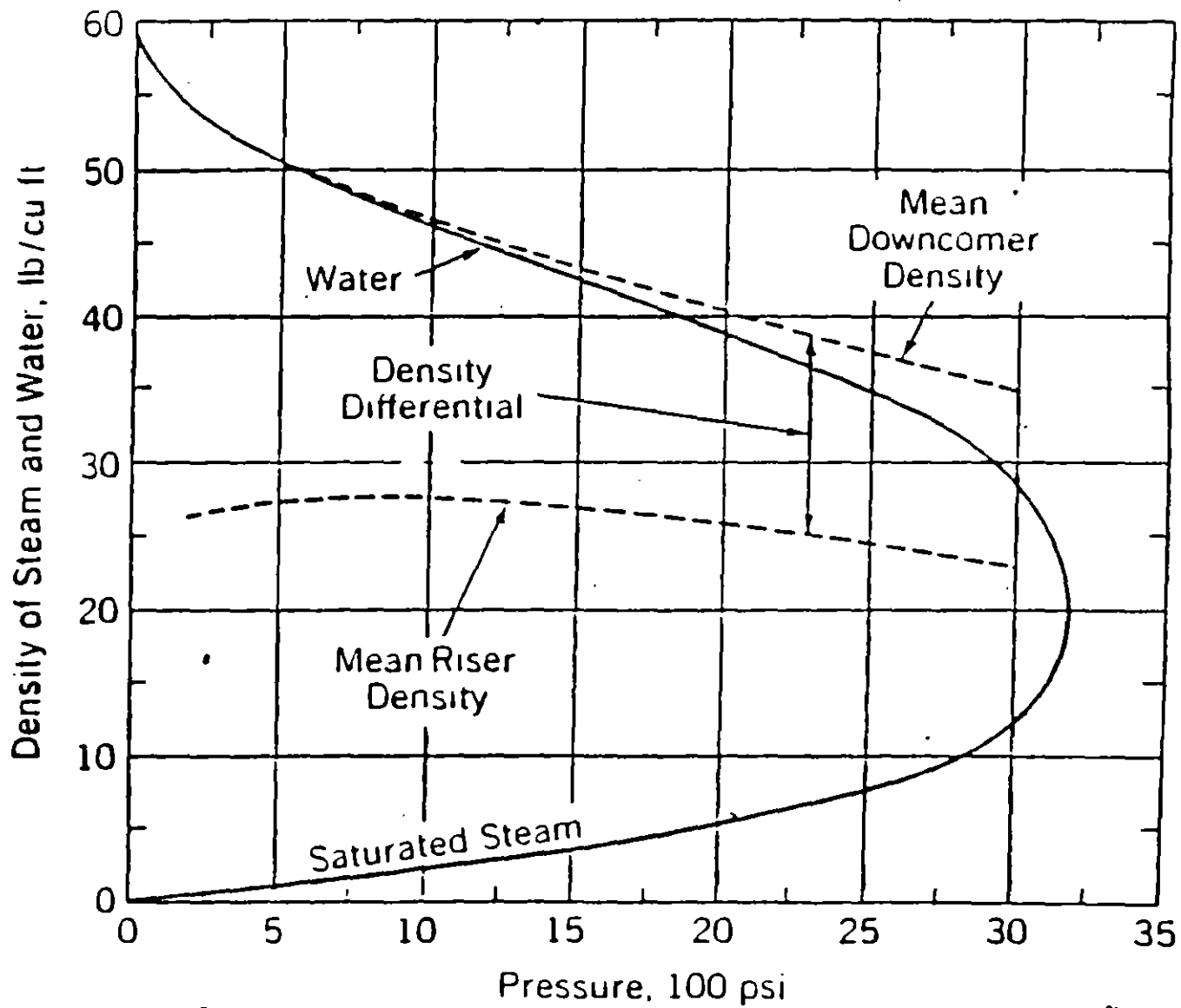


Fig. 2 Effect of pressure on density in downcomers and risers

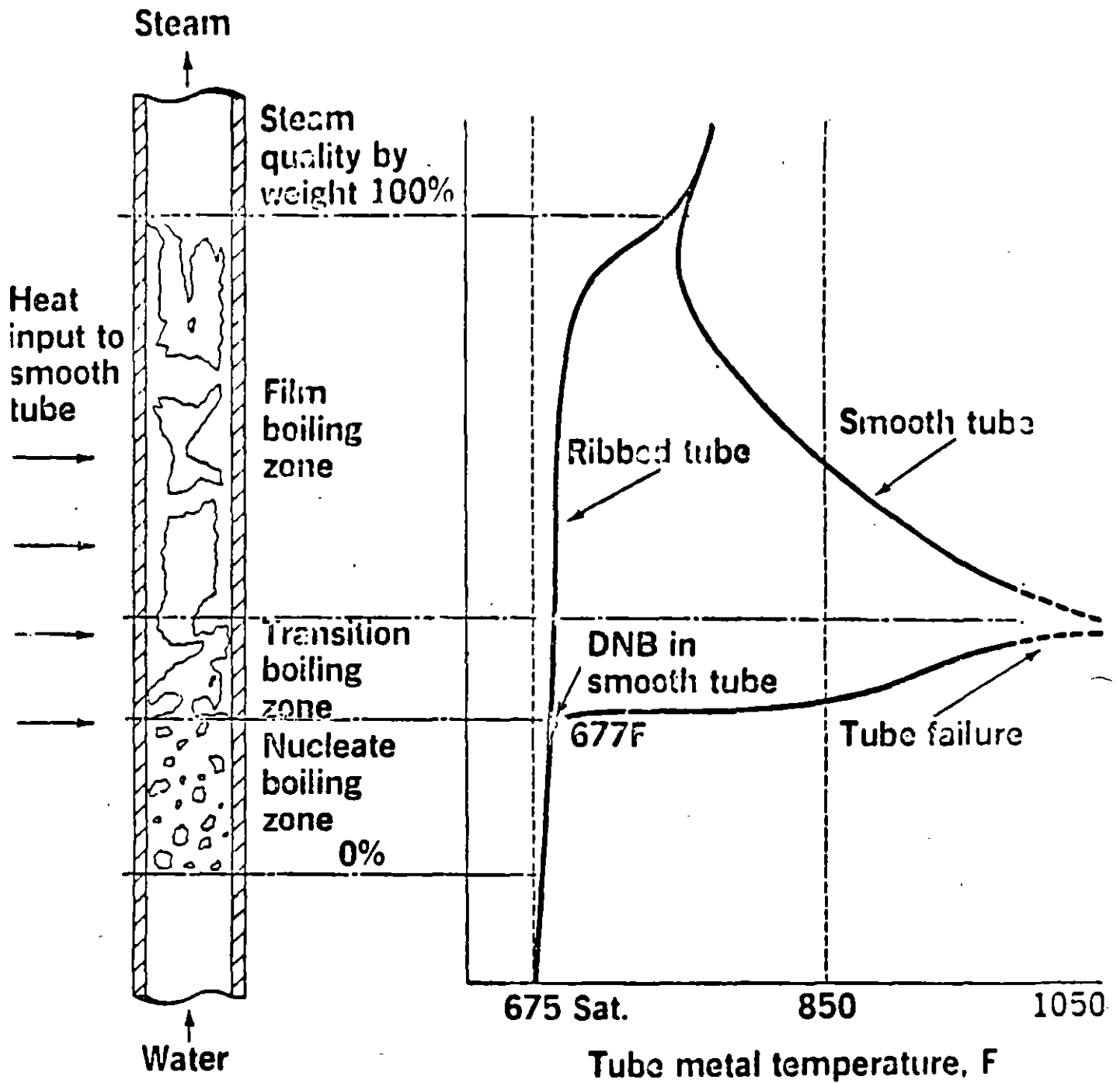


FIG. 3. Furnace smooth tube failure related to DNB

PSD-93-1019

TABLA No. 1
TIPOS BASICOS DE ESPECIFICACION

	ESPECIFICACION DE DISEÑO DETALLADO	ESPECIFICACION DE COMPORTAMIENTO
ALCANCE	Se le indica al fabricante o vendedor que hacer y como hacerlo	Se le indica al fabricante o vendedor que características o atributos se requieren del producto final, dejándolo en libertad de seleccionar los detalles.
RESPONSABILIDAD DEL RESULTADO	Normalmente recae sobre el solicitante	Completa sobre el Fabricante o vendedor
CALIFICACION Y CUALIDADES DEL FABRICANTE	Se aceptan fabricantes poco experimentados, pero se necesitan ingenieros solicitantes expertos	Se canaliza a fabricantes con un buen historial de experiencia y comportamiento
COSTOS	Generalmente resulta mas costoso, pero pueden ser analizadas y separadas muchas partidas de productos, de linea	Es mas difícil separar partidas y se limita la capacidad de analizar los costos parciales del fabricante.
VIGILANCIA Y SUPERVISION DE PROGRAMAS Y DE SUBCONTRATISTAS	Relativamente facil de vigilar	Se dificulta y frecuentemente se detecta un problema cuando es tarde para tomar acciones correctivas
INTERACCIONES	Se requiere una extensa coordinacion es el mejor camino cuando las interacciones son significativas	Es el mejor camino si las interacciones estan limitadas o no son determinantes.

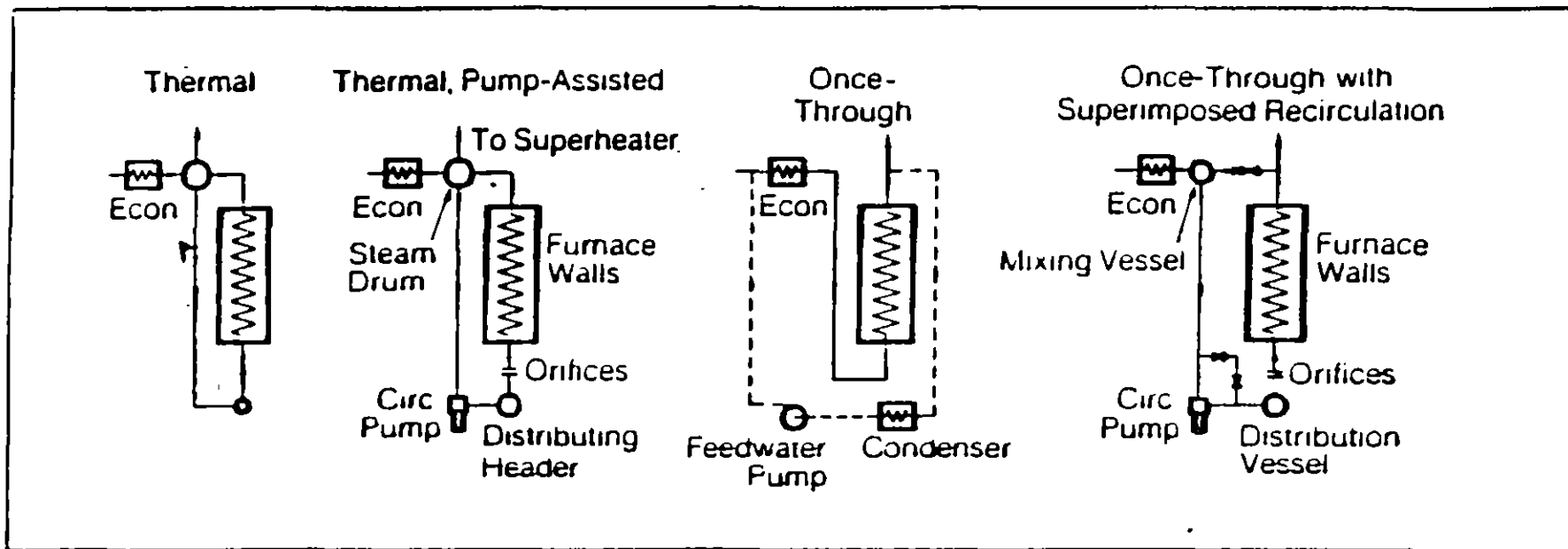


Fig. 4 Steam-generator circulation systems

CAPITULO 5

CONSUMO DE ENERGIA TERMICA

5.1 SISTEMAS DE VAPOR

Al examinar cualquier sistema de vapor a detalle, es necesario definir las partes principales que lo forman, con lo cual se puede estimar la eficiencia total del mismo y comprender la importancia de elevarla.

Un sistema de vapor incluye las siguientes partes.

- **Caldera o generador de vapor.** Equipo que produce vapor, saturado o sobrecalentado, quemando algún o varios tipos de combustibles.
- **Tuberías de distribución.** Conductos que permiten transportar el vapor producido en la caldera o generador, hasta los puntos en los que será utilizado. Dependiendo del servicio que se desea suministrar con el vapor, las tuberías de distribución requieren para su operación, tales como: válvulas de control, separadores de humedad, acondicionadores de vapor, sistemas de drenado para la eliminación de condensados formado en las tuberías, instrumentos de medición y control y aislamiento térmico para evitar las pérdidas de calor.
- **Sistemas de retorno de condensados.** Estos sistemas comprenden las tuberías de drenado desde los equipos consumidores de vapor, hasta las tuberías de recolección que los conducen al tanque de

almacenamiento, así como los equipos de tratamiento adecuados para hacer que los condensados recuperados puedan ser usados nuevamente en la producción de vapor. Un sistema típico es compuesto de trampas de vapor, válvulas de control, sistemas de bombeo, instrumentación, tanques de almacenamiento y aislamiento térmico.

- **Equipos consumidores de vapor.** Son los equipos en donde el vapor es utilizado como medio de calentamiento, como agente químico, para producir trabajo o para generar indirectamente electricidad.

5.1.1 EFICIENCIA DE LA CALDERA O GENERADOR

El cálculo de la eficiencia en la generación de vapor se puede realizar por métodos directos o indirectos.

El método directo se basa en la definición de eficiencia, "energía utilizada para generar vapor, o sea, la diferencia de entalpías entre el agua de alimentación y el vapor producido multiplicada por la cantidad producida, dividida entre el poder calorífico de combustible multiplicado por el consumo.

El método indirecto evalúa la eficiencia mediante el análisis de las pérdidas de energía que se presentan en la caldera. Estas son debidas al calor de los gases de escape, pérdidas por radiación y convección desde las paredes del equipo hacia la atmósfera, pérdidas por purgas y pérdidas por combustión fuera de los niveles óptimos. Para obtener la eficiencia, cada una de estas pérdidas deben ser evaluadas utilizando equipo e instrumentación adecuado

$$\eta = 100\% - \sum (\text{pérdidas}) \quad (5.1)$$

5.1.2 EFICIENCIA DE LAS TUBERIAS DE DISTRIBUCION

Similarmenre, puede evaluarse la eficiencia de esta parte del sistema directa o indirectamente.

El método directo consiste en medir la energía que llega hasta los usuarios dividida entre la energía de entrada al sistema de distribución.

$$\eta_{\text{dist}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i h_i}{w_v h_v} \quad (5.2)$$

Donde:

- i = Es el punto de llegada a cada usuario de vapor
- v = El punto de entrada del cabezal principal de vapor
- w = F flujo, kg/h
- h = Entalpia del vapor, kcal/kg

El método indirecto consiste en medir, de manera análoga, las pérdidas de energía por fugas y mal aislamiento.

5.1.3 EFICIENCIA DEL SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADOS

La eficiencia del sistema de retorno de condensado está en función de la cantidad de condensado que se recupere y se calcula de acuerdo a la energía disponible, dividida entre la energía total del sistema de vapor.

La energía disponible es la suma del calor latente, o entalpia de vaporización, más la entalpia del condensado multiplicado por el porcentaje de condensado que se recupere, por un factor de eficiencia de recolección.

$$\eta_{\text{cond}} = \frac{h_g - h_f(1 - f_c \times f_f)}{h_g} \quad (5.3)$$

Donde:

h_f	=	entalpia del fluido, kcal/kg
h_g	=	entalpia del vapor, kcal/h
f_c	=	condensado recuperado, fracción
f_f	=	eficiencia de recolección, factor

5.1.4 EFICIENCIA DE LOS EQUIPOS CONSUMIDORES

Para medir la eficiencia, el único método utilizado es el de restar al 100% cada una de las pérdidas evaluadas, como pueden ser fugas y pérdidas.

5.1.5 EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA

La eficiencia total de un sistema se define como la relación de energía aprovechada entre la energía proporcionada por el combustible al sistema.

Tanto en las calderas como en las tuberías de distribución, existen pérdidas térmicas que reducen la cantidad de energía útil disponible que disminuyen la eficiencia total del sistema.

La Fig. 5.1 muestra en forma esquemática el balance general de energía para un sistema de vapor.

Ejemplo 1

Supóngase un sistema de vapor saturado que opera a presión absoluta de 10.2 kg/cm². A continuación se muestran algunos valores típicos de pérdidas encontradas en los sistemas de vapor, los que permiten calcular el valor de la eficiencia global del sistema.

Eficiencia de la caldera	
Pérdidas por chimenea:	16%
Pérdidas por radiación/convección:	3%
Pérdidas en la purga:	2%
	total: 21%
Eficiencia de la caldera = 100 - 21	79%

Eficiencia de las tuberías de distribución

Fugas + pérdidas de calor en las tuberías: 8%
 Eficiencia de las tuberías = $100 - 8 = 92\%$

Eficiencia del usuario

La eficiencia del usuario representa el porcentaje de la energía del vapor que está disponible. Suponiendo que el condensado es obtenido a la temperatura de saturación, pero éste no se recupera se tendrá:

De tablas de vapor:

entalpia de vapor saturado a $10.2 \text{ kg/cm}^2 = 663.23 \text{ kcal/kg}$

entalpia de condensado a $10.2 \text{ kg/cm}^2 = 182.04 \text{ kcal/kg}$

entalpia de vaporización = $663.23 - 182.04 = 481.18 \text{ kcal/kg}$

Porcentaje de energía disponible:

$$\frac{481.18 \text{ kcal/kg}}{663.23 \text{ kcal/kg}} \times 100 = 72.5\%$$

Pérdidas de calor de equipos de proceso

Suponiendo que las pérdidas de calor en los equipos de proceso son de aproximadamente 3%, la eficiencia de este grupo será de 97%

Eficiencia total del sistema sin recuperación de condensados

La eficiencia global del sistema es, tomando en cuenta los valores anteriores

$$(0.79 \times 0.92 \times 0.725 \times 0.97) \times 100 = 51\%$$

Lo que significa que casi la mitad de la energía que proporciona el combustible quemado en la caldera se pierde, y que la otra mitad es la que se aprovecha realmente. Esto es típico de la mayoría de las instalaciones.

5.2 ACCIONES PARA MEJORAR LA EFICIENCIA TOTAL DEL SISTEMA DE VAPOR

Haciendo pequeñas acciones encaminadas a mejorar la eficiencia en cada punto del sistema, se puede lograr un aumento significativo en la eficiencia global del sistema. Si por ejemplo, al sistema anteriormente descrito se le aplica un sistema de control de operación, se evitan fugas de vapor, se mejora el aislamiento y se recupera energía de condensados, se tendría como resultado:

Eficiencia de la caldera

Pérdidas por chimenea:	14%
Pérdidas por radiación/convección:	2%
Pérdidas en la purga:	1%
	total. 17%
Eficiencia de la caldera = 100 - 17	83%

Eficiencia de las tuberías de distribución

Fugas + pérdidas de calor en las tuberías:	5%
Eficiencia de las tuberías = 100 - 5	95%

Eficiencia del retorno de condensados

Considerando el porcentaje de la energía del vapor disponible como la mitad de la energía del condensado recuperado para volver a producir vapor, se tendrá:

De tablas de vapor:

$$\text{entalpía de vapor saturado a } 10.2 \text{ kg/cm}^2 = 663.23 \text{ kcal/kg}$$

Suponiendo que la mitad de la energía del condensado es recuperada ($f_c=0.5$), la entalpía del condensado recuperable será:

$$\text{entalpía de condensado a } 10.2 \text{ kg/cm}^2 = 182.04 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{entalpía condensado recuperado} = 182.04 \times 0.5 = 91.02 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Considerando un factor de recuperación de } 0.9, \text{ se tiene}$$

$$\text{energía neta recuperada} = 91.02 \times 0.9 = 81.92 \text{ kcal/kg}$$

La disponibilidad será:

$$\frac{663.23 - 81.92}{663.23} \times 100 = 87\%$$

Pérdidas de calor en los equipos

Si éstas son reducidas de 3 a 2%, la eficiencia será de 98%

Eficiencia total del sistema con recuperación de condensados

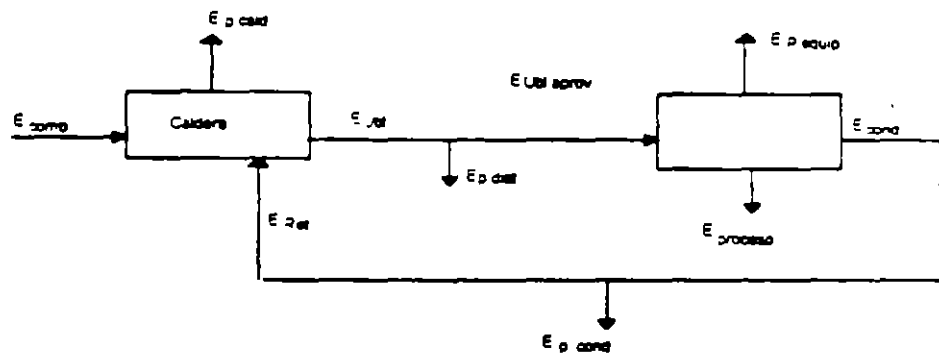
La eficiencia global del sistema es, tomando en cuenta los valores anteriores:

$$(0.83 \times 0.95 \times 0.87 \times 0.98) \times 100 = 67\%$$

El ahorro de combustible que resulta de la combinación de las acciones de ahorros de energía descritas será:

$$\left[1 - \frac{0.51}{0.67} \right] \times 100 = 24\%$$

FIG. 5.1: BALANCE GENERAL DE ENERGIA. SISTEMA DE VAPOR



$$\begin{aligned} E_{comb} + E_{Ret} &= E_{Util} + E_{p.cald} \\ E_{Util} &= E_{Aprov} - E_{p.Dist} \\ E_{Aprov} &= E_{proceso} - E_{p.equip} + E_{cond} \\ E_{cond} &= E_{Ret} - E_{p.cond} \end{aligned}$$

5.3 COSTO DEL VAPOR

Los conceptos anteriores demostraron que las pérdidas del sistema aumentan el costo de generación de una tonelada de vapor. El costo también depende de la temperatura y presión del vapor generado, así como de la temperatura del agua de alimentación. En este caso, el costo unitario de vapor se determina de manera sencilla utilizando la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{(h_g - h_a) \times C_c}{PCI \times \eta} \quad (5.4)$$

Donde:

- C_v = costo unitario del vapor en NS/kg de vapor
- h_g = entalpia del vapor en kcal/kg
- h_a = entalpia del agua de alimentación en kcal/kg
- PCI = poder calorífico inferior del combustible
- η = eficiencia de la caldera en % (basado en el PCI)
- C_c = costo unitario del combustible en NS/kg de combustible

Ejemplo 2

Se genera vapor saturado a 10.2 kg/cm² quemando combustóleo. La temperatura del agua de alimentación es de 85°C y la eficiencia de la caldera es de 75%. El poder calorífico del combustible es de 10,162 kcal/kg y tiene un precio de NS 0.24/kg. ¿Cuál es el costo de una tonelada de vapor?

De tablas de vapor:

- entalpia de vapor saturado a 10.2 kg/cm² = 663.23 kcal/kg
- entalpia del agua de alimentación a 85°C = 85.03 kcal/kg
- base de producción 1 ton = 1000 kg
- poder calorífico: 10,162 kcal/kg
- eficiencia de la caldera: 75%
- costo del combustible: NS 0.24/kg

sustituyendo en la fórmula

$$C_v = \frac{1000 \text{ kg } (663.23 - 85.03) \text{ kcal/kg}}{10,162 \text{ kcal/kg} \times 0.75} \times \text{NS}0.24/\text{kg} = 16.139$$

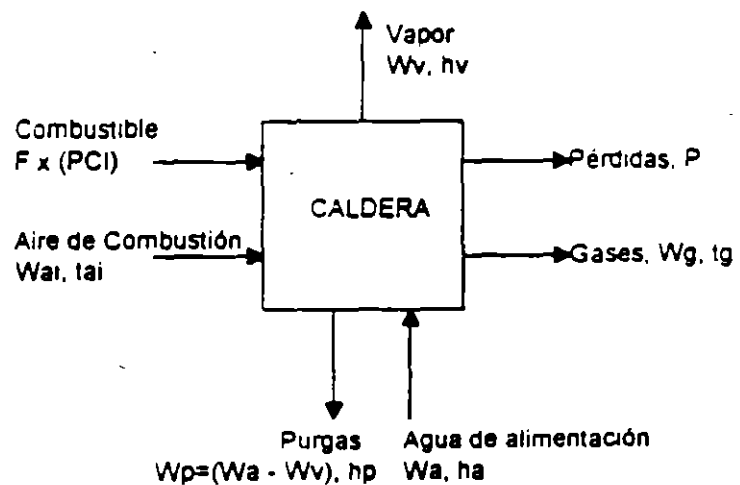
$$C_v = \text{NS } 16.14 / \text{tonelada de vapor}$$

5.4 BALANCE DE MASA Y ENERGIA

Para la obtención del rendimiento, considerando éste como la relación de calor útil entre calor suministrado, a veces es necesario realizar balances de masa y energía que incluyan el calor aportado, las pérdidas y el calor útil recuperado.

En la Fig. 5.2 se pueden observar esquemáticamente los componentes que intervienen en el balance de masa y energía en una caldera. Como se observa, las entradas son el combustible, el aire (a temperatura ambiente o precalentado) y el agua de alimentación. Por lo tanto, se puede establecer el siguiente cuadro

FIG. 5.2: BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN LAS CALDERAS



Siendo:

W_a	Flujo de agua de alimentación (kg/h)
h_a	Entalpia de agua de alimentación (kcal/kg)
W_v	Flujo de vapor útil (kg/h)
h_v	Entalpia de vapor util (kcal/kg)
W_p	Flujo de purgas (kg/h)
h_p	Entalpia de agua de purgas (kcal/kg)
F	Flujo de combustible (kg/h)
PCI	Poder calorifica inferior del combustible (kcal/kg)
W_{ai}	Flujo de aire de combustión (kg/h)
t_{ai}	Temperatura de aire de combustión (°C)
$C_{p_{ai}}$	Calor específico del aire (kcal/kg °C)
W_g	Flujo de gases de combustión (kg/h)
t_g	Temperatura de gases de combustión (°C)
C_{p_g}	Calor específico de los gases (kcal/kg °C)
P	Perdidas (kcal/h)

Como se observa, las entradas son el combustible, el aire (a temperatura ambiente o caliente) y el agua de alimentación. Por lo tanto, se puede preparar el siguiente cuadro

Entradas	Flujo másico	Energía entrante
Combustible	F	$F \times \text{PCI}$
Aire	W_{ai}	$W_{ai} \times C_{p_{ai}} \times t_{ai}$
Agua	W_a	$W_a \times h_a$

Las salidas serian el flujo de vapor, saturado o sobrecalentado, al proceso, los gases de escape, purgas y perdidas. El cuadro estaria compuesto por

Entradas	Flujo másico	Energía saliente
Vapor	W_v	$W_v \times h_v$
Gases	W_g	$W_g \times C_{p_g} \times t_g$
Purgas	W_p	$(W_a - W_v) \times h_p$
Pérdidas	---	P

Las pérdidas para combustibles líquidos o gaseosos son las siguientes:

- pérdidas por humedad en el combustible
- pérdidas por humedad en el aire
- pérdidas por combustible no quemado
- pérdidas por radiación y convección en las superficies
- pérdidas por atomización (si aplica)

De los cuadros anteriores se deduce que:

$$F \times PCI + W_{ai} \times Cp_{ai} + W_a \times h_a = W_v \times h_v + W_g \times Cp_g \times t_g - (W_a - W_v) \times h_p - P \quad (5.5)$$

de donde resulta:

$$F \times PCI = W_v (h_v - h_p) + W_a (h_p - h_a) + W_g \times Cp_g \times t_g - W_g \times Cp_{ai} \times t_{ai} - P \quad (5.6)$$

Si las purgas son muy pequeñas, entonces $W_a = W_v$ y como los gases están formados prácticamente por el flujo de aire, entonces también $W_{ai} = W_g$

$$F \times PCI = W_v (h_v - h_a) + W_v (h_p - h_a) = W_g \times Cp_g \times t_g - W_g \times Cp_{ai} \times t_{ai} + P \quad (5.7)$$

La diferencia entre el calor específico de los gases de combustión y la del aire, no llega a ser más del 10%, por lo que una aproximación aceptable en la mayoría de los casos es que.

$$Cp_{ai} = Cp_g$$

entonces:

$$F \times PCI = W_v (h_v - h_a) + W_g \times Cp_g \times (t_g - t_a) + P \quad (5.8)$$

Para cálculos más precisos, se puede determinar el C_p de los gases utilizando la siguiente relación:

$$Cp_g = \sum Cp_i \times Y_i \quad (5.9)$$

Donde:

Cp_i = calor específico del *i*ésimo componente

Y_i = fracción volumétrica del *i*ésimo componente

5.5 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

El consumo puntual de combustible viene dado por:

$$F = \frac{W_V \times (h_V - h_a)}{PCI \times \eta} \quad (5.10)$$

Donde:

- W_V = Flujo de vapor, kg/h
- h_V = entalpia de vapor, kcal/kg
- h_a = entalpia del agua de alimentación, kcal/kg
- PCI = poder calorífico inferior del combustible, kcal/kg
- η = rendimiento de la caldera, en fracción

5.6 PRODUCCION DE VAPOR POR UNIDAD DE COMBUSTIBLE

La producción de vapor por unidad de combustible depende de numerosas variables, tales como el tipo de combustible, la entalpia final del vapor, temperatura del agua de alimentación y los rendimientos de los generadores de vapor. Por lo consiguiente, se presenta a continuación una ecuación general:

$$a = \eta \times \frac{PCI}{h_V - h_a} \quad (5.11)$$

DIPLOMADO

ESPECIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE CALDERAS

Alberto Plauchú Lima
Ingeniero consultor

Introducción

Se identifican una infinidad de problemas en los generadores de vapor y equipo accesorio y auxiliar relacionado, tanto en su comportamiento, como en el diseño, habilidad para cumplir el servicio para el que fueron adquiridos, uso eficiente de la energía y los efectos de impacto al ambiente que genera su operación, o mejor dicho su deficiente operación.

Una parte importante de esta problemática tiene origen en la forma en que estos equipos fueron especificados para su adquisición. Lo anterior no es exclusivo de los generadores de vapor, desafortunadamente, y el conocimiento y experiencia requeridos para especificar con suficientes fundamentos, claridad y precisión es una necesidad aplicable prácticamente a todo tipo de adquisición, ya sea de equipo u otros suministros o bien de servicios, y se hace manifiesta en las situaciones de conflicto que al terminar una obra o al poner en servicio y probar un equipo se enfrentan sin solución satisfactoria por las razones expuestas antes.

Algunos problemas con las calderas en servicio.

La falta de capacidad para satisfacer la demanda requerida, el sobredimensionamiento de los generadores de vapor, la falta de capacidad en los equipos auxiliares, el deterioro prematuro en condiciones de servicio críticas, las emisiones excesivas que dañan el ambiente, las condiciones de trabajo, la habilidad para mantener dentro de límites convenientes los parámetros de operación, las pérdidas excesivas de energía por problemas de construcción o de diseño, etc. son algunos de los problemas que se tienen en calderas que no fueron especificadas adecuadamente o en las que no se dió la importancia o prioridad necesarias a los diferentes aspectos que participan en una adecuada toma de decisiones. Figura 1.

Algunas causas de especificación deficiente

Los propietarios de instalaciones de generación de vapor recurren para la adquisición de los equipos de generación y los elementos que integran el sistema de distribución, a sus propios recursos técnicos, a la asistencia técnica especializada externa, empresas o consultores de ingeniería, o bien a los fabricantes del equipo de acuerdo con las características, capacidades políticas o posibilidades de la empresa.

La participación de una sola de estas opciones en la especificación y decisión de adquisición de estos equipos no es suficiente y puede llevar a situaciones extremas de adquirir lo que está disponible en el mercado, lo que un vendedor hábil

ofrece, o bien en casos fortuitos lo que realmente se requiere, sin embargo esto último se consigue únicamente cuando hay la participación adecuada de toda las entidades con interés en el proyecto, desde luego con la oportunidad y coordinación necesarias. Figura 2.

¿Quién debe intervenir?

Los generadores de vapor son por lo general equipos de alto costo inicial, de alta intensidad energética, de alto potencial de ahorro energético, de alta posibilidad de contaminación de alto riesgo si no son bien operados y conservados, de largo tiempo de entrega y en general indispensables en la operación de las instalaciones de producción o de servicio para las que se adquieren.

Es muy importante tomar en cuenta que la participación del usuario final, del ingeniero o proyectista, de los responsables de procuración, del fabricante, de los departamentos de costos y finanzas, del departamento de proceso, de la gente de análisis de resultados, de las entidades a cargo de la seguridad y capacitación, entre otros son fundamentales a fin de que la decisión que se tome en una adquisición importante haya considerado los diferentes puntos de vista de condiciones de servicio, capacidades, prácticas operativas, capacitación de personal, factibilidad económica, disponibilidad comercial, etc. y que el resultado sea de conveniencia integral para la empresa.

Características básicas de una especificación.

Existen una serie de vicios y deficiencias en la elaboración de la documentación que para especificar una caldera se prepara, entre otros están la abundancia de referencias de códigos, estándares, especificaciones y reglamentaciones a cumplir que en la mayoría de los casos son desconocidas por quienes las enumeran y que también en muchos de ellos se incurre en contradicciones entre unos y otros documentos normativos y en dificultad para comprobar su cumplimiento. Figura 3.

Otros problemas que se enfrentan tienen su origen en tomar amplios márgenes en los parámetros de operación con respecto a los requerimientos de los servicios que deben satisfacerse, y en la capacidad de evaporación.

En ocasiones no se elabora especificación y los documentos de origen para adquisición fueron las proposiciones de fabricantes.

Existen también muchas situaciones en las que el documento de especificación es transcripción de otras especificaciones preparadas para otras necesidades, para otros propósitos, para otra magnitud y complejidad de equipos y en algunos casos para necesidades de otras localidades e inclusive de otros países.

La lista de estos casos, que finalmente se manifiestan como deficiencias de un documento de especificación que debe reflejar fielmente las necesidades precisas del servicio que cumplirá la caldera, puede ser interminable. Aquí sólo deseamos orientar la

atención hacia algunas de las características que debe cumplir la elaboración de una especificación de compra y reducir la problemática actual.

En primer lugar una especificación debe ser clara, debe ser de preferencia autosuficiente, debe ser realista en sus exigencias. Figura 4.

Si es demasiado abierta dará problemas en la evaluación, abrirá las puertas a fabricantes o proveedores sin experiencia o desleales, y se recibirán proposiciones con interpretaciones propias y diferentes de cada ofertante.

Si por otra parte es demasiado estricta o demasiado cerrada limitará la participación fabricantes y la aplicación de su habilidad o experiencia para ofrecer lo que mejor convenga comercialmente con la aplicación de sus tecnologías o atributos particulares cumpliendo de cualquier manera con los requerimientos de la especificación. Una especificación demasiado cerrada o más todavía con demasiadas particularidades puede llevar a la condición de que se trate de diseñar por parte del comprador y se diluya la responsabilidad por este concepto de parte del fabricante. Figura 5.

Una especificación debe incluir los criterios sobre los que se evaluará tanto para créditos como en penalizaciones, deberá dar la misma oportunidad de participación a cuantos se inviten, en el caso de un concurso o licitación, o bien si hay la justificación suficiente deberá ser con todo el detalle y precisión orientados a un fabricante. Esto último requiere desde luego una muy amplia experiencia y una actitud honesta de parte del comprador o bien del consultor que haga esta recomendación.

Algunas soluciones para mejorar una especificación.

En la experiencia del expositor el volumen de una especificación no es reflejo de la calidad del documento, la mención, muy frecuente, "de acuerdo con tal norma, última revisión" tampoco es una buena recomendación amén que quien lo establece esté completamente actualizado con normalizaciones y reglamentaciones vigentes y que haya comprobado que efectivamente las revisiones recientes afectan el servicio requerido de la caldera. De otra manera solamente encarecerán las proposiciones. Figura 6.

El análisis a que se sujetará las proposiciones que se reciban deberá considerar los aspectos ambiental, energético, de seguridad, de operación, de cumplimiento a códigos, de fabricación, de inspección en fábrica, de inspección en sitio, y de pruebas de comportamiento y aceptación, y todo esto debe quedar claramente establecido en el documento de especificación así como otros conceptos que hagan posible la verificación del cumplimiento de estas exigencias.

Lo anterior requiere de la consideración de las capacidades disponibles del personal de operación, de mantenimiento, de evaluación, de elementos de medición y del personal encargado de comprobar mediante pruebas, con todo el protocolo requerido, el

comportamiento esperado de la unidad y la satisfacción de todos los valores que se consideren garantizados.

Es muy importante la estimación oportuna de las capacidades propias del comprador o usuario y oportunamente determinar la necesidades de asistencia externa cuando éste sea el caso. Figura 7.

Esta es una exposición muy breve, probablemente incompeteta, puesto que el tema y los elementos de discusión y análisis son muy amplios y se tratará con el material de apoyo, de ampliar su cobertura y aclarar los conceptos mencionados en el desarrollo del tema.

Morelia, Michoacán
Mayo de 1995

Especificación y evaluación de Calderas

Algunos problemas

- ▶ **Limitaciones técnicas y económicas**
- ▶ **Equipo caro y complicado**
- ▶ **Falta de capacidad**
- ▶ **Equipo fuera de servicio**
- ▶ **Responsabilidades indebidas a operación - mantenimiento - fabricación**
- ▶ **Refacciones y componentes importados**
- ▶ **Falta de adecuación de equipo**
- ▶ **Discrepancia de condiciones y necesidades de servicio**

Algunas soluciones

- **Conocimiento de condiciones de servicio específicas**
- **Particularidades del propietario tomadas en cuenta**
- **Adecuación a personal y preparación disponibles**
- **Comprobación de diseños por especialistas**
- **Consultoría especializada en el proceso especificación - aceptación**
- **Establecimiento y ejecución de pruebas de comportamiento y aceptación con la formalidad requerida**

Especificación y Evaluación de Calderas

Algunos atributos deseables

- ▶ Seguridad de operación
- ▶ Confiabilidad
- ▶ Redundancia en reserva
- ▶ Redundancia de operación en paralelo
- ▶ Facilidad de mantenimiento

Especificación y Evaluación de Calderas

Características fundamentales de especificación

- **Claridad**
- **Precisión**
- **Factibilidad económica**
- **Factibilidad técnica**
- **Congruencia con recursos y facilidades disponibles**

F I L O S O F I A D E D I S E Ñ O

. CARGA

- RANGO DE GENERACION
- PLANTA BASE
- VARIACIONES MINIMAS

. FRECUENCIA DE OPERACIONES DE ARRANQUE Y PARO

- OPERACION LOCAL
- OPERACIONES A CONTROL REMOTO

. CRITERIO DE AUTOMATIZACION

- CONTROL LOCAL
- CONTROL REMOTO
- SUPERVISION REMOTA

. OPERACION CALDERA CENTRAL

- CALDERA EN SEGUIMIENTO
- CENTRAL EN SEGUIMIENTO

. CRITERIOS DE SUMINISTRO DE VAPOR

- RESPALDO
- REPOSICION

Evaluación y Especificación de Calderas

Propósito de Códigos y Normas.

- ▶ Seguridad
- ▶ Calidad
- ▶ Comportamiento
- ▶ Medición
- ▶ Pruebas
- ▶ Cuidado del Ambiente
- ▶ Conservación de Energía
- ▶ Comercial

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UNA CALDERA

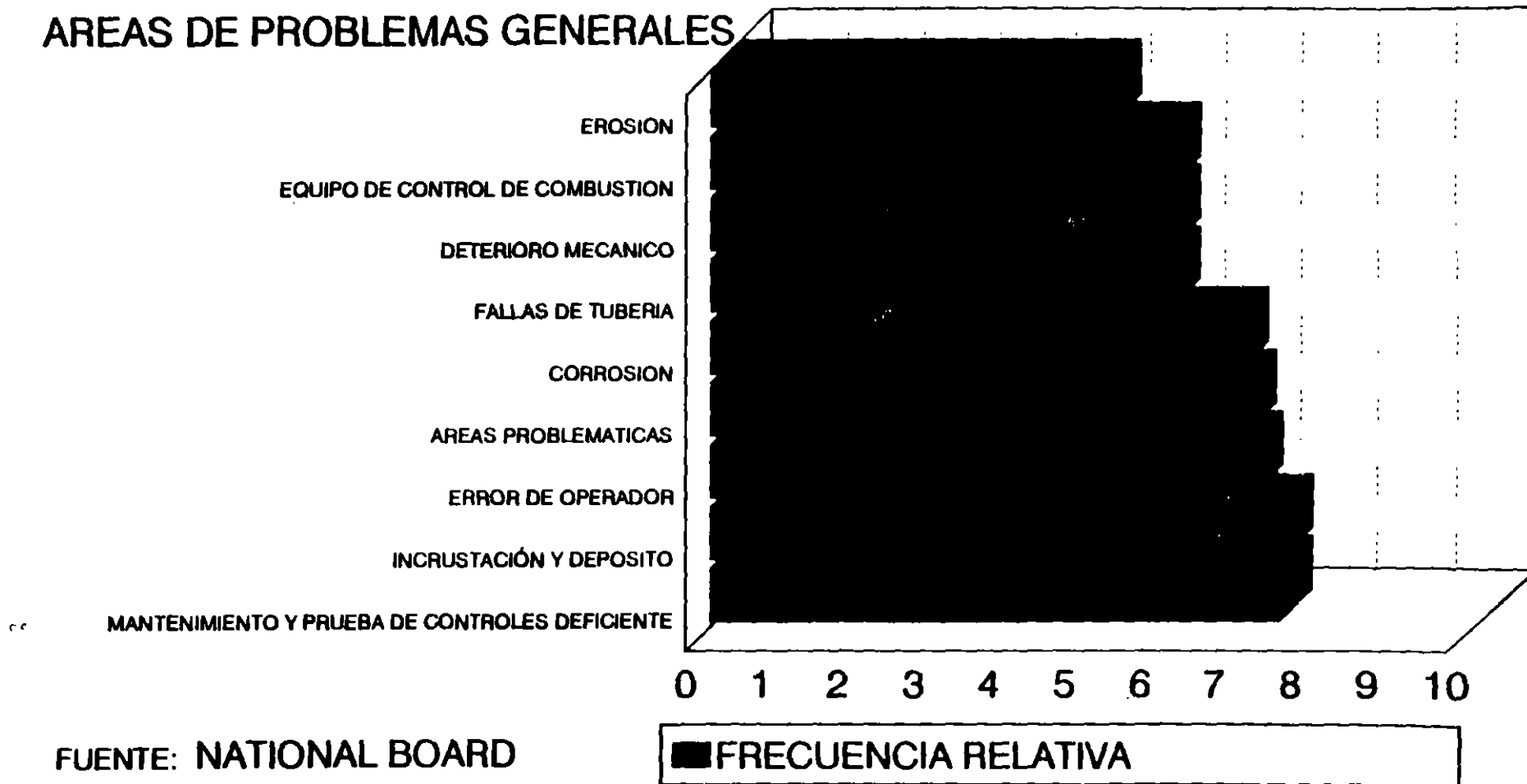
1. La caldera seleccionada debe tener una construcción robusta y compensadora de las dilataciones térmicas.
2. Suficiente capacidad tanto del agua como de vapor, de forma que pueda absorber fluctuaciones en la demanda de vapor.
3. La relación entre la superficie de calefacción y la capacidad de vaporización adecuada, para evitar la formación de espuma.
4. Juntas de dilatación protegidas de la acción del fuego.
5. Cámara de combustión con dimensiones adecuadas para que la combustión se realice totalmente, antes de que los gases pasen a los recuperadores.
6. Debe contar con un tambor para extraer las impurezas del agua (fangos), para evitar que estos fangos queden sujetos a la acción del fuego.
7. Disposición de la superficie de transferencia con respecto al flujo de gases tal que se obtengan buenos coeficientes de convección.
8. Facilidad para limpiar las superficies de intercambio, para aumentar la seguridad y la economía.
9. Debe mostrar flexibilidad en su funcionamiento.
10. Debe estar provista de los equipos auxiliares necesarios para garantizar la medición, el control y la seguridad.

FUENTE :

CONAE

OPERACION Y MANTENIMIENTO DE CALDERAS

AREAS DE PROBLEMAS GENERALES



(1,2) MUY RARA VEZ; (3,4) RARA VEZ; (5,6) OCASIONALMENTE; (7,8) FRECUENTEMENTE; (9,10) CON MUCHA FRECUENCIA

CODIGO ASME PARA CALDERAS Y RECIPIENTES A PRESION 1989

SECCIONES

- I Calderas de Potencia
- II Especificaciones de Materiales
 - Parte A - Materiales Ferrosos
 - Parte B - Materiales No Ferrosos
 - Parte C - Varillas para Soldar, Electrodo y Metales de Aportación
- III Subsección NCA - Requisitos Generales para División 1 y División 2
- III División 1
 - Subsección NB - Componentes Clase 1
 - Subsección NC - Componentes Clase 2
 - Subsección ND - Componentes Clase 3
 - Subsección NE - Componentes Clase MC
 - Subsección NF - Soportes para Componentes
 - Subsección NG - Estructuras de Soporte del Núcleo
 - Apéndices
- III División 2 - Código para Reactores y Contenedores de Concreto
- IV Calderas para Calefacción
- V Pruebas No Destructivas
- VI Reglas Recomendadas para el Cuidado y Operación de Calderas para Calefacción
- VII Guías Recomendadas para el Cuidado de Calderas de Potencia
- VIII Recipientes a Presión
 - División 1
 - División 2 - Reglas Alternativas
- IX Calificaciones de Soldadura
- X Recipientes a Presión de Plásticos Reforzados con Fibra de Vidrio
- XI Reglas para Inspección en Servicio de Componentes para Plantas Nucleares

ADENDA

La "Adenda" en hojas de color, que incluyen las adiciones y revisiones a las secciones individuales del Código, se publican anualmente y se enviarán automáticamente a los compradores de las Secciones aplicables hasta la publicación del Código 1992. El Código 1989 está disponible sólo en formato de hojas sueltas; en consecuencia serán emitidas las Adendas en el formato de hojas sueltas, para reemplazo de página.

INTERPRETACIONES

AMIME emite réplicas por escrito a las solicitudes que están interpretación de aspectos técnicos del Código. Las interpretaciones de cada Sección individual se publicarán separadamente y se incluyen como parte del servicio de r

al día esa Sección. Se emitirán dos veces al año (julio y diciembre) hasta la publicación del Código 1992. Las interpretaciones de Sección III, Divisiones 1 y 2, con el servicio de poner al día para la Subsección NCA. Las Interpretaciones no son parte del Código o de la Adenda.

CASOS DEL CODIGO

El Comité de Calderas y Recipientes a Presión se reúne en forma regular para considerar adiciones propuestas y revisiones al Código y para formular Casos para aclarar el intento de requisitos existentes o proveer, cuando la necesidad es urgente, reglas para materiales o construcciones no cubiertas por las reglas existentes del Código. Los Casos que se han aceptado aparecerán en el libro apropiado de Casos del Código 1989: (1) Calderas y Recipientes a Presión y (2) Componentes Nucleares. Se enviarán suplementos automáticamente a los compradores de los libros "Casos de Código" hasta la publicación del Código 1992.

INTRODUCCION

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers) estableció un comité en 1911 con el propósito de formular reglas tipo para la construcción de calderas de vapor y otros recipientes a presión. Este se conoce actualmente como Comité de Calderas y Recipientes a Presión.

La función del Comité es establecer reglas de seguridad que normen el diseño, la fabricación, y la inspección durante la construcción de calderas y recipientes a presión, e interpretar estas reglas cuando surjan dudas relativas a su significado. Al formular estas reglas, el Comité considera las necesidades de usuarios, fabricantes e inspectores de recipientes a presión. El objeto de las reglas es proporcionar una protección razonable de vidas y propiedades así como proveer un margen de deterioro en servicio, con objeto de dar un período de utilización razonablemente largo y seguro. Se han reconocido el progreso en el diseño y materiales, y la evidencia de la experiencia.

El Comité de Calderas y Recipientes a Presión (Boiler and Pressure Vessel Committee) se ocupa del cuidado e inspección de calderas y recipientes a presión en servicio únicamente hasta el punto de proveer reglas sugeridas de buenas prácticas como una ayuda a los usuarios y a sus inspectores.

Las reglas establecidas por el Comité no deben interpretarse como aprobación, recomendación, o garantía para algún diseño específico o patentado, o como limitación en alguna forma a la libertad del fabricante para elegir cualquier método de diseño o forma de construcción que satisfaga a las reglas del Código.

El Comité de Calderas y Recipientes a Presión se reúne regularmente para considerar revisiones de las reglas, nuevas reglas que dicta el desarrollo tecnológico, Casos del Código y solicitudes para interpretaciones. Las solicitudes para interpretación pueden dirigirse al Secretario por escrito y deben dar referencias completas para recibir consideración y una interpretación por escrito (véase el Apéndice Obligatorio que cubre la preparación de solicitudes técnicas). Las revisiones propuestas se presentarán al Comité Principal para la acción apropiada. La acción del Comité Principal llega a ser efectiva sólo después de confirmación

por balota de cartas del Comité y la aprobación por la ASME.

Las revisiones propuestas al Código aprobadas por el Comité se dejan a la decisión del Instituto Nacional de Normas [American National Standards Institute] y se publican en "Mechanical Engineering" para invitar a los comentarios de todas las personas interesadas. Después del tiempo asignado para la revista pública y aprobación final por ASME, se publican anualmente los Suplementos [Addenda] al Código.

Los Casos del Código pueden usarse en la construcción de componentes que van a ser estampados con el símbolo del Código ASME, a partir de la fecha de su aprobación por ASME.

Después de que las revisiones al Código son aprobadas por ASME, estas pueden usarse a partir de la fecha de su publicación que aparece en el Suplemento. Las revisiones de hacen obligatorias, como un requisito mínimo, seis meses después de la fecha de su publicación, excepto para el caso de calderas o recipientes a presión contratados en fechas anteriores al cumplimiento del período de seis meses.

Se previene a fabricantes y usuarios de componentes contra el uso de revisiones y Casos que son menos restrictivos que requerimientos anteriores sin tener la seguridad de que hayan sido aceptados por las autoridades apropiadas en la jurisdicción en la cual el recipiente va a ser instalado.

Se invita a cada Estado o Municipalidad en los Estados Unidos y cada provincia en el Dominio de Canadá que adopta o acepta una o más Secciones del Código de Calderas y Recipientes a Presión, a nombrar un representante para que actúe en el Comité de Conferencias para el Comité de Calderas y Recipientes a Presión. Toda vez que los miembros están en contacto activo con la administración y hacer cumplir las reglas, los requisitos para inspección en este Código corresponden con aquellos en vigor en sus respectivas jurisdicciones. Las calificaciones requeridas para un Inspector Autorizado bajo estas reglas pueden obtenerse de la autoridad administrativa de cada Estado, municipalidad o provincia que haya adoptado estas reglas.

El Comité de Calderas y Recipientes a Presión formula la formulación de sus reglas y en el establecimiento de las

presiones máximas de diseño y de operación, considera materiales, construcción, métodos de fabricación, inspección y dispositivos de seguridad. Se puede conceder permiso a cuerpos y organizaciones reguladores que publiquen normas de seguridad, para usar como referencia una Sección completa del Código. Si el uso de una Sección, tal como la Sección IX, incluye excepciones, omisiones o cambios de estipulaciones, la intención del Código podría no cumplirse.

Cuando un Estado u otro cuerpo de regulación efectúa adiciones u omisiones en la impresión de cualquier Sección del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, se recomienda que tales cambios se indiquen claramente.

El Consejo Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión (National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors) está constituido por inspectores en jefe, de Estados y municipalidades en los Estados Unidos y de provincias en el Dominio de Canadá que han adoptado el Código para Calderas y Recipientes a Presión. Esta institución, desde su organización en 1919, ha funcionado para administrar y hacer cumplir uniformemente las reglas del Código para Calderas y Recipientes a Presión. La cooperación de esta organización con el Comité de Calderas y Recipientes a Presión, ha sido extremadamente útil.

Deberá señalarse que el Estado o municipalidad en donde se ha hecho efectivo el Código para Calderas y Recipientes a Presión tiene jurisdicción definida sobre cualquier instalación particular. Las consultas que tratan problemas de carácter local deberán dirigirse a la propia autoridad de tal Estado o municipalidad. Si hay alguna duda o pregunta en cuanto a la interpretación apropiada, los Estados, provincias, municipalidades u otros cuerpos de reglamentación pueden referir la pregunta al Comité de Calderas y Recipientes a Presión.

Las especificaciones para materiales base dadas en la Sección II, Partes A y B, son idénticas a, o similares a las de La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales [The American Society for Testing and Materials]. Cuando en una Especificación de Materiales de ASME se hace referencia a una Especificación ASTM para la cual existe una Especificación ASME acompañante, la referencia deberá interpretarse como aplicable a la Especificación de Materiales ASME. Las Especificaciones para materiales de soldar

dados en la Sección II, Parte C, son idénticas a, o similares a las de la Sociedad Americana de Soldadura [American Welding Society]. No todos los materiales incluidos en las Especificaciones de Materiales ASME de la Sección II se han adoptado para uso del Código. El uso se limita a los materiales y grados adoptados por al menos una de las otras Secciones del Código para aplicación bajo las reglas de esa Sección. Todos los materiales que se permiten por estas diversas Secciones y usados para construcción dentro del alcance de sus reglas deberán ser suministrados de acuerdo a la Especificación de Materiales ASME contenidas en la Sección II, excepto en donde se estipule de otro modo en los Casos del Código o en la Sección del Código que sea aplicable. Los materiales cubiertos por estas Especificaciones son aceptables para uso en partidas cubiertas por Secciones del Código solamente hasta el grado indicado en la Sección aplicable. Los materiales para uso de Código deberán ser, de preferencia, pedidos, producidos y documentados sobre esta base; sin embargo, el material producido bajo una Especificación ASTM se puede usar en lugar de la correspondiente Especificación ASME, con la condición de que los requisitos de la Especificación ASTM sean idénticos (excluyendo las diferencias editoriales) o más estrictos que la Especificación ASME para el Grado, Clase y Tipo producido y siempre y cuando se confirme que el material cumple con la Especificación ASTM. El material producido para una Especificación ASTM con requisitos diferentes a los requisitos de la Especificación ASME correspondiente se pueden usar, de acuerdo con lo anterior, con la condición de que el fabricante del material o el fabricante del recipiente certifique, con evidencia aceptable, al Inspector Autorizado, que se han satisfecho los requisitos de la Especificación ASME correspondiente. El material producido para una Especificación de Materiales ASME o ASTM no está limitado como para el país de origen.

Cuando se requiera por el contexto en esta Sección, el singular deberá interpretarse como el plural y viceversa, y el género masculino, femenino, o neutro se tratará como tal otro género como sea apropiado.

La publicación de la Edición SI (Métrica) del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión se descontinúo con la Edición 1986. Efectivo en el 1o. de Octubre de 1986, la Edición SI se retiró como documento del Código ASME de Calderas y Recipientes a Presión.

PREAMBULO

Este código cubre las reglas para la construcción de calderas de potencia,¹ calderas eléctricas,² calderas miniatura,³ y calderas para agua de alta temperatura,⁴ para usarse en servicio estacionario e incluye aquellas calderas de potencia usadas en servicio locomóvil, portátil y de tracción. La referencia a un párrafo incluye todos los subpárrafos y subdivisiones dentro de ese Párrafo.

El Código no contiene reglas que abarquen la totalidad de detalles de diseño y construcción. Donde no se especifiquen detalles completos se entiende que el fabricante, sujeto a la aceptación del Inspector Autorizado, deberá suministrar detalles de diseño y construcción, los cuales deberán estar, en lo que a seguridad se refiere, a la altura de lo previsto por las reglas del Código.

El alcance de la jurisdicción de la Sección I se aplica a la caldera propiamente dicha y a la tubería externa de la caldera.

Los sobrecalentadores, economizadores y otras partes a presión conectadas directamente a la caldera sin la intervención de válvulas, deberán considerarse como partes de la caldera propiamente dicha, y su construcción deberá sujetarse a las reglas de la Sección I.

La tubería externa de la caldera deberá considerarse como aquella tubería que empieza donde la caldera propiamente dicha termina, esto es en:

¹ *Caldera de potencia*. una caldera en la cual se genera vapor de agua u otro vapor a una presión de más de 15 lb/pulg². (100 kPa) para uso externo de la misma.

² *Caldera eléctrica*. una caldera de potencia o una caldera para agua de alta temperatura en la cual la fuente de calor es la electricidad.

³ *Caldera miniatura*. una caldera de potencia o una caldera para agua de alta temperatura en la cual no se exceden los límites especificados en PMD 2.

⁴ *Caldera para agua de alta temperatura*. una caldera para agua destinada para operar a presiones que exceden de 160 lb/pulg² (1100 kPa) y/o temperaturas en exceso de 250°F (121°C).

a) La primera junta circunferencial para conexiones soldables; o

b) La carta de la primera brida en conexiones bridadas atomilladas; o

c) La primera junta roscada en ese tipo de conexión; y la cual se extiende hasta e incluyendo la válvula o válvulas requeridas por este Código.

La certificación de Código ASME (incluyendo Formas para Datos y Estampado de Símbolos del Código) y/o inspección por el Inspector Autorizado, cuando se requiera por este Código, es requerida para la caldera propiamente dicha y tubería externa de la misma.

Las reglas de construcción para materiales, diseño, fabricación, instalación y prueba de tubería externa de la caldera están contenidas en ANSI B31.1, Tubería a Presión. La tubería después de la válvula o válvulas requeridas por esta Sección I, no está dentro del alcance de esta Sección I, y no es la intención que el Símbolo del Sello del Código se aplique a esta tubería o a cualquier otra.

El material para calderas de circulación forzada, calderas sin línea fija entre vapor y agua, y calderas para agua de alta temperatura, deberá cumplir con los requisitos del Código. También deberán cumplirse todos los demás requisitos, excepto en los casos que se relacionan con características especiales de construcción necesarias en calderas de estos tipos, y con los accesorios que manifiestamente no son necesarios o usados en conexión con tales calderas, como indicadores de nivel de agua, columnas de agua, y grifos.

Los recalentadores que reciben vapor que ha pasado a través de una parte de una turbina o de otra fuente motriz y sobrecalentadores de vapor de fuego separado que no sean parte integral de la caldera, son considerados recipientes a presión expuestos a fuego, y su construcción deberá cumplir con los requisitos del Código para sobrecalentadores, incluyendo dispositivos de seguridad. La tubería entre las

conexiones del recalentador y la turbina u otra fuente motriz, no está dentro del alcance del Código.

Un recipiente a presión en el cual se genera vapor mediante la aplicación del calor que resulta de la combustión de un combustible (sólido, líquido o gaseoso) deberá ser clasificado como caldera de vapor expuesta a fuego.

Los recipientes a presión no expuestos a fuego, en los cuales se genera vapor de agua deberán ser clasificados como calderas de vapor no expuestas a fuego, con las siguientes excepciones:

(a) Los recipientes conocidos como evaporadores o cambiadores de calor.

(b) Los recipientes en los cuales el vapor es generado mediante el uso del calor resultante de la operación de un sistema de proceso que contenga varios recipientes a presión,

tales como los empleados en la industria química y petrolera.

Las calderas de vapor no expuestas a fuego deberán ser construidas bajo las especificaciones de la Sección I o la Sección VIII.

Los tanques de expansión que se requieren en relación con calderas para agua de alta temperatura deberán construirse de acuerdo a los requisitos de la Sección I o Sección VIII.

Un recipiente a presión en el cual un fluido orgánico se vaporiza mediante la aplicación del calor resultante de la combustión de combustible (sólido, líquido o gaseoso) deberá construirse bajo las especificaciones de la Sección I. Los recipientes en los cuales el vapor es generado como consecuencia de la operación de un sistema de proceso que contenga varios recipientes a presión, tales como los empleados en la industria química y petrolera, quedan fuera de las reglas de la Sección I.

CALDERAS DE POTENCIA

CONTENIDO

Un contenido Detallado Precede a Cada Parte, al Apéndice y a las Formas.

Introducción	vii	
Declaraciones de Política	ix	
Personal	xi	
Personal Comité Calderas AMIME	xxi	
Preámbulo	xxiii	
Parte PG	Requisitos Genemles para todos los Métodos de Construcción	1
Parte PW	Requisitos para Calderas Fabricadas mediante Soldadura	77
Parte PR	Requisitos para Calderas Fabricadas mediante Remachado	113
Parte PWT	Requisitos para Calderas Acuotubulares	115
Parte PFT	Requisitos para Calderas de Tubos de Humo	121
Parte PFII	Requisitos Opcionales para el Calentador de Agua de Alimentación (Cuando se localice Dentro del Alcance de las Reglas de la Sección I)	147
Parte PMB	Requisitos para Calderas Miniatura	149
Parte PEB	Requisitos para Calderas Eléctricas	155
Parte PVO	Requisitos para Generadores Vaporizantes de Fluidos Orgánicos	161
Apéndice I	Obligatorio - Preparación de Solicitudes Técnicas para el Comité de Calderas y Recipientes a Presión	167
Apéndice	Explicación del Código con Aspectos No Obligatorios a Menos que las Reglas del Código se Refieran Específicamente a ellos	169
Formas y Guías para Reportes de Datos	263	
Unidades SI	301	
Índice	305	

CÓDIGO ASME - SECCIÓN I

CALDERAS DE POTENCIA

INTRODUCCIÓN

En el año de 1914, tuvo su origen la Sección del Código ASME para calderas y recipientes a presión al elaborarse y editarse la primera impresión del Código de Calderas de Potencia por la ASME. A partir de entonces la tecnología de calderas ha tenido avances trascendentales y los generadores de vapor tienen hoy sólo pequeñas semejanzas con aquellos de principios de 1900. Sin embargo, muchos de los conceptos fundamentales y básicos que se usaron en el código original son totalmente válidos en la actualidad. En este curso corto, consideramos brevemente algunos de los hechos históricos del desarrollo del primer código, más adelante revisaremos la Sección I actual para Calderas de Potencia con el fin de conocerla más a fondo y poderla utilizar adecuadamente, para contar así con calderas seguras y confiables.

HECHOS HISTÓRICOS

Las explosiones en calderas se presentaban con bastante frecuencia hacia fines de 1880 y principios de 1900 y en los Estados Unidos, durante el período de 1889 a 1903 murieron cerca de 1200 personas como consecuencia de 1600 explosiones de calderas. En 1905 sucedió una explosión catastrófica en una fábrica de zapatos de Wrocton, Mass, y 58 personas perecieron, resultaron heridas y el monto de los daños en propiedades fue de un cuarto de millón de dólares (de entonces).

Esta desgracia junto con otro accidente de mayor cuantía dieron por resultado que en 1907, la Commonwealth de Massachusetts promulgara el primer código legal de reglas para la construcción de calderas.

En un principio, este primer código tuvo solamente tres páginas, pero a intervalos frecuentes se efectuaron revisiones y adiciones, de manera que para fines de 1908 ya se habían impreso seis ediciones.

Otros estados y un número de ciudades donde ocurrieron explosiones de calderas, reconocieron que éstas se podían prevenir por medio de un diseño, construcción, instalación e inspección y seguros apropiados. Como resultado, estos estados y ciudades formularon reglamentos de seguridad para calderas.

En ciertos casos, algunas reglas se contraponían a las de otros estados o ciudades. Durante el año de 1911, New York y Ohio promulgaron leyes similares a las de Massachusetts, siguiendo New Jersey en 1913, Indiana en 1915, Delaware en 1916, Pennsylvania, California, Michigan y Arkansas en 1917, Oklahoma en 1919 y Oregon en 1920.

La carencia de uniformidad en las leyes, trajo como consecuencia una situación caótica, ya que algunos materiales y métodos de construcción que se consideraban seguros en una jurisdicción no

se permitían en otra. Esta situación representó un obstáculo tanto para el usuario que quería llevar una caldera de una planta a otra en diferentes áreas, como para el fabricante que quería producir calderas de reserva para después venderlas en diferentes localidades. La inspección para el uso de una caldera fuera del estado o ciudad de fabricación presentó serias dificultades.

Debido a estos problemas, la "Asociación Americana de Fabricantes de Calderas", (American Boiler Manufacture's Association) intentó, sin éxito, elaborar reglas que pudieran usar los fabricantes de todos los estados. Sin embargo, el Coronel E. D. Meir, líder de este esfuerzo, fue elegido Presidente de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) y en 1911 logró convencer al consejo directivo sobre la necesidad de un comité que formulara especificaciones estándar para la construcción de calderas de vapor y otros recipientes a presión y para el cuidado en la operación de los mismos.

Este comité estuvo integrado por siete miembros con las siguientes especialidades:

- Un ingeniero consultor.
- Dos profesores de ingeniería.
- Dos ingenieros empleados por fabricantes de calderas.
- Un ingeniero empleado por un fabricante de materiales.
- Un ingeniero empleado por una compañía aseguradora de calderas.

La conveniencia de una representación más amplia se hizo notar, dando por resultado el nombramiento de un "Comité de Consejo" con representantes de fabricantes de calderas y recipientes a presión, usuarios, diseñadores, fabricantes de materiales y accesorios y compañías aseguradoras. Esta junta pasó más tarde a formar el primer "Comité de Calderas de Código".

El primer "Código de Calderas ASME" se imprimió en 1914, en el que, en la Parte I, la Sección I cubría las calderas de potencia, la Sección II calderas de calentamiento; y la Parte II trataba las instalaciones existentes. El Código ganó rápidamente la aceptación de estados y municipios, esto contribuyó a que las explosiones se redujeran de manera considerable.

Los participantes en la preparación de primer código fueron aquellos representantes de la industria, expertos en los campos de diseño y fabricación de calderas, fabricación de materiales, operación de calderas y el aseguramiento de éstas. El propósito de tener una representación extensa en los comités del código se sigue todavía, y se procura mantener un balance de los intereses afectados, evitando que algún interés personal domine este comité.

Los elementos que proporcionaban la seguridad en el primer código, podrían enumerarse como sigue:

- El uso de materiales con propiedades conocidas.
- El empleo de fórmulas y reglas de diseño para establecer un espesor adecuado con un factor de seguridad mínima.
- Uso de métodos de construcción con integridad conocida.
- Uso de accesorios apropiados y válvulas de seguridad.
- Inspección y pruebas durante la fabricación y al completar el ensamble.
- La aplicación de un estampado al completar la caldera para mostrar que se cumplieron las reglas del código.

Conforme se vava revisando la Sección I se verá que estos elementos básicos, los cuales se han refinado de acuerdo al avance en el diseño de calderas y la tecnología de materiales, siguen siendo requisitos fundamentales del Código.

Como el comité del código amplió su alcance y el interés y el apoyo recibidos aumentaron, se vio la necesidad de abarcar otras secciones. En la actualidad se tienen 22 volúmenes que incluyen la mayor expansión desde 1963, en la que se incluyeron, en el alcance del código los componentes para plantas termonucleares.

En nuestra discusión veremos la Sección I y otras secciones del Código a las que se hace referencia, como las Secciones II; V y IX, así como las Secciones ANSI-B-16 para conexiones, bridas y válvulas y ANSI B31.1 para Sistemas de Tuberías de Potencia del Código para tuberías a presión.

OPERACIÓN DE CÓDIGO

SECCIÓN I.- PANORAMA GENERAL

Para familiarizarse con la Sección I, se recomienda empezar por el principio para saber que es lo que contiene. La primera parte abarca un bosquejo de todo el "Código para calderas y recipientes a presión", una introducción, el establecimiento de políticas, las listas de comités y sus miembros, una tabla de contenido y un preámbulo. Después de este último están las reglas del Código divididas en varias partes y al final se encuentra un apéndice, muestras de forma y guías de reporte, factores de conversión al Sistema Internacional de Unidades y finalmente un índice". Aun cuando no es necesario conocer todo el contenido del Código para diseñar y construir calderas, sí es conveniente saber cómo opera el Comité al preparar y mantener actualizado el Código, incluyendo todas sus secciones. Se sugiere leer la información que se encuentra al principio de la Sección I hasta el Preámbulo para obtener una visión más amplia de la que podemos cubrir en estas pláticas. Sin embargo, mostraremos cierta información relacionada directamente con la preparación y uso del "Código para calderas de potencia".

COMENTARIOS GENERALES

Antes de empezar a analizar las reglas específicas de la Sección I, es conveniente considerar algunos factores significativos relacionados con el Código de calderas de potencia.

Dado que la Sección I cubre todas las calderas que operan a más de 1 Bar (15 PSI), se puede observar que cubre muy diferentes tamaños y tipos. En ellas se incluyen las calderas paquete igneotubulares más pequeñas, las paquete de tubos de agua; las industriales montadas en campo, y las más grandes para Plantas y Centrales generadoras de energía eléctrica tanto las tipo domo y las de un solo paso (monotubulares o "ONCETHROUGH"). Estas últimas pudiendo operar a presiones mayores 350 kg/cm^2 (5000 psi) con temperaturas de vapor del orden de 650°C (1200°F). A fin de cubrir calderas tan diferentes en tamaños y tipos, y que operan en un rango de presiones tan amplio, es necesario que las reglas sean generales.

El Código dicta reglas y requisitos mínimos para el diseño y fabricación de calderas, pero siempre en función de seguridad; por lo tanto, no es un código que permita diseñar en base a él exclusivamente, una caldera. De ahí, que el diseñador y el fabricante tengan la responsabilidad de proporcionar una caldera que suministre la cantidad de vapor a las condiciones de presión y temperatura deseadas, con un mínimo de problemas de operación o mantenimiento y con la certeza de que es totalmente segura. Debido a esto, el fabricante debe cumplir con las reglas y tanto el inspector autorizado, como el propio fabricante, deben certificarlo para poder estamparla con sello autorizado por el Código.

CERTIFICACIÓN Y POLÍTICAS

Una de las principales razones por las que el Código ASME ha obtenido un excelente "Record" de seguridad y la aceptación en el mundo entero, es su sistema de certificación, que es el medio por el cual ASME evalúa y establece la calificación de un fabricante, tanto de calderas como de materiales, en cuanto al cumplimiento del Código. VER ÍNDICE.

El aspirante al SELLO ASME de calderas debe cumplir con lo siguiente:

- * Mantener en vigor un contrato con una agencia de inspección autorizada para contribuir con la inspección de un tercero.
- * Controlar las operaciones de diseño, fabricación y pruebas e inspección, a través de un sistema de calidad descrito en un manual y en vigor en su organización.
- * Una revisión por parte de un grupo de evaluación designado por ASME, para verificar que el manual anterior está de acuerdo con los requisitos del Código y que se esté aplicando con efectividad y vigilancia.
- * La aprobación del Comité del Sello ASME una vez que se haya revisado el reporte del grupo designado.

Cuando se hayan completado los requisitos anteriores, el aspirante recibirá un Certificado de Autorización para usar el Sello cuya aplicación al equipo descrito en dicha autorización queda abajo.

Su total responsabilidad quedando sujeto el fabricante a refrendar la vigencia de la autorización y a acatar las disposiciones del COMITE DEL SELLO si se reportan desviaciones importantes en su buen uso.

INTRODUCCIÓN

La introducción nos proporciona la información referente al modo de operar del Comité de Calderas y Recipientes a Presión. Aquí se esbozan algunos de los aspectos administrativos más importantes de la preparación, revisión e impresión de los casos del Código y la Enmiendas, así como las fechas en que se hacen efectivas estas últimas.

El Comité principal y los Subcomités se reúnen seis veces al año a intervalos aproximados de dos meses. Las revisiones y adiciones se emiten tres veces al año como Enmiendas, y entran en vigor como parte del Código, seis meses después de su edición. Los casos de Código pueden editarse para suministrar reglas permisivas, si es que las existentes no cubren adecuadamente una situación determinada, tales como un material nuevo o un avance en la tecnología.

La introducción también habla sobre ciertos aspectos relacionados con el uso del Código por estados, municipios, provincias u otras jurisdicciones legales que adoptan o hacen referencia a éste en sus leyes. Es importante hacer notar, que el Código no tiene carácter legal mientras no sea requerido por alguna jurisdicción legal. El "Consejo Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión", (NATIONAL BOARD OF BOILER AND PRESSURE VESSEL INSPECTORS) se compone de los Inspectores y Jefes de inspección estatales de los Estados Unidos y Canadá que han adoptado el Código ASME. En la introducción se menciona la importante función que desarrolla este Consejo Nacional de inspectores para lograr una administración y cumplimiento uniformes de las reglas del Código.

Una frase de la introducción que cabe citar es la siguiente: "En la formulación de las reglas y el establecimiento de las presiones de diseño y máxima operación, el "Comité de Calderas y Recipientes a Presión" debe considerar los materiales, construcción, método de fabricación, inspección y dispositivos de seguridad". Nótese la similitud con el primer Código editado en 1914.

La introducción señala que "Las especificaciones para materiales base incluidos en la Sección II, Partes A y B son idénticas o similares a aquellas que establece la "Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM)". También determina, que "Las especificaciones para soldaduras de materiales dados en la Sección II, Parte C son idénticas o similares a las de la "Sociedad Americana de Soldadura (AWS)". ASME reconoce que los expertos en la preparación y edición de especificaciones para materiales base están con ASTM, así como los de soldadura están con AWS. Mediante la revisión y adopción de estas especificaciones, se elimina la duplicidad de esfuerzo y se puede seguir la práctica comercial normal en la fabricación de materiales.

ESTABLECIMIENTO DE POLÍTICA

El establecimiento de políticas se relaciona con el uso de los símbolos del Código y las marcas de ASME para publicidad. Esto es lo suficientemente claro y por lo tanto no se necesita discutir.

PERSONAL

La lista del personal que participa en las actividades del Código es bastante larga y se presenta para información. Esta lista es impresionante si se considera que todos son colaboradores voluntarios que representan muy variados intereses. Un requisito de procedimiento de ASME es tener Comités balanceados con representación de los intereses afectados, tales como el Comité Principal y los Subcomités de Recipientes de I, III, IV, VIII y X. Esto va de acuerdo con el criterio para consensos estándares según lo establece el Instituto Nacional Americano de Estándares.

El Subcomité de Calderas de Potencia tiene representantes de fabricantes, usuarios, Instituciones de Reglamentación, Agencias de inspección y seguros, publicaciones técnicas, ingenieros

consultores e ingenieros proyectistas. Entre los representantes que tiene México en este Subcomité se cuentan los Ingenieros A. Plauchú, R. Sánchez P., L. Sánchez G., J. Aguilar, J. R. Vázquez y H. Colter.

CONTENIDO DE LA SECCIÓN I

En la Tabla de Contenido de la Sección I, se puede notar que está dividida en varias partes, cada una representada por iniciales. La razón por la que se usa este sistema, es para identificar con la primera letra la sección ("P" para potencia), y con la segunda, la parte ("W" para soldadura) y evitar así cualquier confusión con las otras secciones del Código.

La Tabla de Contenido identifica que es lo que cubre cada parte y anota especialmente, que la parte PG se aplica a todos los métodos de construcción.

PREÁMBULO

El preámbulo a la Sección I identifica de manera más específica los usos que incluye esta sección, los cuales se muestran en la Tabla I. El empleo de la Sección I del "Código para Calderas y Recipientes a Presión" puede dictarlo, ya sea la autoridad Jurisdiccional o el comprador en su especificación. El uso que se planea dar a esta sección se explica en el preámbulo, y es aplicable exclusivamente a calderas expuestas a fuego y generadores de vapor orgánicos. En adición, se incluyen también varios componentes que normalmente son parte de calderas de potencia. Esto incluye sobrecalentadores, recalentadores, economizadores y, bajo algunas circunstancias, calentadores de agua de alimentación. La Sección I contiene reglas específicas para calderas de potencia, eléctrica, miniatura y calderas de tubos de agua de alta temperatura.

Cuando un generador de vapor no sea expuesto a fuego, se puede aplicar la Sección I o la VIII. El preámbulo lista aquellos casos en que la Sección I no se utiliza, tales como recipientes a presión no sujetos a fuego directo los cuales pertenecen exclusivamente a la Sección VIII, y las unidades donde se genera vapor orgánico para procesos de manufactura químicos o de petróleo, los cuales están cubiertos por los estándares tipo industrial.

TABLA I

USO QUE CUBRE

SECCIÓN I	SECCIÓN VIII Y I	SECCIÓN VIII
1. Calderas sujetas a fuego. 2. Generadores de vapor orgánicos a fuego.	Calderas no sujetas a fuego.	Recipientes a presión no sujetos a fuego.
INCLUYENDO	INCLUYENDO	INCLUYENDO
* Sobrecalentadores integrales y separados. * Recalentadores. * Calentadores de agua de alimentación PFI-I.	* Tanques de expansión en calderas de alta temperatura.	* Evaporadores. * Recipientes de intercambio de calor. * Recipientes de sistemas de procesos químicos y de petróleo.

OTRAS SECCIONES

Generadores de vapor orgánicos para procesos de manufactura químicos o de petróleo.

En muchos casos es fácil decidir cuándo se debe utilizar la Sección I, sin embargo, en ocasiones surgen dudas sobre la aplicación de las diferentes secciones del Código en equipo nuevo o especializado. Un ejemplo de esto es la caldera solar a la cual se le aplicó la Sección I, ya que la caldera se calienta por reflexión a través de espejos y éste puede estimarse como un método de fuego indirecto. Además de esta consideración básica, la caldera solar tiene componentes estándar que solamente cubre la Sección I. En ocasiones se han presentado a los Comités del Código algunos dispositivos que generan vapor y que son mucho más difíciles de clasificar a este respecto.

La Sección I también tiene ciertos límites de servicio. Por ejemplo, para calderas que operan a menos de 1 BAR (15 psig) y aquellas acuatubulares de alta temperatura menores de 11 kg/cm² (160 psig), se recomienda que el diseñador use la Sección IV, aunque puede usar la Sección I si así lo prefiere.

REQUISITOS GENERALES PARA TODOS LOS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN PARTE PG

Esta parte abarca los requisitos generales para todos los métodos de construcción que cubre la Sección I. La Tabla de Contenido nos muestra un panorama de los diversos aspectos comprendidos. En la revisión de esta sección, se tratará de profundizar en los párrafos más significativos, con el objeto de entender mejor el Código. En ella se hace referencia a otros párrafos del mismo Código y a otros estándares tales como el ASTM y el ANSI B-16.

PG-1 y 2 proporcionan información más específica que la del preámbulo, sobre el alcance y limitaciones de servicio.

PG-5 a PG-13 establecen las reglas sobre los materiales que pueden usarse en la construcción de calderas, los cuales se identifican por un número de especificación. Las especificaciones completas se incluyen en la Sección II del Código. Se debe recordar que las especificaciones ASTM se revisaron y aprobaron para usarlas en el Código por lo que éstas son idénticas o con ligeras modificaciones, normalmente requisitos adicionales, a las de ASTM. Cuando el Comité del Código las adopta, se mantiene la designación de ASTM, pero con la letra "S" en el prefijo. Por ejemplo: El ASTM A-515 pasa a ser ASME SA-515, los materiales se listan por forma de producto.

En PG-9 se encuentran los tubos y partes que contienen presión, así como las partes de las calderas y las de los sobrecalentadores. La razón para hacer esta separación, es que ciertas aleaciones de materiales austeníticos que pueden usarse en partes de sobrecalentadores que operan a esfuerzos y temperaturas elevados, pueden estar sujetas a esfuerzos por corrosión de cloruros si se usan como parte de caldera y, por lo tanto, no se permite su empleo en este último caso.

En PG-5 se hace referencia a las tablas de esfuerzos PG-23.1 y PG-23.2 que se encuentran en el Apéndice, donde se listan los materiales aprobados en la Sección I y sus esfuerzos permisibles. Aún cuando más adelante se hablará de estas tablas, es importante hacer notar, que los materiales que no se encuentren en ellas se pueden usar para construcción de acuerdo a la Sección I, siempre que satisfagan o excedan los requisitos de estos párrafos, "Las especificaciones son requisitos mínimos".

PG-10 da las reglas para determinar las propiedades químicas y físicas por medio de pruebas, con el fin de establecer, si un material que no está totalmente identificado, cumple con los requisitos de una especificación aceptable. Si las pruebas confirman que se encuentra dentro del rango de la especificación y el inspector acepta los resultados, el material se podrá marcar como se indica en PG-10.3 y se podrá usar para construcción según el Código.

PG-1, llamado Partes a Presión Misceláneas, establece las reglas para prefabricar o preformar partes a presión, cuando éstas las suministra un fabricante de calderas diferentes. Los materiales para estas partes deben cumplir con los listados en la Sección I.

o en el Código ANSI en sus partes aplicadas. De manera similar, las partes hechas con los estándares del fabricante o las partes formadas que se suministran como materiales, deben cumplir con Sección I.

Las previsiones que cubre PG-11 y sus subpárrafos 11.1, 11.2 y 11.3 son muy importantes para establecer la aceptación por la Sección I de las partes preformadas. Si están fundidas, forjadas, roladas, formadas o soldadas, pueden usarse si el material es aceptable y el producto está identificado conforme a un estándar; ya sea de ANSI o del fabricante. Los requisitos de identificación y certificación se dan como requisitos de inspección para partes soldadas.

DISEÑO

Los requisitos de diseño se dan en los párrafos PG-16 a PG-25. Esta subparte de PG se debe comprender lo mejor posible, ya que cubre las reglas para construir diferentes tipos de calderas. Por lo tanto, veremos los aspectos más significativos de los requisitos de diseño.

PG-16 GENERAL

En PG-16 se establece que las reglas de diseño de esta parte deben aplicarse en adición a las reglas de diseño específicas de otras partes. Estas son: PWT para fabricación de calderas de tubos de agua, PFT para calderas de tubos de humo, PMB para calderas miniatura, PEB para calderas eléctricas y PVG para generadores de vapor orgánicos.

PG-16.2 exige un diagrama especial para identificar la localización de las diferentes partes a presión cubiertas en la Sección I, cuando se diseñen generadores de vapor de circulación forzada, donde no existe una línea entre el vapor y el agua, y cuando se diseñe para diferentes niveles de presión como lo permite PG-21.2.

Otros párrafos de PG-16 proporcionan los requisitos especiales para espesores mínimos de placas y tolerancias para placas y tubos.

PG-18 de las previsiones para efectuar un aprueba hidrostática de deformación en una parte cualquiera, cuando las reglas de diseño no son aplicables a una parte específica. Las reglas para esta prueba se establecen en el Apéndice A-22.

PG-21 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE (MAWP)

Este es quizá, uno de los aspectos más significativos de diseño del Código, ya que es la base para establecer el espesor de las partes a presión y el ajuste de las válvulas de seguridad. Para los fabricantes de calderas, es la presión de diseño a usar en la caldera, o en el caso de calderas de circulación forzada, es la presión de diseño para los diversos componentes de partes presionados para diferentes presiones. Aquí se establece que la presión de trabajo máxima permitida se determina aplicando

los valores de esfuerzos (PG-23 a PG-38, PG-52 y PG-53), y las definiciones (Diámetro, Espesor y Geometría) designadas en la Sección I.

PG-23 VALORES DE ESFUERZOS PARA FORMULAS DE CALCULO

Este párrafo establece que las tablas de esfuerzos PG-23.1 y PG-23.2 que aparecen en los Apéndices A-24 y A-25, y las referencias A-150, dan las bases para seleccionar los esfuerzos permisibles. Estos son los esfuerzos que se usan en las formulas de diseño de PG-27 y de otros párrafos que tienen una fórmula con una "S". Debido a que la base para establecer los esfuerzos permisibles es una de las partes más significativas de la Filosofía de diseño de la Sección I, veremos que está directamente relacionada con:

- 1.- La filosofía criterio de diseño.
- 2.- El tipo de fabricación permitido.
- 3.- El grado de análisis que se requiere.
- 4.- La cantidad necesaria de exámenes no destructivos.

En la Sección I, el espesor requerido y la presión de trabajo máxima permitida por medio de los esfuerzos permisibles, que esencialmente son los esfuerzos de la membrana. Los dobleces secundarios o las concentraciones de esfuerzos no se calculan. La fórmula empleada, las construcciones permitidas y los esfuerzos permisibles incluyen suficiente margen para limitar a un nivel seguro, los dobleces o los esfuerzos pico. En la Sección I, generalmente se usan factores de 4 en el esfuerzo a la tensión de 1.6 con base en el punto de cedencia. Hace varios años la Sección I y el "Comité Principal" aprobaron el uso del factor 1.5 para el punto de cedencia y apareció como revisión en la enmienda de invierno de Enero de 1980.

El Apéndice A-150 da el criterio completo para establecer los esfuerzos de la Sección I, y el primer párrafo es muy significativo ya que relaciona el uso de las experiencias exitosas para determinar los valores de los esfuerzos. Este párrafo se cita:

"En la determinación de los valores de esfuerzos permisibles para partes a presión, el Comité se guía por experiencias exitosas en servicio, siempre que se disponga de una evidente operación satisfactoria. Tal evidencia se considera equivalente a datos de pruebas donde las condiciones de operación se conocen con razonable certeza. En la evaluación de nuevos materiales, es necesario guiarse hasta cierto punto, por comparación de información de pruebas con datos similares sobre aplicaciones exitosas de materiales similares".

Esta afirmación es importante, ya que le da al Comité la oportunidad de emitir un juicio, al determinar si los valores de esfuerzos podrían o no cambiar, cuando se tienen nuevos datos de materiales con una historia de aplicaciones exitosas en las construcciones del Código, lo cual indica que un cambio en los valores de esfuerzos daría por resultado la aplicación de los factores de los datos evaluados en materiales con un buen

registro de servicio. También permite al Comité emitir un juicio al establecer los esfuerzos para las variaciones de materiales existentes o de materiales nuevos que son similares a los existentes.

A temperaturas menores del rango plástico, el esfuerzo máximo permisible no debe ser mayor de:

- 1.- $1/4$ del esfuerzo mínimo a la tensión especificado a la temperatura ambiente.
- 2.- $1/4$ del esfuerzo a la tensión a la temperatura.
- 3.- a). $5/8$ del esfuerzo mínimo de cedencia especificado a la temperatura para materiales ferrosos.
b). $2/3$ del esfuerzo mínimo de cedencia especificado a la temperatura para materiales no ferrosos.
- 4.- a). $5/8$ del esfuerzo de cedencia a la temperatura para materiales ferrosos.
b). $2/3$ del esfuerzo de cedencia a la temperatura para materiales no ferrosos.

A temperaturas en el rango plástico, el esfuerzo máximo permisible no excede el mínimo de lo siguiente:

- 1.- 100% del esfuerzo promedio para producir un rango del 0.01% cada 1000 h.
- 2.- 67% del esfuerzo promedio para producir una ruptura después de 10,000 h.
- 3.- 80% del esfuerzo mínimo para ruptura después de 1000 h.

En el rango de temperatura donde el esfuerzo a la tensión o de cedencia gobierna la determinación de los esfuerzos, los esfuerzos mayores se pueden justificar para algunos materiales no ferrosos y austeníticos cuando una ligera determinación mayor no es, en sí misma, objetable. Los esfuerzos alternativos para tales materiales y usos se proporcionan e identifican por medio de una nota de pie de página en las tablas. Al establecer estos esfuerzos, los valores pueden exceder $5/8$, pero no 0.90 del esfuerzo de cedencia a la temperatura. Estos esfuerzos mayores son satisfactorios para tubos, pero no se recomiendan para el diseño de bridas u otras aplicaciones sensibles a la deformación.

En la Tabla PG-23.1 del "Código de Criterios de Diseño en los U. S.- Evaluación de las propiedades de los esfuerzos" se presenta una discusión detallada de cómo se obtienen los valores de esfuerzos permisibles para estos materiales a partir de los datos de prueba.

PG-25 FACTORES DE CALIDAD PARA LAS FUNDICIONES DE ACERO.

Este párrafo y los subpárrafos 25.1 y 25.2 proporcionan los factores de calidad que se aplican a los esfuerzos dados en PG-23.1. Un factor del 80% se puede usar a menos que los requisitos especiales de examen y reparación de PG-23.2 se cumplan, en cuyo caso se puede utilizar un factor del 100%.

A continuación se hablará de los diversos requisitos y fórmulas de diseño para establecer el espesor de las partes a presión.

PG-27 COMPONENTES CILÍNDRICOS BAJO PRESIÓN INTERNA.

Este párrafo y sus subpárrafos abarcan componentes como tubos, domos y cabezales. En estos párrafos encontrará un uso extensivo de notas. En el párrafo 27.4 estas notas son muy importantes, por ser tanto explicativas como complementarias a las fórmulas.

En el 27.2.1, la fórmula se da para determinar el espesor de la tubería hasta e incluyendo 127 mm (5 pulg.) de diámetro exterior. Las notas (2), (4), (8) y (10) son aplicables.

En el 27.2, se indica la fórmula para tuberías, domos y cabezas y las notas (1), (3), (5), (6 a 10) son aplicables.

El párrafo 27.2.3., se aplica cuando es espesor de la parte a presión es mayor que la mitad del radio interno, y requiere que se usen las fórmulas de A-125.

Los símbolos que se utilizan para estas fórmulas se dan en el párrafo 27.3. Una vez más, se enfatiza la importancia de las notas del párrafo PG-27.4 al aplicar las fórmulas.

Uno de los aspectos más significativos en el uso de las fórmulas es la selección de los esfuerzos permisibles, "S", de las tablas de esfuerzos en el párrafo PG-23. El esfuerzo se selecciona para el material a la temperatura de operación del metal. Esto lo debe determinar el diseñador, excepto bajo las condiciones descritas en la nota (2), que da una temperatura mínima de 700°F para tubos que reciben calor.

Para calderas de tubos de agua tipo domo y para calderas de tubos de humo, los tubos que forman el hogar y los bancos de tubos, los cuales están esencialmente a temperatura de saturación, el esfuerzo permisible se selecciona para el valor de 370°C (700°F), aunque la temperatura de saturación esté considerablemente abajo de esa temperatura. Esta es una medida de seguridad que ha tenido el Código por muchos años y que da un buen margen de diseño, reconociendo que pueden depositarse ciertas incrustaciones en los tubos elevándose así la temperatura del metal arriba de la de saturación.

Para los tubos del sobrecalentador y recalentador, el metal del tubo se enfría con vapor y los cálculos de los fabricantes para determinar la temperatura máxima de metal para diseño son más complejos. Se debe considerar un margen suficiente sobre las condiciones promedio para cubrir las variaciones, tales como

combustión desbalanceada y condiciones de operación desfavorables que pueden elevar la temperatura por arriba de la normal. Las dos variables más importantes que afectan la temperatura de metal de tubo son el rango de flujo de vapor, el cual afecta la conductancia de la película de vapor, y el rango de absorción de calor, que afecta el gradiente de temperatura a través de la pared del tubo y de la película de vapor. Un ejemplo esquemático del significado de estos efectos se muestra en la Fig.

Nótese que la temperatura de la pared exterior del tubo en "B" se incrementa 20°C (35°F) cuando se reduce el flujo de vapor en 50% de "A". En "C" la temperatura de la pared exterior del tubo bajó 35°C (63°F) cuando se redujo el rango de absorción de calor a 50% de "B". El ejemplo en "D" muestra el efecto de la incrustación en el lado de vapor, y el aumento de 15°C (26°F) en la temperatura del metal sobre las condiciones de "A" debido a la incrustación.

El conocimiento seguro de la temperatura del metal del tubo es muy importante, cuando los tubos operan en el rango de temperatura donde los esfuerzos están calculados en función del punto de ruptura plástico del metal, en lugar de las propiedades a la tensión o a la cedencia. Un tubo de sobrecalentador que opera continuamente a una temperatura de 50°F abajo de la de diseño usada para seleccionar los valores de esfuerzo, en el Código, puede reducir su vida al ser afectada por un factor de 10 o más.

Otro de los símbolos con una nota importante de referencia es "E", eficiencia. Este aparece en las fórmulas para tubería, domos y cabezales, según se vio en una de las figuras anteriores, y en diversas fórmulas que aún no hemos discutido. Como se define en el primer renglón del párrafo de la Nota 1, la "E" representa la eficiencia de juntas soldadas longitudinales o de ligamentos entre aberturas, el que sea menor.

La segunda y tercera líneas describen cuando el factor 1.00 se puede usar, y la cuarta, cuando el factor 0.90 se debe utilizar. Estos factores se relacionan con la fabricación soldada o sin costura.

La quinta línea se relaciona con la eficiencia de los ligamentos que abarcan los párrafos PG-52 y PG-53. Esto tiene como fin proporcionar un factor para compensar la pérdida de metal disponible para contener la presión debida a las aberturas de tubos o boquillas en el domo o cabezal.

Aunque ni las notas que se aplican a las fórmulas o al símbolo "E" hacen referencia a las reglas para aberturas y compensaciones, se deben tomar en consideración los requisitos de PG-32 al PG-39 para llevar a cabo los cálculos que requiera la eficiencia de los ligamentos. Hay una relación que se debe establecer para ciertas configuraciones de conexiones de tubos o boquillas de domos para definir que el diseño se base ya sea en requisitos de refuerzo o en requisitos de eficiencia de ligamento, o posiblemente en ambos. Esta relación da al

fabricante diversas opciones que se pueden decidir en base al aspecto económico.

El símbolo "C" al que se hace referencia en la Nota (3) cubre los permisos para roscar tuberías y para la estabilidad estructural.

El símbolo "e" es un factor de espesor para tubos de extremos expandidos que se explica en la Nota 4. Los valores dados se basan en la experiencia y deben proporcionar suficiente metal para dar el esfuerzo mecánico suficiente a fin de asegurar una junta expandida sellada. Se debe notar que cuando los tubos están totalmente soldados a tubos o domos, el valor de "e" se convierte en cero. El símbolo "e" sólo se incluye en la fórmula para tubería 27.2.1.

Como se describe en la Nota (6), el símbolo "Y", que aparece en el 27.2.2 para tuberías, domos y cabezales, es un coeficiente de temperatura. Este factor se aplica sólo a más de 482°C (900°F), y es diferente para aceros ferríticos y austeníticos.

La finalidad es proporcionar un ajuste para reconocer cierta redistribución de esfuerzos internos cuando el material opera en un rango de temperatura en el que puede ocurrir un relajamiento plástico.

PG-29, PG-30 TAPAS CÓNCAVAS

Las tapas cóncavas para las calderas están prácticamente hechas en su totalidad por presión o forjado de placas planas.

Estas operaciones provocan el flujo de metal que puede resultar en un espesor mayor o menor que el de la placa original. Debido a que la operación de formado se puede llevar a cabo por diferentes métodos y procesos, es una práctica común tener tapas estándar calculadas para una presión que se basa en las reglas del PG-20. Los diseñadores de la caldera generalmente especifican el tipo de tapa que la experiencia muestra como la más adecuada para determinada caldera y presión de diseño en particular.

Los requisitos de diseño para todas las formas de tapas cóncavas se basan en fórmulas y reglas de diseño que incluyen factores de seguridad que la experiencia ha comprobado que son adecuadas para construcciones seguras. No se necesitan análisis de esfuerzos para las bisagras o aberturas. Las reglas están dadas para prever la entrada de hombre u otras aberturas, incrementando el espesor que necesita la fórmula o relacionando el espesor que requiere el cuerpo para algunas configuraciones.

Cuando un tipo particular de diseño de caldera no pueda cumplir los requisitos de PG-29, será necesario usar tapas reforzadas como lo indica PG-30. Estas condiciones también las deben seguir los diseños estándar, cuyo rango de presión cumpla con estas reglas, ya que no se diseñan individualmente para cada caldera.

PG-31 TAPAS Y CUBIERTAS PLANAS NO ATIRANTADAS

Las tapas y cubiertas planas se usan mucho para los extremos de cabezales, cubiertas para registros de mano, entradas de hombre y bridas ciegas, así como para ciertas porciones de calderas de tubos de humo. Debido a la amplia variedad de construcciones, las reglas para diseño deben ser generales y comprensivas. La figura PG-31 muestra algunos tipos de tapas y cubiertas planas aceptables y sus símbolos aparecen en PG-31.2. Como se mencionó en la parte de tapas cóncavas, la mayoría de los fabricantes de calderas han desarrollado construcciones estandarizadas, en las cuales se ha verificado que cumplen con los requisitos y rangos de presión. Al usar esta estandarización ya no es necesario revisar el diseño de cada una de las partes de la caldera.

ABERTURAS Y COMPENSACIONES

Del PG-32 al PG-53 se dan los requisitos para los diferentes tipos de aberturas que se pueden usar en calderas. La amplia variedad de aberturas necesarias para las distintas calderas, requiere un juego de reglas que las incluyan en su totalidad. En PG-32.1, 32.2. y 32.3 se proporciona el alcance que cubren las reglas generales y fórmulas para los límites de aberturas simples.

Se debe aclarar, que se dan reglas específicas en los párrafos subsecuentes, así como se hace referencia a párrafos o figuras anteriores, o a otros párrafos posteriores. Esto es necesario, y que los domos y cabezales usualmente tienen diferentes tipos de aberturas, y por lo tanto se debe efectuar una revisión cruzada con el objeto de determinar que se cumplen las reglas para todos los tipos que se usan.

De PG-33 a PG-38 se establecen las reglas para la compensación necesaria en el domo o cabezas con el fin de reponer la pérdida de área cuando se hace una abertura. Se dan a conocer las diferentes geometrías de cabezales y cuerpos donde se pueden usar aberturas. Así como también se indican los límites de metal disponible para compensar las áreas de metal removidas.

Una simplificación de la filosofía de diseño que se utiliza en estas reglas, es que el metal removido debe reemplazarse alrededor de la abertura, dentro de una área específica, de modo que la concentración de esfuerzos causada por la abertura se reduzca a un nivel en el que se prevenga agrietamiento o falla. Estas reglas son consistentes con todo el diseño de las Sección I, el cual usa los esfuerzos permisibles de las tablas correspondientes y las fórmula con factores de seguridad incluidos, de forma que no se requiere un análisis de esfuerzos detallado.

Normalmente el material que se emplea para compensación debe tener un esfuerzo igual o mayor al del material que se reemplaza. PG-37 da reglas que se deben seguir si el esfuerzo es menor. PG-37.2 hace referencia a los requisitos de PW-15 y PW-16 para boquillas soldadas, y suministra reglas para asegurar que se provea el esfuerzo adecuado para estos accesorios.

PG-38 proporciona las reglas para la compensación de aberturas múltiples, cuando están tan cerca entre sí, que los límites de PG-36.2 y PG-36.3 se traslapan. PG-39 identifica aquellos tubos que pueden fijarse a paredes de recipientes por soldadura, pernos roscados, cuerdas o por expansión, y da los requisitos para cada uno. Para soldadura, se hace referencia a PW-15 y PW-16, que verán más adelante. Para conexiones roscadas, las cuerdas deben cumplir con ANSI B-12.

PG-42 CONEXIONES BRIDADAS, ATORNILLADAS - BRIDAS, ROSCADAS Y SOLDADAS.

Esta sección es especialmente significativa, debido a los requisitos que todas las conexiones para tubo, accesorios de tubería y válvulas deben cumplir de acuerdo a la serie B-16 de los "Estándares Nacionales Americanos" listados en PG-42.1. También se hace referencia a PG-58 y PG-59 para los requisitos de presión, temperatura u diseño. Los Códigos ASME y las Políticas estándar hace alusión a otros estándares nacionales cuando son apropiados, aunque éstos se hayan preparado por separado. Todos los estándares que se han elaborado de acuerdo con el criterio de ANSI y que han sido aprobados por el Consejo de revisión de estándares de ANSI, se conocen como "Estándares Nacionales Americanos".

Aún cuando las bridas, válvulas y conexiones se aceptan en el Código como productos para usarse en construcción, de acuerdo a la serie B-16 de estándares, hay varios requisitos de aplicación en PG-42, que deben cumplirse para que se puedan utilizar en las calderas.

PG-44 indica que las aberturas para inspección tienen menos requisitos que las entradas de hombre o registros de mano; este párrafo da reglas para diseño.

Del PG-46 al PG-49 se establecen reglas para construcciones atirantadas, incluyendo los requisitos de fijación, espesor de placa y tamaño de los tirantes. Estas reglas suministran el soporte necesario para superficies planas o curvas sin concentraciones excesivas de esfuerzos en los puntos de fijación de los tirantes a la placa.

PG-52 y PG-53 LIGAMENTOS

Estas reglas establecen los métodos para determinar la eficiencia del metal entre los barrenos para tubos, que se usan para obtener el espesor requerido en el domo o cabezal. Puesto que esencialmente todas las calderas tienen algunos tubos con espaciamientos muy cerrados cuando se conectan a domos o cabezales, se hace necesario calcular algunas eficiencias de ligamentos.

Los cálculos son bastante simples y se dan gráficas con ejemplos de patrones de espaciamiento de tubos para ayudar al diseñador. Las reglas de PG-52 son para grupos de aberturas que forman un patrón definido, y las de PG-53 para los que no tienen un patrón definido.

Como se vio antes, la eficiencia de ligamento "E" se usa en las fórmulas de PG-27 para establecer el espesor del domo o cabezas.

TUBERÍA EXTERNA DE LA CALDERA Y SUS CONEXIONES
PG-58 CONEXIONES DE SALIDA Y TUBERÍA EXTERNA
PG-59 REQUISITOS DE APLICACIÓN PARA LA PROPIA CALDERA

La Sección I siempre ha mantenido la jurisdicción con respecto a la tubería externa de la caldera, la cual se extiende hasta incluir las válvulas que exige el Código. Hace algunos años, el Comité del Código quiso agregar requisitos de diseño para flexibilidad de estas tuberías, pero después de varios estudios y revisión de los requisitos de diseño del "Código para Tuberías a Presión" de ANSI B-31.1, el cual incluye un análisis de flexibilidad, se decidió que la Sección I podría hacer referencia a ese Código para el diseño de la tubería externa de la caldera. Debido a la necesidad de identificar qué es lo que se entiende por las conexiones propias de la caldera, en el Preámbulo se describen esos términos, que pueden incluir tubería interna y externa de la caldera. Para aclararlo mejor, usaremos diferentes explicaciones.

La tubería propia de la caldera, es la que normalmente se incluye en el alcance exclusivo del fabricante. Esto cubre típicamente la línea entre el economizador y el domo, los tubos de bajada del sistema de circulación, y la tubería de conexión entre las secciones de un sobrecalentador o recalentador. Las reglas para estas tuberías se encuentran dentro del alcance de la Sección en el párrafo PG-59.

La tubería externa es aquella que se extiende hacia afuera de los componentes de la caldera hasta las válvulas que requiere el Código. En las figuras PG-68.3.1 y PG-58.3.2 se muestran, tanto las tuberías propias como las externas de la caldera. Estas últimas incluyen la de agua de alimentación, vapor principal, venteos, drenajes, purgas y la tubería para instrumentos. Los materiales, diseño, fabricación, instalación y prueba deben estar de acuerdo con ANSI B-31.1, "Tubería de Potencia".

La tubería que no es de la caldera está más allá de los valores que se establecen en la Sección I. Normalmente ésta se suministra como "Tubería ANSI B-31.1".

En PG-59, se muestran los requisitos de aplicación para la tubería propia de la caldera, se tienen reglas para las conexiones de esta tubería, y requisitos para tubería de purga, drenajes, válvulas y conexiones.

PG-60 REQUISITOS PARA TUBERÍAS, VÁLVULAS Y CONEXIONES MISCELÁNEAS

Este párrafo es relevante debido a los requisitos para indicadores de nivel y columnas de agua. La importancia de la precisión en la indicación del nivel de agua, redundando en la operación segura de las calderas, y por ello, estas reglas bastante específicas para asegurar esta precisión.

SUMINISTRO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.

El requisito más importante para el suministro de agua de alimentación es que se tengan al menos, dos fuentes de suministro para aquellas calderas que tengan más de 50 m² (500 pies²) de superficie de calefacción. Las condiciones para la tubería y válvulas de agua de alimentación están cubiertas en PG-58.

VÁLVULAS DE ALIVIO Y SEGURIDAD

PG-67 a PG-73 cubren los requisitos para válvulas de seguridad, siendo éstos los de capacidad, presiones de ajuste, limitaciones de sobrepresión, el uso de válvulas de seguridad con actuador, pruebas, montaje, operación, requisitos mecánicos y certificación de inspección y capacidad.

Algunos de los requisitos más significativos, son: Las válvulas de seguridad de resorte cargado proporcionan un medio automático para prevenir sobrepresión. Los requisitos limitan las válvulas a lo que comúnmente se conoce como "3% de acumulación" en contraste con el 10% que permite la Sección VIII. Acumulación es el incremento de presión necesario, arriba del punto de ajuste, para llevar a la válvula a la posición de totalmente abierta.

Las tres presiones más importantes para una válvula de resorte cargado, son: (1) el punto de ajuste; (2) la presión necesaria para abrirla hasta la posición de capacidad máxima; (3) la presión a la que vuelve a cerrar. La diferencia en porcentaje entre el punto de ajuste y la presión a la que vuelve a cerrarse se conoce como purga (BLOWDOWN). La figura PG-67.4 ilustra algunas de las reglas de ajuste, por ejemplo, una de las válvulas instaladas debe ajustarse 3% por abajo de la presión máxima permisible de trabajo; así mismo, todas las válvulas deben abrir totalmente antes de que la presión de la caldera exceda el 6% de la presión máxima permisible de trabajo. Ninguna válvula debe ajustarse a más del 3% por arriba de la presión máxima permisible de trabajo, y el máximo "BLOWDOWN" permitido es del 4% por abajo de la presión de ajuste.

Los requisitos de capacidad de las válvulas de seguridad se basan, ya sea en la superficie de calefacción de la caldera y de las paredes de agua (PG-70) o en la capacidad máxima que la caldera puede generar sin permitir que la presión aumente más del 6% por arriba de la presión máxima permisible de trabajo (67.2). Para la mayor parte de calderas con combustibles fósiles generalmente prevalece esta última regla. Las reglas también se dan en función de la cantidad de vapor que puede liberarse a la salida del domo y del sobrecalentador (68.2).

El Código exige que los fabricantes de válvulas de seguridad demuestren a los inspectores del "Consejo Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión" (NBBPVI), su habilidad para fabricar válvulas de seguridad, a fin de que cumplan con la capacidad para obtener su certificación correspondiente. Cuando cumplen satisfactoriamente con la capacidad e inspección respectivas, los fabricantes pueden obtener el permiso

correspondiente para usar el símbolo estampado del Código. Estos requisitos aparecen en PG-69 y PG-73.

FABRICACIÓN

Las reglas para fabricación se establecen en PG-75 a PG-82. Estas se relacionan primordialmente con las limitaciones dimensionales y con las tolerancias en los procesos de fabricación, manteniendo la placa de identificación y reparando los defectos en los materiales.

INSPECCIÓN Y PRUEBAS

En los primeros comentarios generales se mencionó el "Sistema de Certificación de ASME". Uno de los elementos de este sistema es el inspector autorizado, el cual actúa como la "Tercera Parte" de la inspección al fabricante. En PG-90 se requiere que la inspección durante y al completar la fabricación, la efectúe un "Inspector Autorizado". En PG-91 se hace referencia a la calificación requerida de inspectores. Este dice:

"La inspección que requiere esta Sección debe hacerla un inspector empleado por un estado o municipio de los Estados Unidos, una provincia de Canadá, o por un inspector empleado regularmente por una compañía de seguros autorizada para emitir un seguro para calderas y recipientes a presión. Estos inspectores deben estar calificados por un examen escrito bajo las reglas de cualquier Estado de los Estados Unidos o provincia de Canadá, los cuales han aceptado el Código".

En la introducción del Código, se menciona el excelente trabajo que lleva a cabo el Consejo Nacional para obtener un criterio uniforme a través de los Estados Unidos y el Canadá. Una de las actividades del Consejo Nacional es proporcionar programas de entrenamiento y preparar los exámenes que se mencionan en PG-91, los cuales son efectuados por los Estados, así como emitir una "Comisión del Consejo Nacional" a aquellos inspectores que pasaron el examen y recibieron un certificado de competencia del estado que realizó el examen. Esta "Comisión del Consejo Nacional" está generalmente reconocida por todos los estados y provincias que han adoptado el Código ASME, de tal manera, que las inspecciones que se realizan en una planta de un estado son aceptables en los demás estados.

PG-99 PRUEBA HIDROSTÁTICA

Una vez que la caldera está terminada, se requiere efectuar una prueba hidrostática, ya sea en la planta de fabricación o en el campo, según el caso. La prueba debe realizarse a temperaturas mayores de 21°C (70°F) con la inspección cuidadosa. La reducción en la presión y la temperatura máxima es por cuestión de seguridad para el inspector mientras se realiza la prueba.

CERTIFICACIÓN POR ESTAMPADO Y REPORTE

Del PG-104 al PG-113 se cubren los requisitos para la certificación y estampado comúnmente referido como "SELLO ASME" de calderas y partes de calderas que están construidas conforme a las reglas del Código. El símbolo estampado del Código ASME CODE SYMBOL STAMP sólo la pueden aplicar las organizaciones que tienen el certificado de autorización de ASME. El poseedor del certificado debe usar las formas de reporte apropiadas (PG-112, 113) para registrar el diseño detallado y la información de fabricación que se requiere, y debe certificarse por la firma de un representante autorizado que avale que dicha información es correcta, y que el diseño y fabricación cumplen con el Código. Esta hoja de datos debe estar firmada también por el inspector autorizado que realizó las inspecciones de taller y de campo. Después del Apéndice de la Sección I se incluyen muestras de las hojas de datos.

En PG-105 se describen los símbolos de estampado del Código así como las condiciones para obtener el certificado de autorización. Estos requisitos aparecen en 105.4 y son:

- * Un sistema de Control de Calidad - Apéndice A-300.
- * Un contrato o arreglo con una agencia de inspección autorizada.
- * Revisión por AI y la jurisdicción (o Consejo Nacional) del sistema de C.C./A.C. y su implementación.
- * Aprobación del "Comité del Sello ASME" una vez que el equipo de revisión hay analizado el reporte con dictamen positivo.

El sello del Código sólo se puede aplicar a una caldera, cuando se han cumplido todas las reglas aplicables del Código a esa caldera. Si el diseño está conforme al Código, pero los materiales usados no lo están, o la inspección no se hizo por un inspector calificado, entonces no se podrá estampar el Sello ASME en esa caldera.

Es importante que se sigan todas las reglas para estampado indicadas en estos párrafos, incluyendo el uso de las formas de reporte apropiadas. Se debe prestar especial atención al uso de formas para partes que no ha manufacturado el fabricante de la caldera, y al reporte maestro con todas las formas soporte necesarias.

PARTE PW

REQUISITOS PARA CALDERAS FABRICADAS POR SOLDADURA

En esta parte las reglas son aplicables a calderas y sus partes componentes, incluyendo tubería que sea fabricada por soldadura. Esta parte incluye provisiones para la selección de materiales, diseño, fabricación, inspección y pruebas de calderas así como de sus componentes fabricados por soldadura. Estas reglas se usan en conjunto con la parte PG.

En los requisitos generales de PW-1, se hace referencia a la Sección IX para los procedimientos y pruebas que califican los procedimientos de soldadura y la capacidad de los soldadores. Es responsabilidad de los fabricantes el mantener un control completo sobre los soldadores que empleen y debe estar incluido en su sistema de control de calidad.

Los requisitos de diseño están incluidos en los párrafos PW-8 al PW-19.

En el PW-9 hay un requisito de conicidad de tres a uno cuando placas de diferentes espesor son soldadas a tope. Debido a los espesores diferentes esta conicidad reducirá la concentración de esfuerzos a niveles aceptables según la fabricación de la Sección I.

En el PW-11 se dan los requisitos para la examinación de soldaduras por radiografiado y ultrasonido. Se cita la Sección V del Código para la metodología de estos exámenes.

Es importante notar que en el párrafo 11.2, el examen por ultrasonido se requiere únicamente cuando no se pueda obtener un radiografiado satisfactorio.

Uno de los aspectos más importantes de la fabricación por soldadura está incluido en el PW-15 y PW-16. Estos párrafos, y las figuras de referencia PW-16 y PW-16.1, incluyen reglas para colocar toberas y otro tipo de conexiones a recipientes. Cuando se usen estas reglas, es importante notar que los requisitos de esfuerzo del párrafo PG-37, previamente discutidos, deben cumplirse por medio de material de compensación, el cual se identifica para ciertas configuraciones en el 15.1.6.

Los requisitos para atezadores soldados, cuando se usan, se dan en el PW-19.

Los requisitos de fabricación se incluyen del PW-26 al PW-43.

Los métodos permisibles de soldadura incluidos en el PG-27 incluyen los procesos comerciales más comúnmente usados en la industria de calderas y recipientes a presión.

Como se menciona antes, la Sección IX se cita como referencia en el PW-28 para el procedimiento de calificación de soldadores. También se incluyen los requisitos para el registro de procedimientos, máquinas soldadoras, operadores de soldadoras que

deben ser conservados por los fabricantes, así también para la identificación del soldador que efectuó determinada unión por soldadura. Estos registros son necesarios por el Inspector Autorizado para asegurarse que la soldadura se llevó a cabo de acuerdo a las reglas del Código.

En el PW-35 hay importantes requisitos específicos con respecto al terminado de la superficie de juntas longitudinales y circunferenciales. Estos dan valores específicos de material de refuerzo que pueden dejarse así como para socavado. Hay dos razones principales para estos límites: (1) evitar radiografías mal interpretadas, y (2) prevenir concentración de esfuerzos no aceptables.

En el PW-38, sobre el precalentamiento, es importante hacer notar que la información específica dada en el Apéndice A-100 no es mandatoria. El precalentamiento real que se usaría en determinado caso estaría incluido en el procedimiento de calificación de soldadura y en la especificación de soldadura.

La información de A-100 se da como guía únicamente.

En contraste con la guía no mandatoria de precalentamiento, los requisitos para el tratamiento térmico después de la soldadura según párrafo PW-39 son mandatorios. La tabla PW-39 que da estos requisitos, es compatible con diferentes tablas para cada número P. Estas notas extensas de esas tablas, la mayoría de las cuales da excepciones a los requisitos de construcciones específicas. En general, las excepciones se aplican a tuberías de diámetros pequeños y a las limitaciones de espesores de soldadura que varían con el número P.

El texto de los subpárrafos del PW-39 dan las explicaciones y los requisitos para la aplicación de la información de la tabla PW-39.

La reparación de soldaduras no aceptables está dada en el PW-40. Se aplicará el precalentamiento y tratamiento térmico posterior a la soldadura a menor que ciertas condiciones dadas en el párrafo P-40.2 se cumplan.

Las reglas específicas para efectuar juntas circunferenciales en tuberías, tubos y cabezales se citan en el PW-41. Todas estas juntas deberán ser radiografiadas excepto como se prevee en el párrafo 41.1.1. al 4.1.1.4. estas excepciones se aplican principalmente a tuberías o tubos dependiendo de su diámetro, espesor y localización en la caldera. En general, los tubos del horno, de la caldera y del sistema de circulación, excepto alimentadores grandes, no requerirán radiografiado.

Otros requisitos dados en 41.2 al 41.6 cubren los detalles específicos para efectuar juntas soldadas a tope, ensamblado, permisible de juntas con soldaduras tipo de caja, y procesos de soldadura.

En el párrafo PW-43 se dan las reglas para establecer la carga que puede soportar un elemento estructural. La fórmula

43.2 da una gráfica para determinar la carga permisible y en el Apéndice A-71 al A-74 se dan ejemplos del cálculo de carga permisibles.

Los requisitos de Inspección y Pruebas se citan en el PW-46 al PW-54.

Las obligaciones del inspector están dadas para la inspección que efectúa durante la fabricación con objeto de asegurarse que los procedimientos y soldadores están calificados apropiadamente, y que la soldadura y tratamiento térmico se han llevado a cabo como lo requiere el Código.

Cuando se requieren radiografías, los estándares de aceptación para el radiografiado de las mismas se incluyen en el PW-51. Estos consideran como inaceptables cualquier tipo de fractura o zona de fusión o penetración incompleta, e inclusiones de escoria que excedan los límites anotados en el párrafo 51.13.2. Se le obliga al fabricante a conservar los juegos completos de radiografía por un periodo de 5 años.

las personas que lleven a cabo el examen de radiografías, deben estar calificados de acuerdo con la Publicación de la Sociedad Americana de Pruebas No Destructivas SNT-TC-1A.

Cuando una soldadura sea examinada mediante ultrasonido, los estándares de aceptación para su examen están contenidos en el PW-52.

El personal que verifique los exámenes de ultrasonido deberá estar calificado también de acuerdo con el SNT-TC-1A.

El párrafo PW-53 contiene los requisitos para la soldadura de placas de prueba y para examinar estas mismas. Estos exámenes deben demostrar que la soldadura de las placas de prueba cumple con las mínimas propiedades mecánicas de las placas que fueron soldadas. Si las placas de prueba no cumplen con los requisitos en un 10% o menos, está permitido efectuar de nuevo pruebas como se describe en el inciso 53.10.

El párrafo PW-54 describe los requisitos para la prueba hidrostática y las reglas permisibles para la soldadura entre una parte a presión y una no sujeta a presión, efectuada después de la prueba hidrostática.

PARTE PR

Esta parte da los requisitos para calderas fabricadas por remachado. Debido al hecho de que la soldadura ha reemplazado al remachado en la fabricación de calderas, el Comité de Calderas y recipientes a presión decidió no continuar enviando nuevas reglas para la construcción por remachado después de la Edición del Código de 1971. Consecuentemente esta parte PR es solamente una página y recomienda que el Código del 1971 deberá ser usado donde los requisitos están expresos en su totalidad.

PARTE PWT

Esta parte, que es relativamente corta, da los requisitos para calderas de tubos de agua. La mayoría de los requisitos de construcción están contenidos en las partes PG y PW. Sin embargo, hay algunos requisitos especiales en esta parte que serán resaltados.

En el párrafo PWT-10, hay una tabla que puede usarse para determinar el espesor de tubos en lugar de calcularlos de acuerdo con los párrafos PG-27.2.1 o 27.2.2. Esta tabla puede ser usada para tubos que se expanden en domos y cabezales cuando la máxima temperatura media de la pared del tubo no exceda de 370°C (700°F). Esto es particularmente útil para determinar los espesores de la pared de tubos de banco generador y de las paredes del horno para calderas de menos de 127 kg/cm² (1800 lb/pulg²) de presión de diseño.

Otros requisitos en esta parte incluyen los métodos para fijar tubos a domos y cabezales, soldadura de cabezales del tipo caja, área de tapas a atezar, cerrojos para puertas de combustión, y tamaños de puertas de acceso y combustión.

PARTE PFT

Esta parte incluye los requisitos para calderas de tubos de humo. Como todo lo de la Sección I, se usa en conjunto con la Parte PG y Parte PW.

Hay gran número de calderas de tubos de humo fabricadas para usarse principalmente en sistemas de calefacción, suministro de vapor a procesos, y cargas pequeñas de potencia. Las hay generalmente fabricadas en presiones y tamaño estándar, y usan un relativo alto volumen de métodos en su línea de producción.

Debido a la marcada diferencia que hay en el diseño de una caldera de tubos de humo y una caldera de tubos de agua, hay muchas reglas de diseño y construcción en esta parte no incluidas en los PG y PW. Remarcaremos algunas de las reglas más significativas.

Los espejos son tapas planas y la cámara de combustión así como los tubos que contienen los gases de combustión están bajo presión externa. La unión de tapas y espejos a las envolventes están contenidos en el párrafo PFT-11. En los métodos de unión se incluyen el bridado, soldadura a tope, espejos con brida exterior o interior y soldadura de filete y espejos sin brida o ceja. En todos los casos los espejos son atezados por los tubos, por atezadores o por ambos.

La máxima presión permisible de trabajo para fluxes, o tubos centrales y los requisitos de espesor mínimo para tubos, se incluyen en el párrafo PFT-12 y tablas PFT-51.1.1 y 51.1.2. Estas tablas incluyen tubos de cobre para usarse con presiones hasta 17.5 Kg/cm² (250 Lb/pulg²); de acuerdo a la especificación SB-75, un material que no es usado en calderas de tubos de agua. Los métodos para fijar los tubos a espejos incluidos en 12.2 también

son diferentes a los usados normalmente en la construcción de calderas de tubos de agua.

Las cámaras de combustión están incluidas en el párrafo PFT-13 al PFT-21. Hay varios tipos diferentes de construcción existentes debido a diferentes métodos de diseño para presión externa. Estos varían con respecto al diámetro y longitud del horno, e incluye en PFT-16, del tipo de anillo reforzado en el PFT-17, el combinado circular liso y corrugado en el PFT-18, y el corrugado en el PFT-19.

Algunos diseños de calderas de tubos de humo usan atiezadores para la zona de tapas planas no atiezada por tubos. Los requisitos para superficies atiezadas se incluyen en el PFT-22 al PFT-38. La amplia variedad de diseños que afectan las áreas a ser atiezadas a usarse, requiere de una variedad de reglas y fórmulas. No se discutirá esto, pero de nuevo anotaremos que hay varias referencias anteriores que se dan en los requisitos de PG para superficie a ser atiezadas.

Los requisitos para la abertura entre la caldera y la válvula de seguridad están dados en el PFT-44. la tabla PFT-44 da las áreas mínimas requeridas para estas conexiones y se basan en la presión de operación y superficie de calefacción. Los requisitos de capacidad deben cumplir con el párrafo PG-67.

Ya que la mayoría de las calderas modernas de tubos de humo son ensambladas en taller, estas se manejarán como una unidad durante el embarque e instalación. PFT-46 contiene los métodos de soporte que también deben cumplir con los párrafos PG-21 y PG-55. estas reglas se basan en reducir los esfuerzos concentrados en los soportes a valores menores y seguros.

Los requisitos para cristales indicadores de nivel según PFT-47, tubería de alimentación según PFT-48 y tubería de purga según PFT-49, están diseñadas para asegurar una adecuada cobertura de agua para los fluxes, y que la inyección de agua de alimentación se localice en tal lugar, que no cause disturbios a la indicación de nivel del agua.

PARTE PFH

Esta parte es de una sola página y nos proporciona requisitos opcionales para los calentadores de agua cuando están localizados en el sistema de la tubería que esté bajo las reglas de la Sección I. La mayoría de los calentadores de agua están localizados fuera de la jurisdicción de la Sección I y están construidos bajo las reglas de la Sección VIII. Para el caso específico que las reglas de la Sección I gobiernen, se requiere que esta parte esté de acuerdo con las reglas de la Sección VIII, y con el ANSI B-31.1. para la máxima presión de trabajo permisible del lado de agua de alimentación del calentador. Los otros requisitos para la temperatura de diseño de los tubos, estampado, placas de nombre y datos de reportes.

PARTE PMB

Esta parte comprende los requisitos para calderas miniatura que no rebasen los siguientes valores:

- 40 cm (16 pulg.) diámetro interior de la envolvente.
- 2m² (20 ft²) de superficie de calefacción.
- 55.0 dm³ (5 ft³) de volumen total.
- 7 Kg/cm² (100 psig) de máxima presión de trabajo permisible.

No obstante que estas calderas están incluidas en la Sección I, debido al rango de presiones arriba de 1-(15) y no más allá de 7-(100) kg/cm² - man - (psig), son usadas principalmente para suministrar vapor a comercios especiales, industrias, para procesos de hospital. las reglas serán usadas en conjunto con la parte PG y están dirigidas para suministrar las provisiones necesarias de seguridad que puedan ser dirigidas de las PG debido al tamaño pequeño de estas calderas. estas reglas serán preferentes sobre las de la parte PG en caso de contradicciones.

APÉNDICE

El apéndice contiene información que para su entendimiento lo describe mejor el siguiente título:

"Explicación del Código conteniendo asuntos no mandatarios a menos que específicamente sean referidos por las reglas del Código".

En nuestras discusiones, nos referimos a alguna información que es mandatoria, como el uso de esfuerzos permisibles dados en las tablas PG-23.1 y PG-23.2 y las bases para establecer estos en A-150.

Otras partes de importancia del Apéndice incluyen lo siguiente:

- * Aprobación de materiales nuevos A-75 al A-80 inclusive.
- * Presión de trabajo máxima permisible para envolventes gruesas.
- * Gráficas de porosidad A-250.
- * Sistemas de control de calidad A-350.
- * Guías y formas para reporte de datos A-350.

TABLA PW-39
REQUISITOS OBLIGATORIOS PARA TRATAMIENTO TERMICO POSTERIOR A LA
SOLDADURA DE PARTES Y ACCESORIOS A PRESION

Material	Temperatura Mínima que Debe Mantenerse, °F	Tiempo Mínimo que Debe Mantenerse a la Temperatura Normal para Espesor de Soldadura (Normal)		
		Hasta 2 pulg.	Más de 2 pulg. hasta 5 pulg.	Más de 5 pulg.
P No. 1 Grupo No. 1, 2, 3	1100	1 h/pulg., 15 min mínimo	2 h más 15 min por cada pulgada adicional arriba de 2 pulg.	2 h más 15 min por cada pulgada adicional arriba de 2 pulg.

NOTAS:

- (1) El tratamiento térmico posterior a la soldadura no es obligatorio para los materiales No. P 1 bajo las condiciones siguientes:
 - (a) para soldaduras circunferenciales en tubo de cádula, tubos flus, o cabezales cuando el tubo, tubos flus o cabezales cumplen con un espesor de pared nominal de 1/4 pulg. o menos en la junta.
 - (b) para soldaduras de filete empleadas en bridas para soldar deslizantes o de caja y en accesorios que están de acuerdo con las reglas de PW-41, cuando se satisfacen las siguientes condiciones:
 - (1) un espesor de garganta de soldadura de filete de 1/4 pulg. o menos, independientemente del espesor de metal base
 - (2) un precalentamiento mínimo de 200°F cuando el espesor de una parte a presión excede de 1/4 pulg. en la soldadura a 1/4 pulg.
 - (c) para soldaduras de filete que unen partes a presión con partes a presión que tienen un espesor de garganta de 1/4 pulg. o menos, siempre y cuando se aplique un precalentamiento a una temperatura mínima de 200°F cuando el espesor de la parte a presión excede de 1/4 pulg.
 - (d) para soldaduras empleadas para uniones de partes a presión y con pesadores para unión del aislamiento térmico absorbente de calor extendida con los tubos flus y partes a presión.
 - (e) para tubos flus o registros de hombre, registros de inspección o accesorios, retenedores de presión, que se aseguran por medios físicos (rosca, unión por rodillos, construcción saliente, roscas de máquina, etc.) y soldados a sello, cuando la soldadura de sello tenga un espesor de garganta de 1/4 pulg. o menos.
 - (f) para birlos soldados a partes a presión que no están incluidos en (d) anterior, siempre y cuando se aplique un precalentamiento a una temperatura mínima de 200°F cuando el espesor de la parte a presión excede de 1/4 pulg.
 - (g) para la unión soldada de tubo a extremo de tubos de material No. P 1, de Grupo Nos. 1 y 2 en las calderas de tubos de acuerdo con los esquemas (f) y (g) de la Fig. PFT-12.1, si la profundidad de la ranura de soldadura ó de la preparación no excede de 0.375 pulg., con la condición de que se aplique un precalentamiento mínimo de 200°F cuando el espesor del extremo de tubos excede de 1/4 pulg.
- (2) Cuando es impráctico hacer el tratamiento térmico posterior a la soldadura a la temperatura especificada en esta Tabla, es permisible aplicar el tratamiento térmico posterior a la soldadura a temperaturas más bajas, por períodos de tiempo más largos, de acuerdo con la Tabla PW-39.1.
- (3) Para los materiales No. P 1, Grupo 1, el requisito de tratamiento térmico posterior a la soldadura de PWT 11.2 para tubos flus soldados a múltiples o cabezales tubulares no es obligatorio cuando se satisfacen todas las condiciones siguientes:
 - (a) los tubos flus no exceden de 2 pulg. D. E.
 - (b) el cabezal no excede de 8 pulg. del tamaño nominal de tubo
 - (c) el espesor del cabezal no excede de 1/4 pulg.
 - (d) se aplica un precalentamiento mínimo de 200°F

DECLARACION DE LA POLITICA SOBRE EL USO DE LOS SIMBOLOS Y DE AUTORIZACION DEL CODIGO PARA PUBLICIDAD

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ha establecido procedimientos para autorizar a organizaciones calificadas para ejecutar varias actividades de acuerdo con los requisitos del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión. La Sociedad intenta proveer reconocimiento a las organizaciones así autorizadas. Una organización que posea autorización para efectuar varias actividades de acuerdo con los requisitos del Código puede declarar esta capacidad en su literatura publicitaria.

A las organizaciones que están autorizadas para usar Símbolos de Código para el marcado de partidas o construcciones que se han construido e inspeccionado en cumplimiento del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión se les expiden "Certificados de Autorización". La Sociedad se propone mantener la reputación de los Símbolos de Código para el marcado de partidas o construcciones que se han construido e inspeccionado en cumplimiento del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión se les expiden "Certificados de Autorización". La Sociedad se propone mantener la reputación de los Símbolos de Código para el beneficio de los usuarios, las jurisdicciones que los hacen cumplir y los poseedores de los símbolos que cumplen con todos los requisitos.

Con base en estos objetivos, se ha establecido la política que sigue respecto al uso en publicidad, para facsímiles de los símbolos, los Certificados de Autorización y referencia

a construcción de Código. La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos no "aprueba", "certifica", "clasifica", o "respalda" ninguna partida, construcción o actividad y no deberá haber declaraciones o implicaciones que pudieran indicarlo así. Una organización que posee un Símbolo de Código [y/o] un Certificado de Autorización puede declarar en literatura publicitaria que "se construyen (producen o ejecutan) partidas, construcciones o actividades de acuerdo con los requisitos del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión", o que se conducen actividades de acuerdo con los requisitos del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, o que "reúnen los requisitos del Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión".

El Símbolo de ASME se deberá usar solamente para estampado y para placas de nombre como estipula específicamente en el Código. Sin embargo, pueden usarse los facsímiles con el propósito de alentar el uso de tal construcción. Puede ser tal uso por una Asociación o por una sociedad o por un poseedor de un Símbolo de Código que puede también usar el facsímil en publicidad para mostrar que llevarán el símbolo partidas claramente especificadas. Se permite el uso general solamente cuando todas las partidas del fabricante se construyen de acuerdo con las reglas.

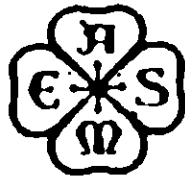
DECLARACION DE POLITICAS SOBRE EL USO DE MARCADO ASME PARA IDENTIFICAR PARTIDAS FABRICADAS

El Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión estipula reglas para la construcción de calderas, recipientes a presión y componentes nucleares. Esto incluye requisitos para materiales, diseño, fabricación, prueba(s), inspección y estampado. Las partidas constituidas de acuerdo con todas las reglas aplicables del Código se identifican con el Sello de Símbolo de Código oficial de la Sección que gobierna el Código.

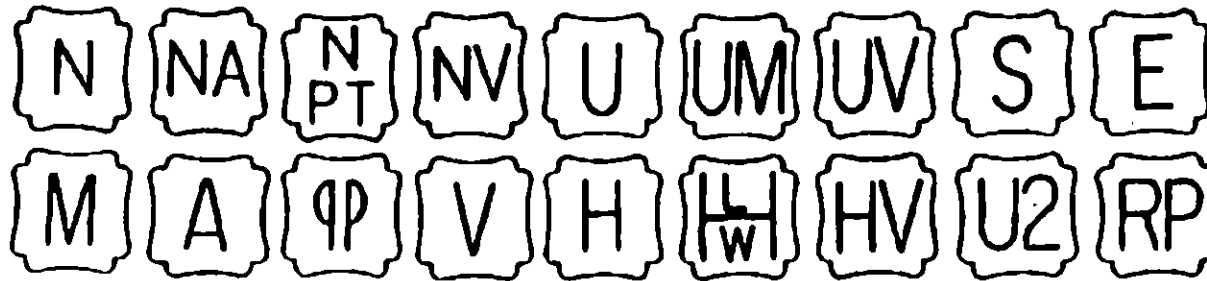
Las Marcas tales como "ASME" y "Norma ASME", o cualquier otra marca que incluya "ASME" o los venos Símbolos de Código no deberán usarse en ninguna partida

que no esté constituida de acuerdo con todos los requisitos aplicables del Código.

No se describirán partidas en las Formas de Reporte de Datos ASME, ni en formas que hagan referencia a ASME, que tiendan a implicar que se han reunido todos los requisitos del Código cuando, de hecho, no se han cumplido los requisitos. Las Formas de Reporte de Datos que cubran partidas que no cumplan completamente con los requisitos (del Código) ASME no deberán hacer referencia a ASME o deberán identificar claramente todas las excepciones a los requisitos (del Código) ASME.



Marca colectiva de los miembros de ASME



Los símbolos anteriores de ASME están registrados en la Oficina de Patentes de EE. UU.
"ASME" es la marca registrada de "The American Society of Mechanical Engineers"

Propiedad Literaria en 1989 por
THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
Todos los Derechos Reservados

Ninguna parte de este documento puede reproducirse en forma alguna, en un sistema electrónico de reproducción o de algún otro modo, sin el previo permiso por escrito del editor.

Nº de Tarjeta de Catálogo de Biblioteca del Congreso para la Impresión hecha en EE. UU.: 56-3934

Adoptado por el Consejo de la ASME en 1914.

Revisado en 1940, 1941, 1943, 1946, 1949, 1952, 1953, 1956, 1959, 1962, 1965, 1968, 1971, 1974, 1977, 1980, 1983, 1986, 1989

A-361
CODIGOS, NORMAS Y ESPECIFICACIONES A LAS QUE SE HACE REFEREN-
CIA EN EL TEXTO

Normas Nacionales Americanas

B1.20.1 - 1983	Roscas de Tubo, Propósito General, Pulgada (s).
B16.1 - 1975	Accesorios para Drenaje, Roscados, de Hierro Fundido
B16.3 - 1977	Accesorios Roscados de Hierro Maleable, Clase 150
B16.4 - 1977	Accesorios Roscados de Hierro Fundido, Clases 125 y 250
B16.5 - 1981	Bridas para Tubo y Accesorios Bridados, Aleación de Acero al Níquel, y Otras Aleaciones Especiales
B16.9 - 1978	Accesorios para Soldadura a Tope, de Acero Dulce, Hechos en Fábrica
B16.11 - 1973	Accesorios de Acero Forjado, para Soldadura de Caja y Roscados
B16.15 - 1978	Accesorios Roscados de Bronce Fundido, Clases 125 y 250
B16.20 - 1973	Empaques y Ranuras de Juntas de Anillo para Bridas de Acero para Tubos
B16.24 - 1979	Bridas y Accesorios Bridados, de Bronce, para Tubos, Clases 150 y 300
B16.25 - 1979	Extremos para Soldadura a Tope
B16.28 - 1978	Codos y Retornos de Radio Corto de Acero Dulce para Soldadura a Tope [Nota (1)]
B16.34 - 1981	Válvulas, Extremo Bridado y para Soldadura a Tope - Acero, Aleación de Níquel y Otras Aleaciones Especiales
B16.42 - 1979	Bridas y Accesorios Bridados para Tubos, de Hierro Dúctil, Clases 150 y 300
B31.1 - 1983	Tubería de Presión (W84) [Nota (2)]

Especificaciones ASTM

A 126-73(R1979)	Especificación para Fundiciones de Hierro Gris, para Válvulas, Bridas y Accesorios para Tubos
A 234-75	Especificación para Accesorios de Tubería, de Acero Dulce al Carbono y de Acero de Aleación para Temperaturas Moderadas y Elevadas
B 139-52	Especificación para Varilla, Barra y Perfiles, de Bronce Manganeseo

Metodos de Prueba Estándar de ASTM

E 8-80	Métodos de Pruebas de Tensión de Materiales Metálicos
E 125-63(R1980)	Fotografías de Referencia para Indicaciones de Partícula Magnética en Fundiciones Ferrosas

E 186-73	Radiografías de Referencia para Fundiciones de Acero de Pared Gruesa (2 a 4-½ pulg)
E 280-72	Radiografías de Referencia para Fundiciones de Acero de Pared Gruesa (4-½ a 12 pulg.)
E 446-72	Radiografías de Referencia para Fundiciones de Acero hasta de 2 pulg. de Espesor

Código de Pruebas de Comportamiento de ASME

PTC-25.3 - 1976 Válvulas de Seguridad y de Alivio

Especificación ASNT

SNT-TC-1A(1980) Práctica Recomendada para Calificación y Certificación de Personal para las Pruebas No Destructivas

NOTA GENERAL.: La fecha de expedición mostrada inmediatamente en seguida del guión después del número de la norma (e. g., B1.20.1 - 1983) es la fecha efectiva de expedición (edición) de la norma.

NOTAS:

- (1) Nota precautoria: Véase la norma para provisiones especiales respecto a regímenes de presión de operación a la temperatura.
- (2) La designación que está entre paréntesis indica la Addenda que deberá usarse.

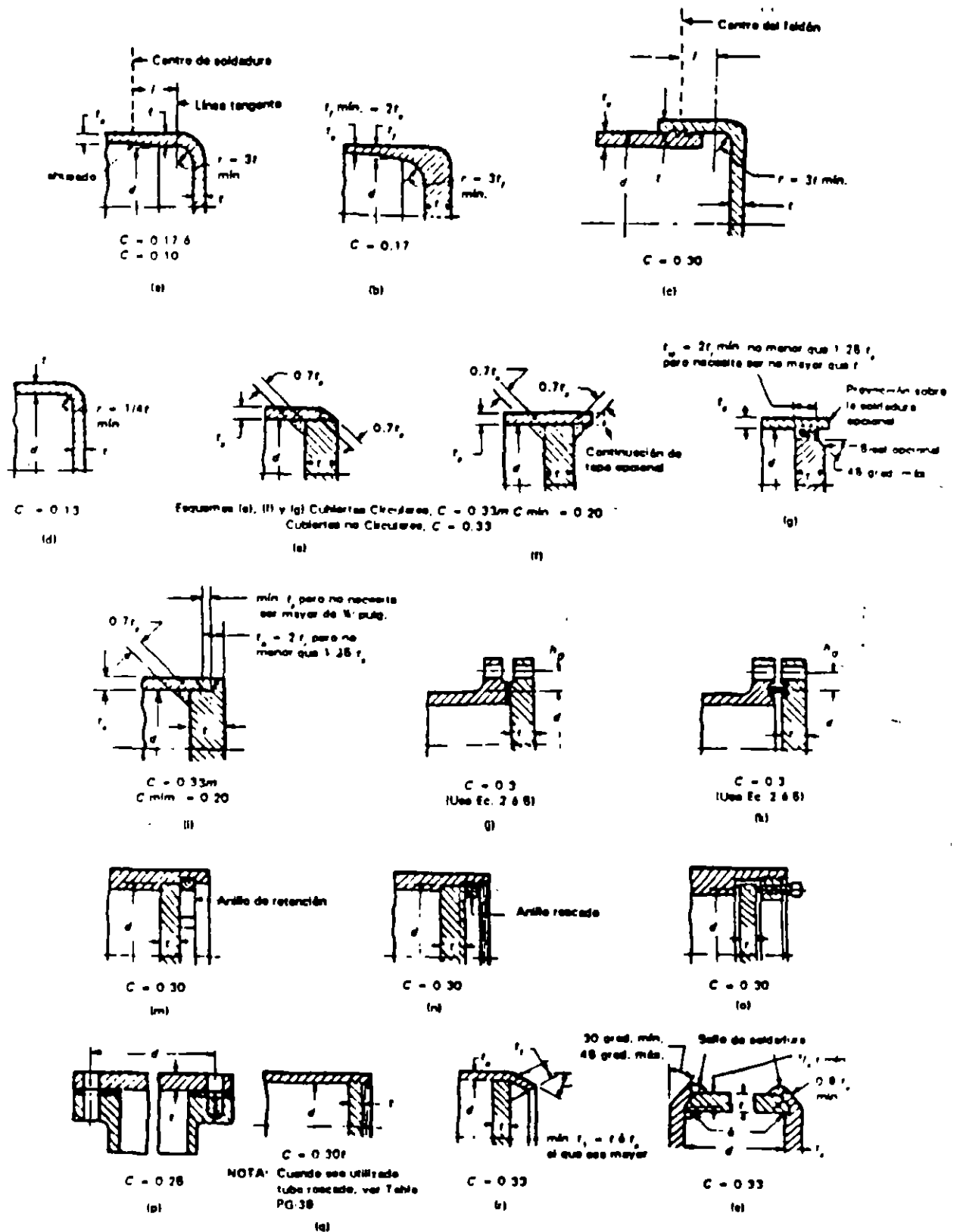
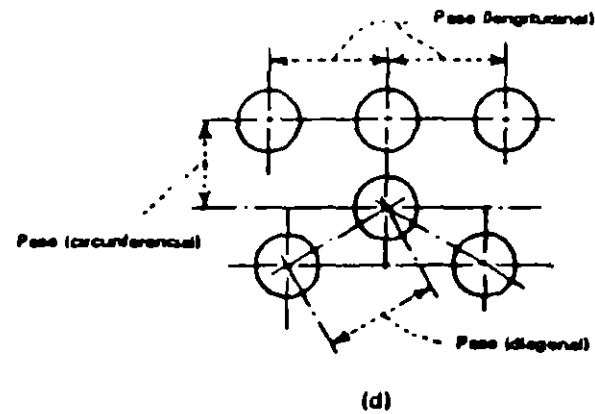
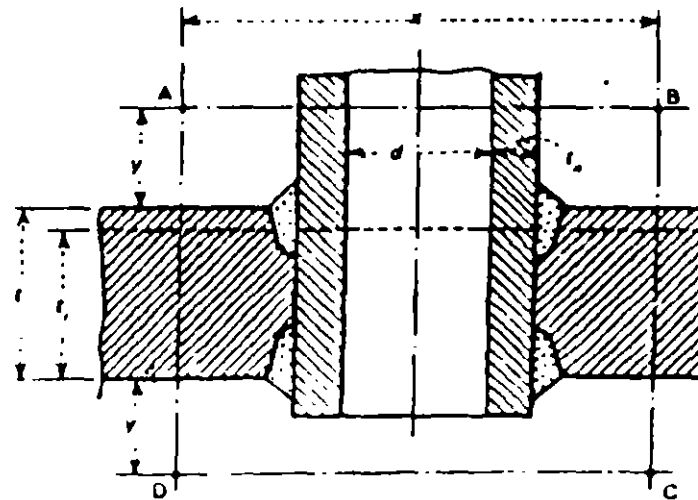
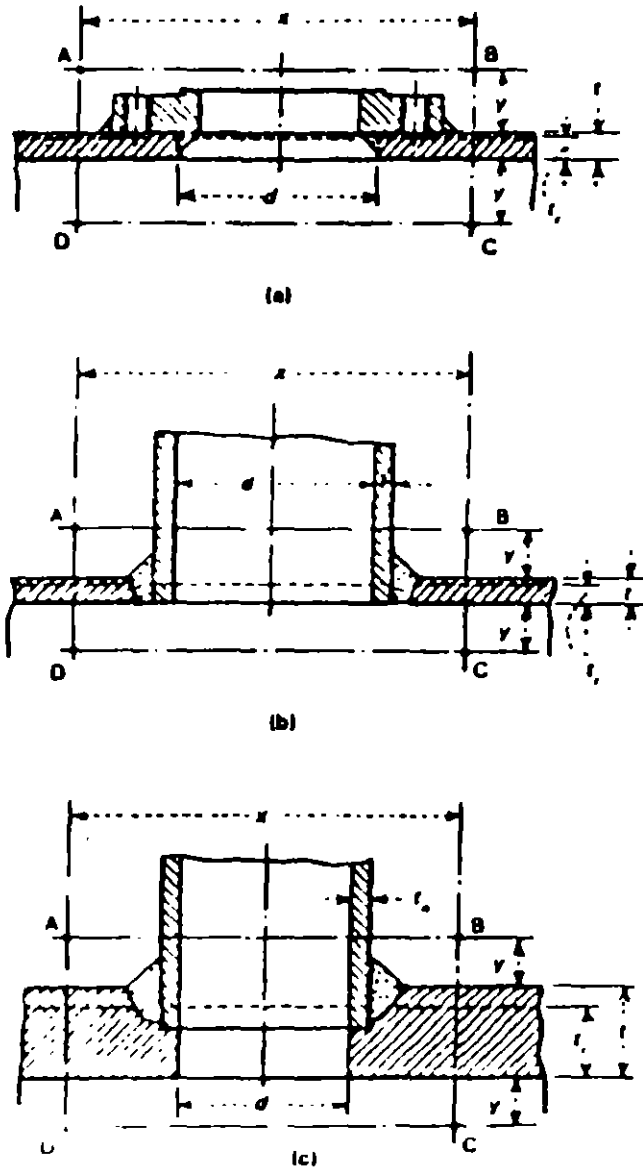
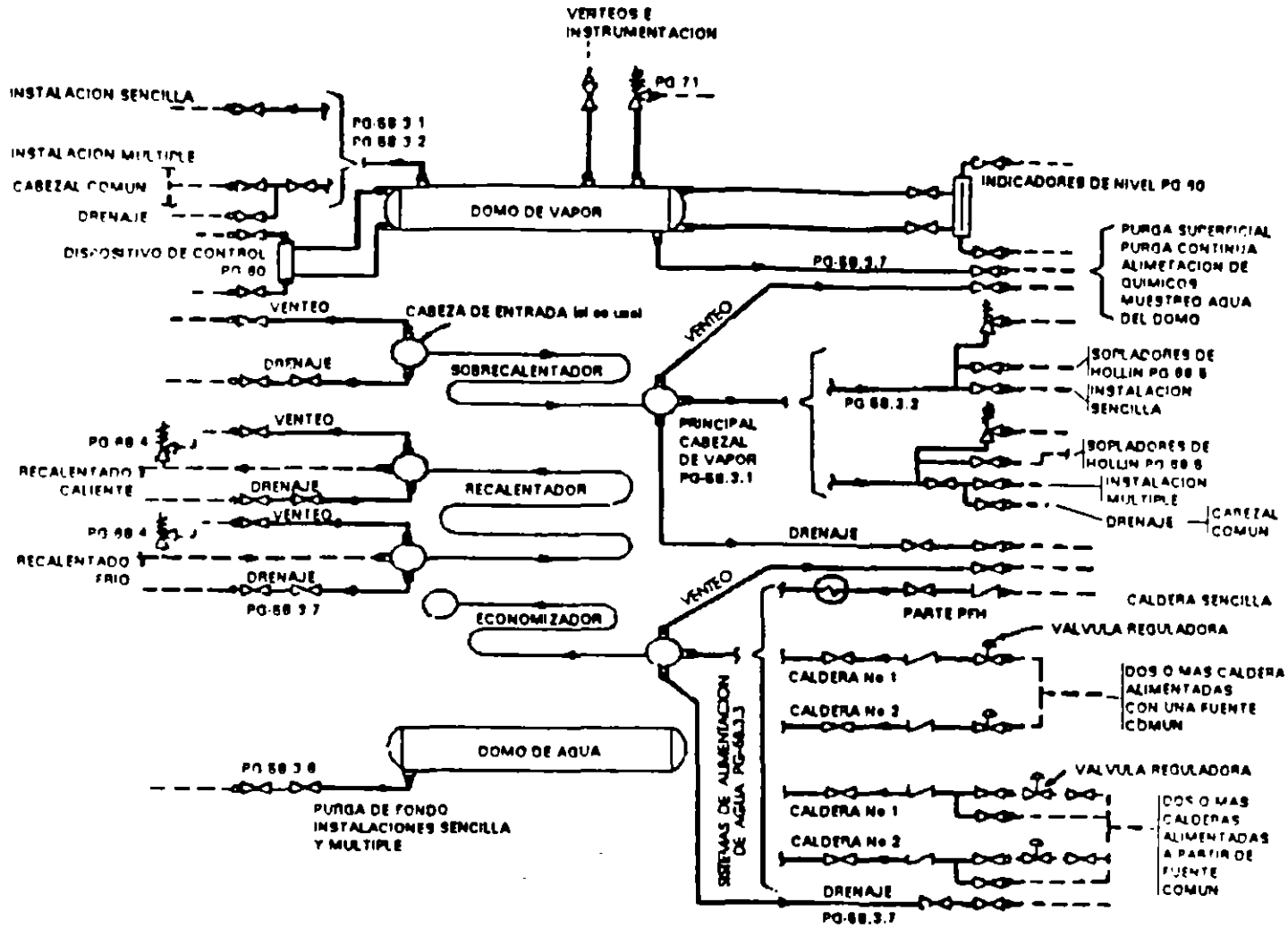


FIG. PG-31 ALGUNOS TIPOS ACEPTABLES DE TAPAS Y CUBIERTAS PLANAS SIN A TIRANTAR
Las ilustraciones mostradas arriba son solamente diagramáticas.
Serán aceptables otros diseños que satisfagan los requisitos de PG-31



El rectángulo ABCD representa límites de esfuerzo.
 X = El mayor de $2d$ ó $d + 2(t + t_1)$ pero en ningún caso mayor que el paso entre las aberturas.
 Y = El menor de $2\frac{1}{2}t$ ó $2\frac{1}{2}t_1$.

FIG. PG-36 LIMITES DE REFU PARA ABERTURAS



- JURISDICCION ADMINISTRATIVA Y RESPONSABILIDAD TECNICA
 Caldera propiamente dicha - El Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión (ASME BPVC) tiene total jurisdicción administrativa y responsabilidad técnica (Refiérase al Preámbulo de la Sección I)
- — Tubería y Junta Externa a la Caldera - El ASME BPVC tiene total jurisdicción administrativa (certificación obligatoria por el estampado de Símbolo de Código, Formas de Datos ASME e Inspección Autorizada) de la Tubería y Junta Externa de la Caldera. Se le ha asignado la responsabilidad técnica al Comité de Sección ASME B31.1 (Refiérase al Preámbulo de la Sección I, párrafos quinto, sexto y séptimo; y al Alcance de ANSI/ASME B31.1, párrafo 100.1 2.A.). En la Sección I, PG-58.3 se hace referencia a las Ediciones y Adenda aplicables en ANSI/ASME B31.1.
- — No de la Tubería y Junta Externa a la Caldera - No es de la jurisdicción de la Sección I (Véase el Código ANSI/ASME B 31).

FIG. PG-58.3.1 LIMITES JURISDICCIONALES DEL CODIGO PARA TUBERIA - CALDERAS DEL TIPO DOMO

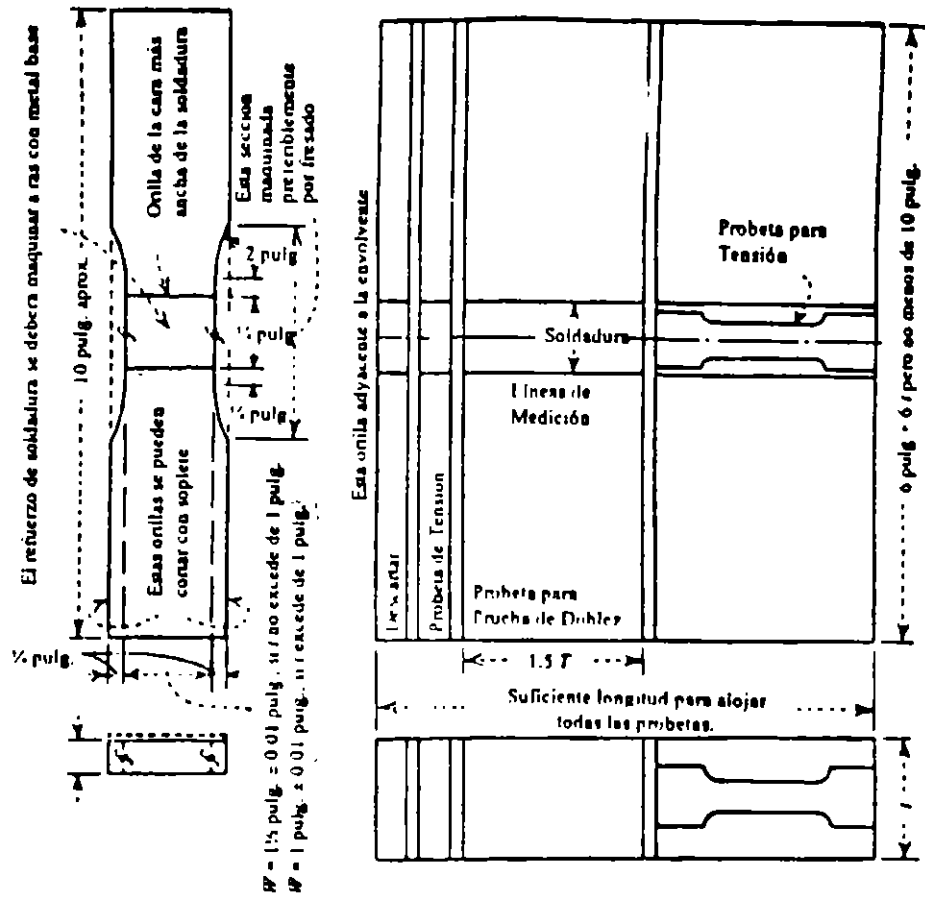


FIG. PW-53.1 PROBETAS DE PRUEBA PARA PLACAS SOLDADAS LONGITUDINAMENTE

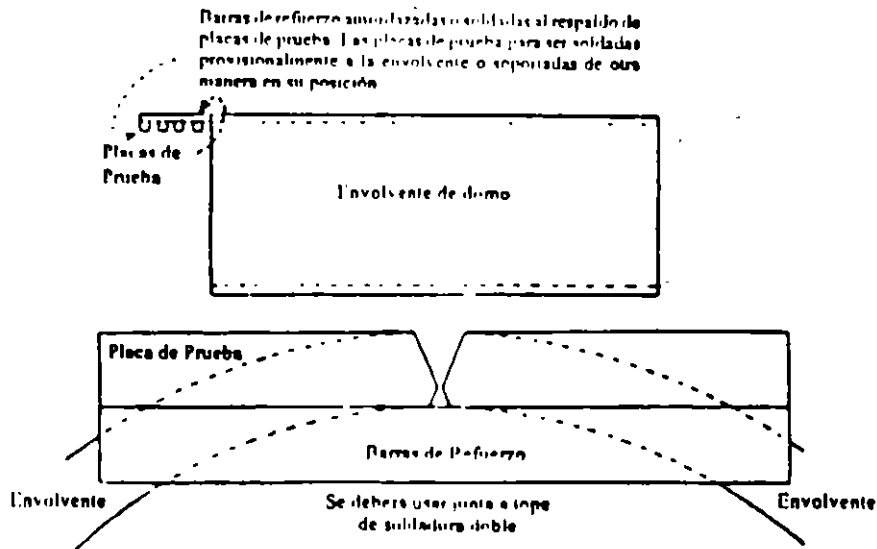


FIG. PW-53.2 METODO DE FORMAR PLACAS DE PRUEBA LONGITUDINALES

De PW-5 a PW-9.3

SECCIONI-CALD

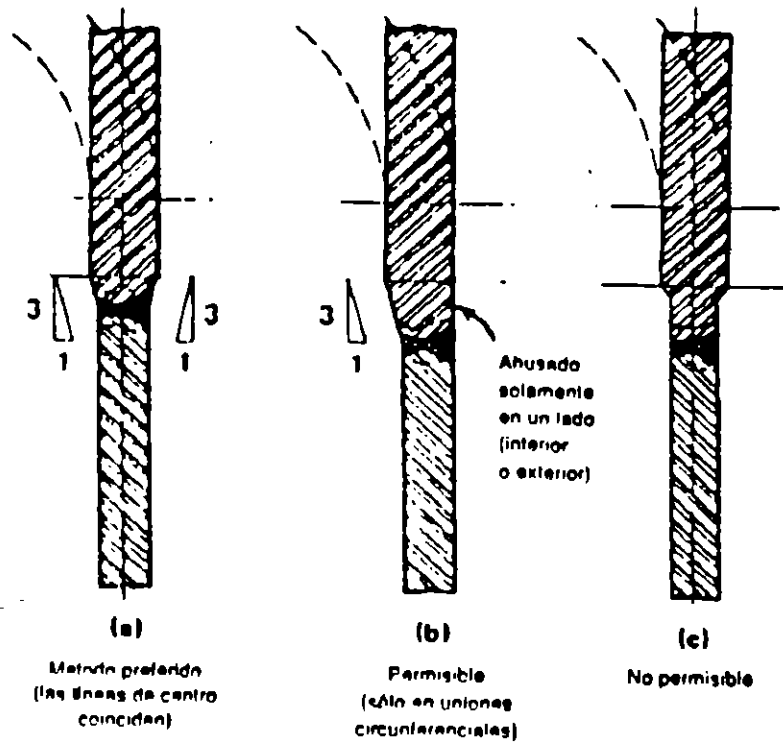


FIG. PW-9.1 SOLDADURA A TOPE DE PLACAS DE ESPESORES DIFERENTES

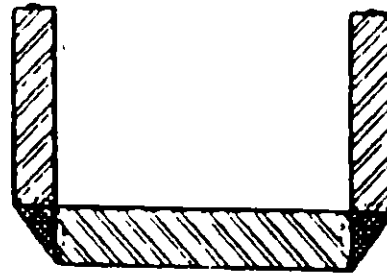


FIG. PW-9.2 EJEMPLO DE SOLDADURA DE ESQUINA SOMETIDA A ESFUERZO FLEXIONANTE

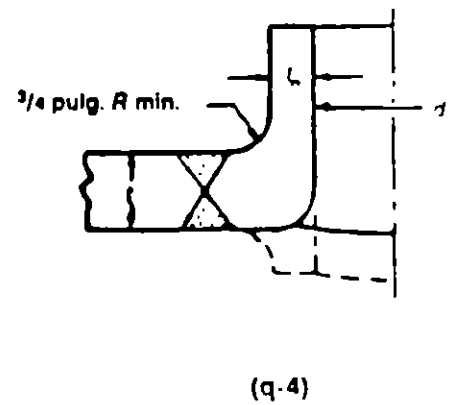
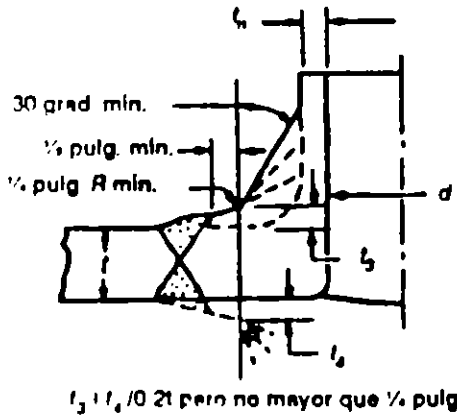
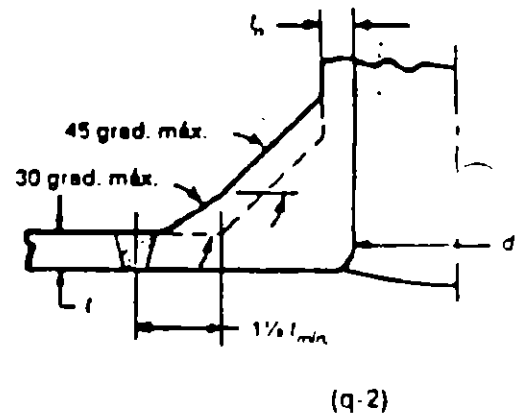
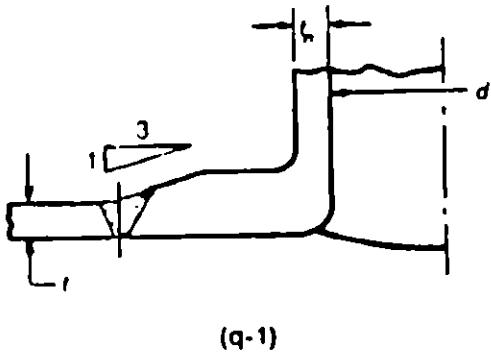
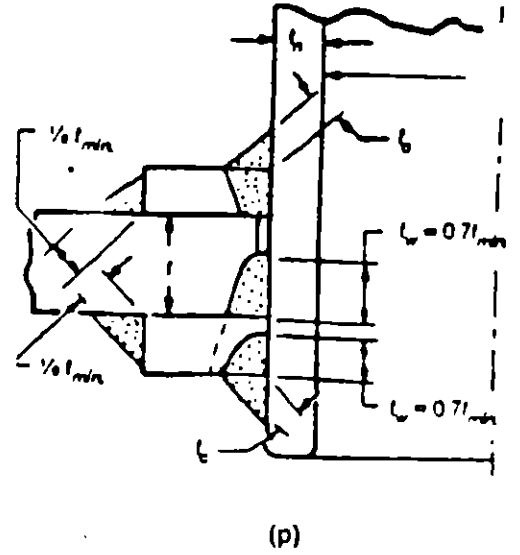
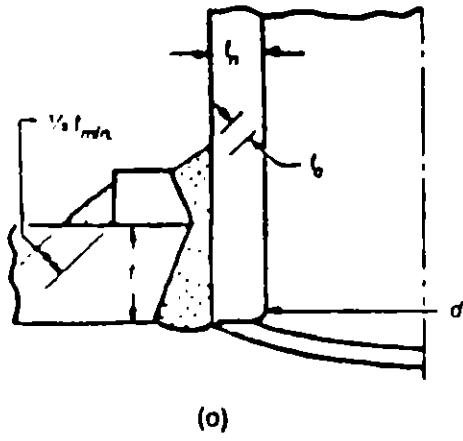


FIG. PW-16.1 ALGUNOS TIPOS ACEPTABLES DE BOQUILLAS Y OTRAS CONEXIONES SOLDADAS A ENVOLVENTES, DOMOS Y CABEZALES (Cont.)

Form P-3 (Back)

8(a) Superheater Headers				Heads or Ends			8(b) Superheater Tubes			
No.	Size and shape	Material spec. no.	Thickness in.	Shape	Thickness in.	Material spec. no.	Hydro. test. psi.	Diameter in.	Thickness in.	Material spec. no.
(1)	(2)	(3)	(4) or (5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)

10(a) Other Parts (1)				10(b) Tubes for Other Parts			
No.	Material spec. no.	Thickness in.	Shape	No.	Material spec. no.	Thickness in.	Shape
1							
2							
3							

11 Openings (1) Steam (2) No. size and type of nozzle or outlet (3) Safety Valve (4) No., size, and type of nozzle or outlet
 (5) Blowoff (6) No., size, and type of nozzle or outlet (7) Feed (8) No., size, type, and location of connection

12	Maximum Allowable Working Pressure	Code For and/or Formula on which AWP is Based	Shop hydro test psi	Heating Surface sq. ft.	13 Field hydro-test psi
a. Boiler					
b. Waterwall					
c. Economizer					
d. Superheater					
e. Other parts					

Heating surface to be stamped on drum heads. This heating surface not to be used for determining minimum safety valve capacity.

CERTIFICATE OF COMPLIANCE

We certify the statements in this Data Report to be correct.
 Date (1) Signed (2) by (3) (Authorized Representative)
 Our Certificate of Authorization No. (4) to use the (A) or (B) (5) Symbol expires (6) 19__

(7) CERTIFICATE OF SHOP INSPECTION

BOILER MADE BY _____ at _____
 I, the undersigned, holding a valid commission issued by the National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors and/or the State or Province of (1) _____ and employed by _____ of _____ have inspected parts of this boiler referred to as data items (2) _____ and have examined Manufacturer's Partial Data Reports for items (3) _____ and state that, to the best of my knowledge and belief, the Manufacturer has constructed this boiler in accordance with the applicable sections of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE
 By signing this certificate neither the inspector nor his employer makes any warranty, expressed or implied, concerning the boiler described in this Manufacturer's Data Report. Furthermore, neither the inspector nor his employer shall be liable in any manner for any personal injury or property damage or loss of any kind arising from or connected with this inspection.
 Date _____
 Inspector _____ Commission _____ (4) National Board, State, Province and Co

CERTIFICATE OF COMPLIANCE

We certify that the field assembly of all parts of this boiler conforms with the requirements of SECTION I of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE
 Date (1) Signed (2) by (3) (Authorized Representative)
 Our Certificate of Authorization No. (4) to use the (A) or (B) (5) Symbol expires (6) 19__

(7) CERTIFICATE OF FIELD ASSEMBLY INSPECTION

I, the undersigned, holding a valid commission issued by the National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors and/or the State or Province of (1) _____ and employed by _____ of _____ have compared the statements in this Manufacturer's Data Report with the described boiler and state that the parts referred to as data items (2) _____ not included in the Certificate of Shop Inspection have been inspected by me and that to the best of my knowledge and belief the Manufacturer and/or the assembler has constructed and assembled this boiler in accordance with the applicable sections of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE. The described boiler was inspected and subjected to a hydrostatic test of _____ psi
 By signing this certificate neither the inspector nor his employer makes any warranty, expressed or implied, concerning the boiler described in this Manufacturer's Data Report. Furthermore, neither the inspector nor his employer shall be liable in any manner for any personal injury or property damage or loss of any kind arising from or connected with this inspection.
 Date _____
 Inspector _____ Commission _____ (4) National Board, State, Province and Co

PG M P-3 MANUFACTURERS' DATA REPORT FOR WATERTUBE BOILERS, SUPERHEATERS, WATERWALLS, AND ECONOMIZERS

As Required by the Provisions of the ASME Code Rules

1 Manufactured by (Name and address of manufacturer)
2 Manufactured for (Name and address of purchaser)
3 Location of installation (Name and address)
4 Unit identification (Combo's boiler, superheater, waterwall economizer etc.) ID Nos. (Mfrs. Serial No.) (CRNs) (Drawing No.) (Net Brd No.) (Year Built)
5 The chemical and physical properties of all parts meet the requirements of material specifications of the ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE
Remarks: Manufacturers' Partial Data Reports properly identified and signed by Commissioned Inspectors are attached for the following items:

6(a) Drums

Table with columns: No, Inside diameter, Inside Length, Shell plates (Mat'l Spec No., Grade, Thickness, Inside radius), Tubesheets (Thickness, Inside radius), Tube hole ligament efficiency (Longitudinal, Circumferential)

Table with columns: No, Longitudinal joints (No & type, Eff. clency), Circum joints (No & type, Eff. clency), Heads (Mat'l. Spec. No., Grade, Thickness, Type, Radius of dish, Manholes No. Size), Hydro static test p.

*Indicates if (1) Seamless; (2) Fusion welded.

**Indicate if (1) Flat; (2) Dished; (3) Ellipsoidal; (4) Hemispherical

6(b) Roller Tubes

Table with columns: Diameter, Thickness, Mat'l Spec No., Grade

6(c) Headers No. (1) (2) (3) or (4) (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

Heads or Ends (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

6(d) Staybolts (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

Pitch in Net Area in Max. A W P ps (Supported by one bolt)

6(e) Mud Drum (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

7(a) Waterwall Headers

Table with columns: No, Size and shape, Material spec. no., Thickness, Shape, Heads or Ends (Thickness, Material spec no.), Hydro test, psi, Diameter, Thickness, Material Spec no.

8(a) Economizer Headers

Table with columns: No, Size and shape, Material spec. no., Thickness, Shape, Heads or Ends (Thickness, Material spec no.), Hydro test, psi, Diameter, Thickness, Material Spec no.

Nondestructive examination of shop fabricated components

Components	Required by ASME code Section I	Additional NDE required per company standards
Drums		
A. Drum Plate		UT on 9" Grid
B. Longitudinal Weld Seams Circumferential Weld Seams	RT 100%, visual	MT 100% inside and outside surface of weld
C. Nozzle and Stub Attachment Weld		
1. Under 6 5/8" O.D.	visual	UT 10% minimum MT 100% outside
2. 6 5/8" O.D. up to 12 3/4" O.D.	visual	UT or RT 10% and MT 100% outside
3. 12 3/4" O.D. and Larger Nozzles	visual	UT or RT 100% and MT 100% outside
4. Downcomer connections to drum	visual	UT and RT 100% and MT finished surfaces of all welds
D. Surfaces exposed by openings for 6 5/8" diameter and larger nozzles or stubs.	visual	100% MT
Headers downcomers and piping		
A. Circumferential Seams		
1. Welds not in contact with furnace gases.		
a. Containing steam. Header over 16" O.D. regardless of thickness or over 1 5/8" thick regardless of O.D.	RT 100%, visual	MT 100% outside
b. Containing water. Header over 10-3/4" O.D. regardless of thickness or over 1 1/8" thick regardless of O.D.	RT 100%, visual	MT 100% outside
2. Weld in contact with furnace gases.		
a. Header over 6 5/8" O.D. regardless of thickness or over 3/4" thick regardless of O.D.	RT 100%, visual	MT 100% outside
3. Header socket welds		
a. Carbon steel thru croloy 1/2	visual	MT 10% outside
b. Croloy 1-1/4 and higher alloys	visual	MT 25% outside.
4. Nozzle welds to headers		
a. Under 6 5/8" O.D.	visual	MT 100% outside
b. 6 5/8" O.D. up to 12-3/4" O.D.	visual	UT or RT 10% and MT 100% outside
c. 12 3/4" O.D. and over	visual	UT or RT 100% and MT 100% outside
5. Attachment of header end plugs and spun header ends	visual	MT 100% outside
6. Attachment of hollow end plugs using full penetration welds	visual	RT 100% and MT 100% outside
7. Flat header end plate welds	visual	UT or RT 100%
8. Base Material for flat header end plates	visual	UT
B. Surfaces exposed by openings for 6 5/8" diameter and larger nozzles or stubs	visual	100% MT
C. Handhole fittings and radiograph plug seal welds	visual	MT 100% Root Pass and Final Weld
Superheater, reheater and economizer		
A. Superheater and Reheater Tubing	UT or Hydro	UT 100%
B. Electric Resistance Butt Welds	visual	Destructive bend test of weld samples (minimum 2 per butt)
C. Flang Butt Welds	visual	RT 2%
D. Shop hydrostatic testing of Superheater, Reheater and Economizer Sections		100%
Furnace walls and screens		
A. Butt Welds	visual	100% Fluoroscopy or RT 10%

Radiography (RT), Ultrasonics (UT), Magnetic Particle (MT).

1990 INCIDENT REPORT

INITIAL PART FAILURE	CAUSES							TYPE OF FAILURES							NUMBER OF		
	Low Water Cutoff	Faulty Design, Fabrication or Installation	Corrosion or Erosion	Operator Error or Poor Maintenance	Burner Failure	Pressure Control Failure	Other	Burned or Overheated	Collapsed Inward	Combination Explosion	Cracked	Torn Assureds (rupture)	Leakage	Other	Accidents	Injuries	
POWER BOILERS																	
Tube	30	1	52	29	10	4	39	41	0	7	30	14	49	5	181	2	
Shell	41	0	2	7	1	1	12	3	0	2	29	18	20	11	46	4	
Drum	3	0	0	0	0	2	3	2	0	0	2	0	0	2	7	0	
Furnace	6	2	3	4	16	0	62	11	2	0	21	6	4	6	62	18	
Tube Sheet	24	0	2	6	8	0	108	1	0	11	84	2	2	12	108	7	
Header	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	2	0	
Piping	0	0	1	0	2	0	5	0	1	0	1	5	1	0	8	0	
Safety Valves	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1	1	4	6	0	
Miscellaneous	107	2	5	18	9	7	130	16	1	19	24	7	3	183	269	9	
															Subtotal	689	41
STEAM AND HOT WATER STEEL HEATING BOILERS AND FIRED HOT WATER STORAGE TANKS																	
Tube	59	0	31	21	1	0	41	33	0	3	29	43	54	24	131	1	
Shell	41	3	1	7	0	2	20	23	0	12	0	5	19	20	72	6	
Drum	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	2	3	0	
Furnace	11	4	6	4	3	0	4	5	0	0	9	6	0	12	32	42	
Tube Sheet	16	1	13	5	1	0	21	21	0	1	19	4	8	9	57	3	
Header	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Piping	0	0	5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	7	0	
Safety Valves	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3	0	
Miscellaneous	193	1	24	2	14	5	28	3	0	2	6	4	0	240	251	3	
															Subtotal	557	55
CAST IRON BOILERS																	
Sections	304	22	30	72	29	11	243	28	6	8	669	37	18	9	724	4	
Tr Rods	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Flanges	0	4	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	2	6	0	
Piping	0	1	2	0	0	0	7	0	0	0	0	6	0	4	10	0	
Safety Valves	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
Miscellaneous	281	3	18	6	11	15	60	5	2	0	2	3	32	341	387	0	
															Subtotal	1129	4
PRESSURE VESSELS																	
Shell	0	2	140	16	0	7	37	0	6	8	171	4	31	36	246	7	
Head	0	8	39	0	0	0	22	0	9	4	24	0	10	23	60	0	
Attachments	0	1	0	24	0	0	5	0	0	0	30	0	0	6	31	0	
Piping	0	0	26	5	0	0	7	0	0	0	19	0	0	19	38	1	
Safety Valves	0	0	0	0	0	0	11	0	4	0	1	0	2	3	10	0	
Miscellaneous	0	7	12	9	0	9	96	0	8	3	16	3	1	104	121	4	
															Subtotal	516	13
															Totals	2,976	103

This report was compiled from data submitted by National Board jurisdictional authorities and authorized inspectors and insurance agencies as of March 1, 1991. It also includes material submitted from several insurance

EFICIENCIA EN CALDERAS

Mejoramiento Energético Integral.

Alberto Plauchú L.
Ingeniero Consultor

Resumen.

En los proyectos de demostración y diagnósticos energéticos realizados a la fecha destacan los generadores de vapor como equipos de alta intensidad en consumo energético y de alto potencial de ahorros en energías primaria y eléctrica, así como de reducción de emisiones nocivas al medio ambiente y de ahorro en el consumo de agua.

Esto es más cierto en las instalaciones de generación de vapor de industrias como la química, papeleras ó la azucarera en que la casi totalidad de la oferta de energía es generada a partir de instalaciones térmicas / termoeléctricas cuya fuente principal de transformación son las calderas.

Esta presentación se orienta a generadores, plantas y sistemas de distribución de vapor de capacidades y condiciones usuales en la industria. Se repasan brevemente algunos principios termodinámicos de operación conceptual del generador de vapor y de combustión, y se analizan las opciones que pueden tomarse para mejorar su comportamiento energético.

FUNDAMENTOS DE ADMINISTRACIÓN DE CALDERAS Y SISTEMAS.

Balance y Pérdidas de Energía.

El propósito de administrar eficientemente una planta de vapor es obtener el máximo de energía disponible de un combustible y es esencial comprender cómo trabaja la energía en los sistemas que la integran y cuantificarla, esto último expresado en términos del poder calorífico superior (PCS).

Poder Calorífico Superior.

"Es el calor total obtenido en la combustión de la unidad de masa de un combustible con temperatura inicial de 15° C (60° F) cuyos productos de la combustión son enfriados a (15° C) ó 60° F antes de que el calor liberado sea medido", representa la cantidad total de energía al proceso de combustión en el horno de una caldera y lo expresamos en KCAL o BTU. Una Caloría se define como "la cantidad de calor requerido para elevar en 1°C la temperatura de un kilogramo de agua a 4°C (39° F)."

Eficiencia.

La energía que ingresa al proceso es el punto de arranque para conocer su eficiencia. La eficiencia de una caldera es el porcentaje del poder calorífico superior del combustible que se transfiere al vapor o fluido térmico que genera, se identifica también como **eficiencia de combustible a vapor**:

$$\text{Efic} = \frac{\text{Cal salida}}{\text{Cal entrada}} \times 100$$

La limitación que significa no caer bajo el punto de rocío y el aire que adicionalmente al teórico se requiere para completar la combustión, son dos de los factores principales con influencia en las posibilidades de recuperación de calor del PCS

Uso importante y amplio del vapor.

En el trabajo del vapor se usan sus propiedades de presión, volumen y temperatura, las dos primeras para accionar maquinaria y la última para procesos térmicos.

El vapor fluye hasta el punto de consumo a través del sistema de distribución impulsado por el gradiente de presión, se condensa después de ceder su calor latente para reciclarse parcial o totalmente al proceso, se calienta al punto de saturación, la adición de calor producirá el cambio de fase a vapor nuevamente a temperatura correspondiente a la presión de operación del generador de vapor y las aportaciones posteriores de calor lo llevarán a la condición de sobrecalentamiento.

El vapor sobrecalentado no contiene humedad y esta característica puede conseguirse también cuando el vapor saturado se somete a una reducción de presión como sucede en las válvulas reductoras (VRP) en los sistemas de distribución

Contabilidad del Calor en el Agua y en el Vapor.

Los contenidos de calor en el agua y el vapor se expresan en Kcal/Kg (BTU/LB) y se designan como entalpia ("h" en tablas y fórmulas) Sus valores a diferentes condiciones de presión y temperatura se consultan en las tablas de vapor para "líquido saturado" (hf), "evaporación" (hfg), "vapor saturado" (hg) y "vapor sobrecalentado" (hs) Las referencias más conocidas son las tablas "Thermodynamic Properties of Steam" Keenan and Keyes y ASME STEAM TABLES Esta información es útil en el cálculo de energías de entrada y salida en los procesos de un generador de vapor.

Recuperación de Energía en el Sistema de Condensado.

El calentamiento del agua de alimentación a una caldera, requiere una porción importante de la energía total en el vapor, su retorno a la máxima temperatura posible es importante. Es una "regla de dedo" interesante es: "la eficiencia de la caldera se reduce en 1% por cada 6° C (11° F) menos en la temperatura de del agua de alimentación".

Una caldera de baja presión en la que tengamos que llevar de 20 a 80° C la temperatura del agua de alimentación requiere para lograrlo aproximadamente el 15% de la energía en el vapor.

En las centrales termoeléctricas el agua de alimentación ingresa al domo a temperaturas altas, cercanas a la de saturación correspondiente a la presión de operación. En una instalación industrial esto sería una indicación de que las trampas de vapor operan con fugas.

Cálculo de pérdidas y ahorros de combustible basados en cambio de eficiencia.

Hay una diferencia importante entre el mejoramiento en eficiencia y los ahorros en combustible, éstos últimos representan un porcentaje siempre más alto que el incremento en eficiencia.

Mejorar la eficiencia de 80 a 81% representa aproximadamente 1.25% de ahorro de combustible. Los ahorros o pérdidas como resultado de un cambio en eficiencia serán:

$$\text{Ahorros} = \frac{\text{Efic. actual} - \text{Efic. anterior}}{\text{Efic. actual}}$$

El beneficio de mantener en un alto nivel de eficiencia de una caldera se calcula fácilmente.

$$S = W_C \cdot C_f \cdot H_r \cdot (E_i - E_a) / E_a$$

En donde:

S = Potencial de ahorro anual de combustible (NS/Año).

W_c = Régimen de consumo de combustible en millones de KCal/Hr.

hr = horas de operación anuales.

E_i = Eficiencia ideal.

E_a = Eficiencia actual o eficiencia existente

C_f = Costo de combustible (NS/millón de Kcal).

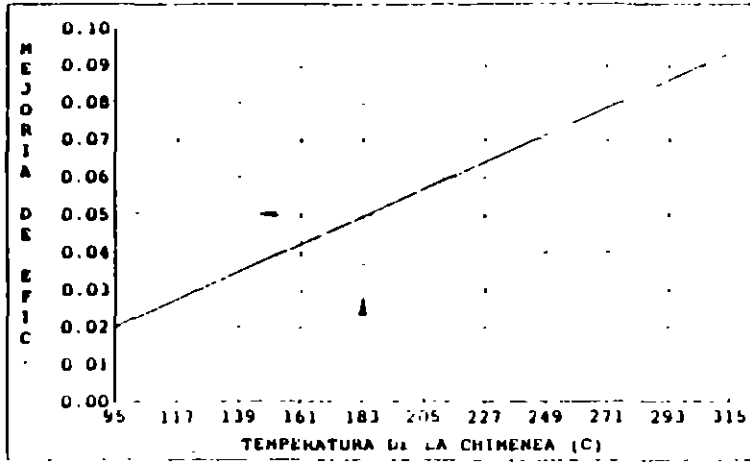


Fig. 1 Cambio de eficiencia (%) por cada 1 % de cambio en exceso de aire a diferentes temperaturas de la chimenea

Fig. 2 Relacion entre superficies de intercambio y calor absorbido en G V

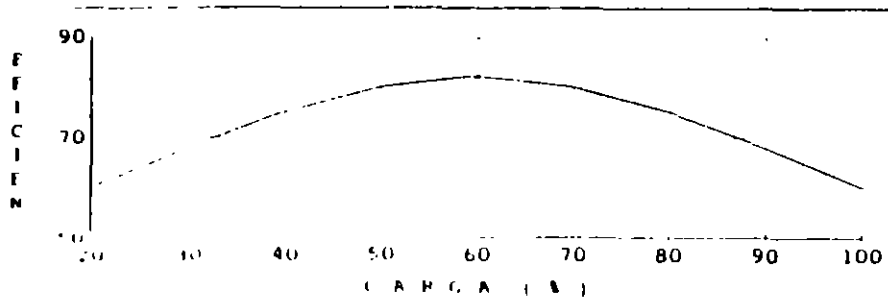
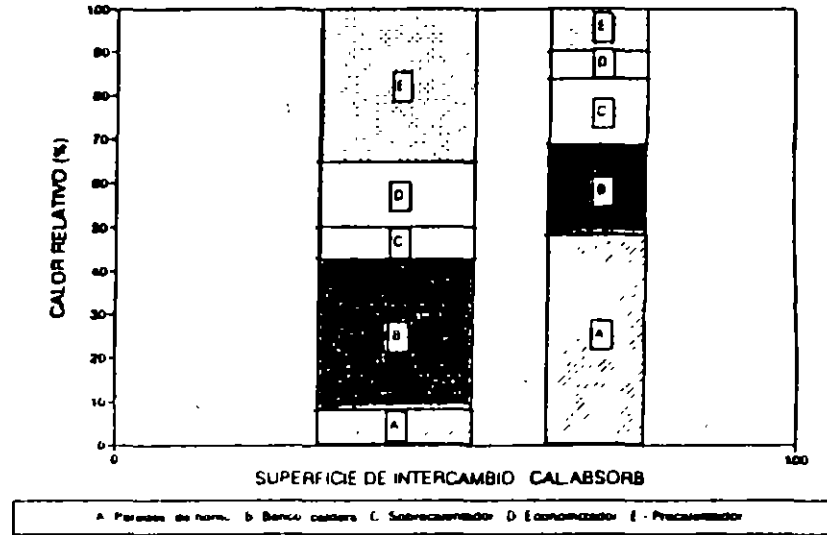


Fig. 4 Eficiencia de caldera a diferentes cargas

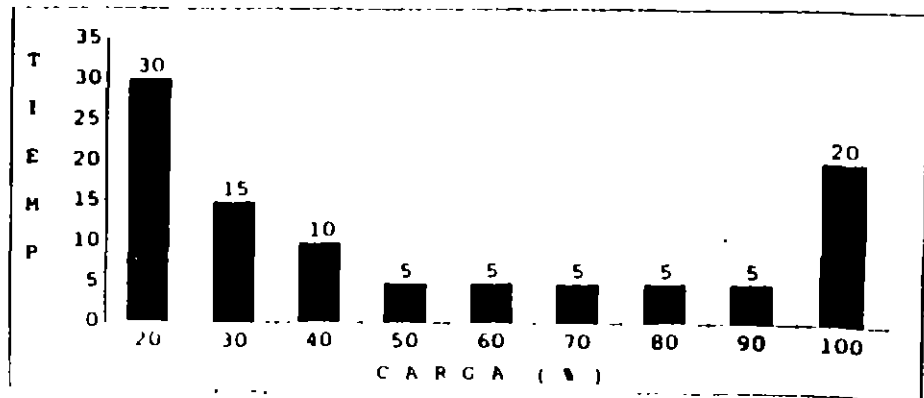


Figura 5 Utilizacion real de una caldera. Aplicacion tipica institucional

La eficiencia de la caldera varía con la carga, el potencial de ahorro de combustible cambia también con el patrón típico de la carga con relación de la eficiencia ideal o de referencia, la fórmula anterior puede usarse para estimar ahorros a una carga típica.

Temperatura de gases.

Es útil contar con una manera rápida de estimar el potencial de ahorro en combustible con algunos índices como temperatura en chimenea o exceso de aire. Fig. 1, para estimar un incremento de eficiencia multiplique el factor (izquierda) correspondiente a la temperatura en chimenea por la reducción de exceso de aire en %.

Mejoramiento de la Transferencia de Calor.

Es importante el análisis de distribución de intercambio de energía en los diferentes componentes de un generador de vapor, la zona más efectiva en la caldera es la que está expuesta a radiación directa de la combustión, la Fig. 2 es útil en este análisis y desde luego esto tiene influencia en la temperatura de la Flama-

DIAGNOSTICO ENERGÉTICO EN LA GENERACIÓN DE VAPOR.

Este diagnóstico es similar a un análisis médico: nos da información, del estado de salud de la instalación de generación de vapor, por la forma de operación y posibles fallas de diseño o la instalación, y que puede ser útil para:

- * Control de la operación del generador de vapor.
- * Definición de puntos básicos para el mantenimiento.
- * Determinación de puntos en que debe actuarse para reducir el consumo.
- * Posibles mejoras del régimen térmico.
- * Establecimiento de prioridades.

La forma de realizar el diagnóstico es variable e influyen, por el tamaño e importancia, tanto la empresa donde se realiza como el propio generador de vapor. En general, puede procederse con un **diagnóstico contable**, que es el más común y sencillo ó el **diagnóstico técnico** que requiere para su elaboración de más cuidado y precisión.

Diagnóstico contable.

Analiza la contabilidad de consumos energéticos, relacionándolos con otros datos, como la producción de vapor real y teórica, el consumo de agua de alimentación, las purgas, porcentajes

de excesos de aire, temperaturas de gases, etc. y se emplean los datos de los reportes de trabajo estableciendo una serie de índices, como los mostrados a continuación:

Producción de vapor ----- (tv/tc)	Consumo de energía eléct. ----- (kwh/tv)
Consumo de combustible	Producción de vapor

Producción de vapor ----- (tv/up)	Consumo agua alimentación ----- (taa/tv)
Unidad de producto	Producción vapor

ó cualquier otra relación contablemente conveniente, y se les fijan valores óptimos, las desviaciones de éstos son una indicación de desajustes que es necesario corregir.

Este diagnóstico es primario, solamente detecta desviaciones, pero no describe e identifica las causas.

¿Cómo puede intervenir el operador en el diagnóstico contable?

De manera muy directa e importante: suministrando los datos base para la contabilidad, de cuya precisión y confiabilidad va a depender la veracidad de las conclusiones y la validez de las correcciones que pudieran introducirse para reducir el consumo.

Diagnóstico técnico.

Es un estudio más profundo del comportamiento energético que determina, entre otros parámetros, el "rendimiento" o eficiencia, utilizado universalmente para comparar el funcionamiento energético de los generadores de vapor. La "Energía Útil" será la que lleva el vapor a proceso ó generación, la "Energía consumida" es la total aportada al generador de vapor en sus diferentes formas.

En general, el diagnóstico contable, se realiza a diario o periódicamente, en cambio el diagnóstico técnico completo se realiza con menor frecuencia o cuando el diagnóstico contable aconseja un estudio más detenido.

En esta visión global de eficiencia caben tres etapas fundamentales de análisis del flujo de la energía que representan puntos potenciales de pérdidas y por lo tanto, de ahorros.

La primera es la conversión del combustible u otro insumo energético al agua ó vapor. La segunda es la transportación del vapor a través de la red de distribución y la tercera etapa es su utilización por el destinatario último, un área de proceso, una turbina o un intercambiador de calor.

Para determinar el rendimiento, se analizarán los diferentes tipos de pérdidas que pueden existir en un generador de vapor.

¿Qué corrientes de materia extraen del generador energía no útil?

Los productos de combustión (gases y combustibles no quemados), las purgas y venteos, las fugas de gases y las escorias y cenizas en su caso.

No todas las pérdidas de energía van acompañadas de una corriente de materia.

Hay un concepto denominado pérdida por radiación no ligada a corriente de materia que es el calor transferido al medio ambiente desde las paredes, aislamientos, estructuras, etc.

Cálculo de pérdidas ligadas a corrientes de materia.

La cuantía de estas pérdidas depende de la naturaleza de la corriente, de la cantidad de materia y de temperatura.

$\text{Pérdidas} = \text{Masa} \times \text{Calor específico} \times \text{Incremento de temperaturas.}$

GENERACIÓN DE VAPOR.

Eficiencia de la combustión.

Una combustión completa y económica será siempre el primer objetivo a alcanzar en un programa de optimización energética ya que pueden alcanzarse ahorros importantes de manera inmediata con costo mínimo.

La medición de la eficiencia de la combustión se basa en la composición química de los gases de chimenea.

Eficiencia de la Caldera.

Un trabajo amplio de Diagnóstico Energético debe medir la eficiencia de la caldera relacionándola con la siguiente información:

- I. Tiempo transcurrido desde la última limpieza de superficies de intercambio de calor.
- II. Tiempo transcurrido desde la última revisión del sistema de combustión.
- III. Régimen de la carga.
- IV. Políticas y hábitos de operación y mantenimiento.
- V. Datos de pruebas de combustión - modos de control.

VI. Datos de diseño original - alteraciones posteriores.
Fig. 4 - 5.

Tratamiento de agua vs purgas.

Una baja calidad del agua de alimentación siempre causará inhibición a la transferencia de calor, por incrustación y corrosión. El tratamiento químico y sus consecuentes requerimientos de purgas, continua e intermitente, son aspectos críticos en la eficiencia de una caldera.

Es frecuente encontrar que con argumentos de "seguridad" se purga muy por encima del valor óptimo establecido, con impacto energético negativo.

Pérdidas por radiación y no determinadas.

Normalmente se toman los valores que da el fabricante ó se convienen al realizar pruebas de aceptación o de determinación del Régimen Térmico Óptimo - RTO.

RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR Y RETORNO DE CONDENSADOS.

Aislamientos defectuosos.

En una línea de conducción de vapor siempre se tendrán pérdidas de calor. El aislamiento se diseña originalmente para reducir éstas a un valor óptimo desde el punto de vista económico o a consideraciones protección de personal en la planta.

El análisis de los perfiles térmicos en superficies de líneas y accesorios de vapor mostrará claramente las áreas con necesidades de mantenimiento.

Un instrumento ideal para esta medición es el videotermógrafo, se pueden hacer "barridos" rápidos en cabezales, válvulas, bridas y otras áreas de distribución de vapor o de retorno de condensados.

Fugas de vapor.

Con frecuencia se tiende a considerar "normal" la existencia de fugas en juntas, uniones, bridas, etc., la única manera de corregir este costoso criterio es darse cuenta de la importante cantidad de dinero que se arroja a la atmósfera por cada uno de estos pequeños orificios.

Trampas de vapor.

Existen varios métodos para evaluación de trampas dependiendo de su tipo y aplicación. Visual - Mirillas - por Temperaturas - Acústico - Fig. 7

ESTABLEZCA EL ESCENARIO IDEAL.

Resumen de pérdidas	Pérdidas (%)	Millones de Kcal perdidos (anuales)	Millones de pesos (anuales)
Pérdidas en la caldera			
Pérdidas en chimenea	22.8	12,582.9	820
Pérdidas purgas	4.6	2,538.7	165.6
Pérdidas en superficies	1.0	551.9	36
Total	28.4	15,673.5	1,021.6
Pérdidas en el sistema de distribución			
Pérdidas por aislamientos	6.7	3,723.9	241.92
Pérdidas en el sistema de condensado	8.8	4,856.5	316.8
Pérdidas por flasho en trampas	19.1	10,552	688.32
Pérdidas por derrames en trampas	3.9	2,141.3	139.68
Pérdidas externas de vapor	2.7	1,499	99.7
Pérdidas internas de vapor	1.9	1,070.8	69.8
Total	43.2	23,843.5	1,544.22
Pérdidas combinadas	71.6	39,517	2,575.82
Eficiencia del sistema	28.4		

FIG. 7

COMBUSTIBLE	CAPACIDAD DE REGIMEN Millones de Cal/Hr (BTU/HR)			
	2.5 - 4 (10 - 16)	4 - 25 (16 - 100)	25 - 63 (100 - 250)	63 - 125 (250 - 500)
GAS	80.1	81.7	84.0	85.2
ACEITE	84.1	86.7	88.3	88.7
CARBON				
GRANUL	81.6	83.9	85.5	85.8
PULVERIZADO	83.3	86.8	88.8	89.1

Tabla 8 MAXIMOS NIVELES DE EFICIENCIA ECONOMICAMENTE OBTENIBLES (%)

La optimización del comportamiento de calderas en plantas y sistema de distribución de vapor se identifica básicamente con el mejoramiento del Régimen térmico, concepto amplio, gratificante y rentable. Se puede pensar a primera vista que requiere un cúmulo de conocimientos y observación muy precisa.

En realidad involucra un buen entendimiento y comprensión de la dinámica de operación de los sistemas, subsistemas y componentes que integran las instalaciones, y fundamentalmente el conocimiento de los procesos que tienen lugar en los fluidos y energías que intervienen en la generación de vapor.

La realización en forma sistemática de los trabajos hacia la optimización facilita mucho lograr buen éxito.

EFICIENCIA ENCONTRADA O EFICIENCIA EXISTENTE. Es un valor determinado en la condición en la que se inician los trabajos de optimización, debe usarse como línea de referencia para cualquier mejoramiento posterior. Es importante que se registre este valor, será el punto de partida en un programa de mejoramiento del régimen térmico de la caldera. Podrá mostrar los efectos negativos de subestimar sus posibilidades, si la instalación es eficiente, pondrá de manifiesto el crédito para el personal responsable de la planta, en caso contrario, será importante para justificar mediante su evaluación económica, modificaciones a los sistemas existentes o personal adicional requerido. Los siguientes pasos será poner a punto y ajustar la caldera y realizar previamente las reparaciones y mantenimientos necesarios e identificados durante las pruebas iniciales.

FIJE SUS METAS.

EFICIENCIA AJUSTADA. Es el valor obtenido después de realizar ajustes operativos, pruebas de combustión y ajustes de central, y de completar reparaciones menores. Esta será la línea de referencia óptima en cuanto a eficiencia para estimar ahorros posibles o deterioros a futuro.

Una evaluación honesta y precisa del potencial de ahorro disponible debe partir de que el equipo esté en su condición normal en cuanto a operación y mantenimiento cuando no es así, las estimaciones de ahorro y justificaciones para modificaciones o sustitución de equipo, contendrán información falsa y conducirán a decisiones equivocadas.

EFICIENCIA MÁXIMA ECONÓMICAMENTE OBTENIBLE.

Es el valor de eficiencia que puede obtenerse con equipo mejorado ó adicional, si es económicamente justificable. En la Fig. 8 se dan niveles de eficiencia para un rango amplio de capacidades de calderas y diferentes combustibles.

EFICIENCIA MÁXIMA OBTENIBLE. Es aquella que se obtendría con la adición del mejor equipo disponible para mejoramiento de eficiencia, independientemente de la relación costo-beneficio energético y puede tener valores muy altos

La elevación de la eficiencia puede ser más económica que instalar otra caldera. Esto es importante en los casos en que la capacidad disponible, al mejorar la eficiencia, satisfaga el incremento en la demanda de una planta de calderas.

Hablar de "eficiencia de calderas" no es claro a menos que se defina con precisión, de qué EFICIENCIA se trata.

Tendencias de Curvas de Eficiencias.

A medida que nos acercamos al extremo inferior del rango de operación (turndown ratio), la eficiencia de una caldera tiende a caer súbitamente, el volumen de aire a través de quemadores se reduce considerablemente afectando sus características de mezcla y requerirá de un incremento de aire para compensar esta deficiencia, conduciéndonos a bajas eficiencias.

En alto régimen de combustión, la capacidad para recuperar el calor del proceso de combustión disminuye y la temperatura en chimenea aumenta. Esto explica que a altas capacidades, también el valor de eficiencia disminuya.

Debe desarrollarse la curva de eficiencia en todo el rango de cargas para cada unidad y establecer con precisión los valores y para examen posterior de los valores reales de operación.

UN PROGRAMA EFECTIVO DE CONSERVACIÓN DE ENERGÍA.

Estos son los elementos esenciales de un programa de conservación de energía efectivo en una planta de vapor:

- 1 - Propósito y compromiso de la administración.
- 2 - Pruebas de caldera y sistema.
- 3 - Evaluación económica de los proyectos de conservación de energía.
- 4 - Asignación de prioridades a los proyectos.
- 5 - Plan definido.
- 6 - Implementación del plan.
- 7 - Programa de administración de control de pérdidas.
- 8 - Monitoreo o resultados.

Administración del Control de Pérdidas.

La Asignación de un valor anual de pérdidas en dinero a los indicadores de comportamiento de sistema de manera que cada parámetro de operación tenga un impacto significativo en los costos.

operativos y permitirá monitorear las pérdidas de energía. Algunos conceptos de administración de control de pérdidas se ejemplifican a continuación.

a) Por cada 5 grados C. de elevación de temperatura en chimenea se tendrá una pérdida anual de N\$200,000, si no se corrige, en una unidad de 300 MW.

b) Por cada 5% de incremento en exceso de aire los costos anuales de combustible se incrementarán en N\$ en una unidad de 158 MW si ésta condición persiste.

En esta forma podrán expresarse otros índices, con la observación de que cada planta establecerá sus propios valores.

Monitoreo de Resultados.

El empleo de computadoras y la facilidad de adquisición de datos de las centrales en operación ha traído buenas oportunidades de monitoreo real del comportamiento sobre la base de tiempo completo y ha desplazado la práctica de proceder por suposiciones ó criterios personales.

CONTROL DE GENERADORES DE VAPOR Y EFICIENCIA.

Un incremento del periodo entre el momento de una desviación del punto de control en una condición y aquel en que se corrige puede resultar en pérdidas, situaciones peligrosas para el equipo o para el personal de operación. Lo anterior trae la necesidad de **instrumentos de medición y aparatos de control precisos, sensibles y de respuesta rápida**. La eficiencia es altamente dependiente de las condiciones transitorias durante variaciones de carga y que reside la importancia del control en el ahorro energético

Cada caso tiene una serie definida de condiciones en los fluidos aire, combustible, gases de combustión, agua y vapor para cada carga, que deben mantenerse tan fielmente como se desee: **mejor aprovechamiento de la energía en el combustible mínimos, costos de operación, máxima seguridad, y mayor vida útil de la unidad**. Esto requiere el control preciso de esas condiciones y que las correcciones necesarias se efectúen en el tiempo mínimo posible, especialmente en los generadores de vapor modernos en que la relación entre el almacenamiento de agua en el generador y la evaporación horaria es baja, Fig. 9.

Los objetivos del sistema de medición y control automático son los mismos independientemente de la capacidad de la unidad.

- Mantener la caldera en operación de máxima eficiencia posible y generando vapor a las condiciones requeridas para usos finales
- Máxima seguridad durante la operación
- Utilización eficiente del personal

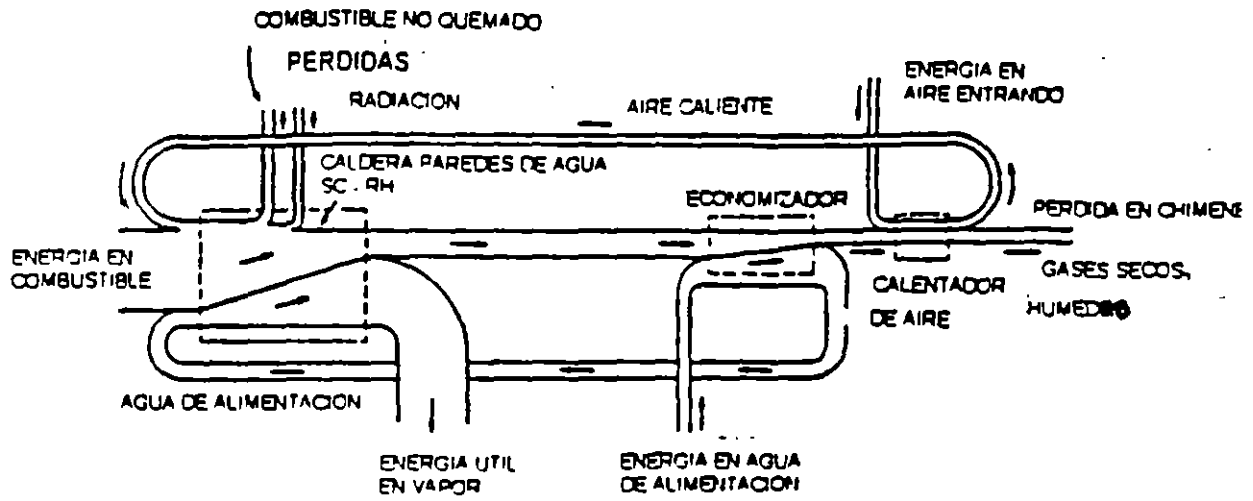


FIG 9 FLUJO DE ENERGIA EN UN GENERADOR DE VAPOR

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
CARRON	PULVERIZADO	15 - 20	3 - 3.5
CARRON	ALIMENTADOR	20 - 30	3.5 - 5

FIG 10

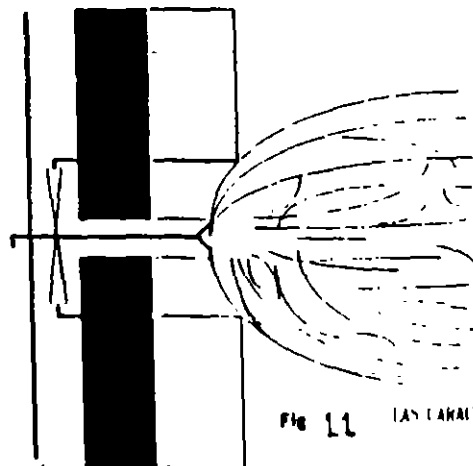


FIG 11 LAS CARACTERISTICAS DE LA FLAMA SON SIMILARES A LA GEOMETRIA DE UNA FLAMA NORMAL

- * Establecer una guía de referencia para la conservación de la caldera.
- * Generar información confiable necesaria para cálculos de costos unitarios de producción.

El control debe ser suficientemente flexible para reaccionar a los cambios de demanda y satisfacerlos manteniendo óptima eficiencia. Estos son los principales circuitos de control de una caldera, aplicables según el tipo, capacidad, condiciones de operación y servicio.

- **CONTROL DE AGUA DE ALIMENTACIÓN.**
- **CONTROL DE COMBUSTIÓN.**
- **CONTROL DE TEMPERATURA DE VAPOR - SOBRECALENTADO - RECALENTADO.**
- **CONTROL DE TIRO EN EL HORNO.**
- **CONTROL DEL SISTEMA DE PURGAS.**
- **CONTROL DE TEMPERATURA DEL LADO FRÍO EN PRECALENTADORES DE AIRE Y ECONOMIZADORES.**
- **SISTEMA DE SEGURIDAD DE CALDERA.**

PRUEBAS DE COMBUSTIÓN Y AJUSTE DE CALDERAS.

En una prueba de combustión se lleva una caldera a su comportamiento óptimo a una carga determinada (puesta a punto) en condición estable y después se ajusta el sistema de control para reproducirlo en condición dinámica en todo el rango y en cualquier momento.

Las mejoras que pueden obtenerse en una caldera en estado de deterioro pueden ser sustancialmente menores que aquellas que se logran bajo condiciones apropiadas de trabajo. Es esencial examinar la unidad antes de proceder con pruebas y efectuar previamente reparaciones y mantenimiento.

Uno de los primeros interrogantes al ajustar la caldera en operación es si requiere sacarla de servicio y abrirla para una inspección formal.

Apariencia de la Flama.

La flama es el corazón del proceso de combustión si no es correcta se tendrá un serio reto para lograr un buen ajuste.

Su buena apariencia y geometría es indicación de combustión eficiente. Es difícil generalizar la característica de una "buena" flama ya que varía según el diseño de quemador y otras condiciones de operación. Fig. 10.

Operar con bajo exceso de aire es una situación ideal, sin embargo la operación a bajo exceso de aire reclama una atención más precisa del personal de planta en el proceso de combustión. El tamaño de la flama es mayor y tiende a llenar el horno completamente, la tendencia es alargarse ya que toma un tiempo mayor el proceso de combustión completo del combustible.

Aspectos fundamentales de pruebas de combustión y ajuste.

Las condiciones básicas para una buena combustión son:

- Tiempo suficiente.
- Temperatura suficientemente alta.
- Turbulencia óptima para mezcla íntima.
- Aire de combustión suficiente.

MÉTODOS DE CÁLCULO DE EFICIENCIA EN CALDERAS.

Un punto clave de un programa de mejoramiento energético es el conocimiento de la eficiencia operativa de la caldera así como el correspondiente incremento desde la condición "como se encontró" hasta la condición de optimización final. Esto puede requerir una serie de pruebas durante un extenso periodo de tiempo.

Una de las bases más reconocidas y aceptadas para pruebas de eficiencia a la caldera es el Código de Pruebas de Potencia (PTC) 4.1 ASME.

Dos cálculos de eficiencia. **Entrada-Salida** y de **Pérdidas de Calor** están incluidas en la **FORMA CORTA ASME**. Este código de prueba de potencia ha venido a ser el procedimiento "estandar" en muchos países. En este código se consideran despreciables las pérdidas de eficiencia y los créditos de calor menores, toma en cuenta solamente el poder calorífico superior del combustible alimentado.

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENTRADA - SALIDA Y PÉRDIDAS DE CALOR.

Ambos métodos son matemáticamente equivalentes y podrían dar idénticos resultados si los factores requeridos en el balance térmico (o pérdidas de calor) considerados fueran generados por mediciones en una caldera realizadas sin error y con instrumentos de alta precisión y altas técnicas de prueba. Sin embargo lo más común en la práctica es que las pruebas a calderas se realicen con

limitaciones en la instrumentación y los resultados entre ambos métodos en general muestra diferencias debidas principalmente a las incertidumbres de las mediciones en los flujos y contenidos de energía en las corrientes entrantes y salientes.

Los valores determinados por estos métodos son de **EFICIENCIA BRUTA** en contra posición a los valores de **EFICIENCIA NETA** los cuales incluyen como entradas adicionales de calor y la energía requerida para operar todos los equipos auxiliares de la caldera (por ejemplo: ventiladores de aire para la combustión, bombas de combustible, calentadores de combustible, alimentadores, etc). Fig. 13.

Se emplean también comercialmente los términos "**sin servicios y con servicios**" para estos valores de eficiencia.

MÉTODOS DE ENTRADA - SALIDA.

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} \times 100$$

En este método se mide el calor absorbido por el agua y el vapor de salida y se compara con la energía total de entrada dada por el poder calorífico superior del combustible (PCS) "Entrada"

Este método requiere de una medición exacta del flujo de combustible a la entrada así como de datos precisos de la presión, temperatura, calidad y flujo de vapor, temperatura del agua de alimentación, temperatura de los gases en la chimenea y temperatura del aire, y otros parámetros más, para poder realizar los cálculos completos de balance término.

MÉTODO DE PÉRDIDAS DE CALOR.

$$\text{EFIC \%} = 100\% - \text{PERDIDAS DE CALOR \%}$$

El método de las pérdidas de calor resta las pérdidas individuales, unitarias, de energía del 100% para obtener el porcentaje de eficiencia.

Esta prueba es reconocida como el estandar accesible para rutinas de eficiencia especialmente en industrias donde la instrumentación disponible es mínima.

LAS PÉRDIDAS A MEDIR SON:

- 1.- Pérdida de calor por gases secos.
- 2.- Pérdida de calor por humedad en el combustible.
- 3.- Pérdida de calor por combustión del hidrógeno

- 4.- Pérdidas por humedad en el aire.
- 5.- Pérdidas de calor debidas a los residuos combustibles.
- 6.- Pérdidas de calor por radiación.
- 7.- Pérdidas no determinadas.
- 8.- Pérdidas por purgas, venteos, consumos por servicios propios.

Este procedimiento no toma en cuenta las pérdidas menores de eficiencia y los créditos por ganancias térmicas, considerando únicamente el calor del combustible como energía de entrada. Además de ser el más preciso en campo, el método de las pérdidas de calor, identifica exactamente donde se producen, contribuyendo así a los esfuerzos de ahorro de energía.

Este método se designa como "de análisis de productos de combustión" ya que las principales pérdidas térmicas consideradas están basadas en la medición de las condiciones de los gases de combustión a la salida de la caldera y en el análisis del combustible.

COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA EN CALDERAS.

MÉTODO DE ENTRADA - SALIDA.

- a) Método más directo.
- b) Difícil y costoso lograr mediciones precisas.
- c) No localiza las pérdidas de energía.

MÉTODO DE PERDIDAS DE CALOR.

- a) Método indirecto (100% - Pérdidas de energía).
- b) Simple y preciso.
- c) Localiza y determina la magnitud de las pérdidas de energía, da elementos para su corrección.
- d) Permite valorar potenciales de mejoras de eficiencia y ahorros de energía.

RECOMENDACIONES DE MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA.

Existen infinidad de formas y recursos para reducir los costos de operación de calderas y sistemas de distribución de vapor, al final se muestra un buen número de opciones que son el resultado de pruebas y experiencias en más de MIL PLANTAS, de capacidades grandes y pequeñas, no todas

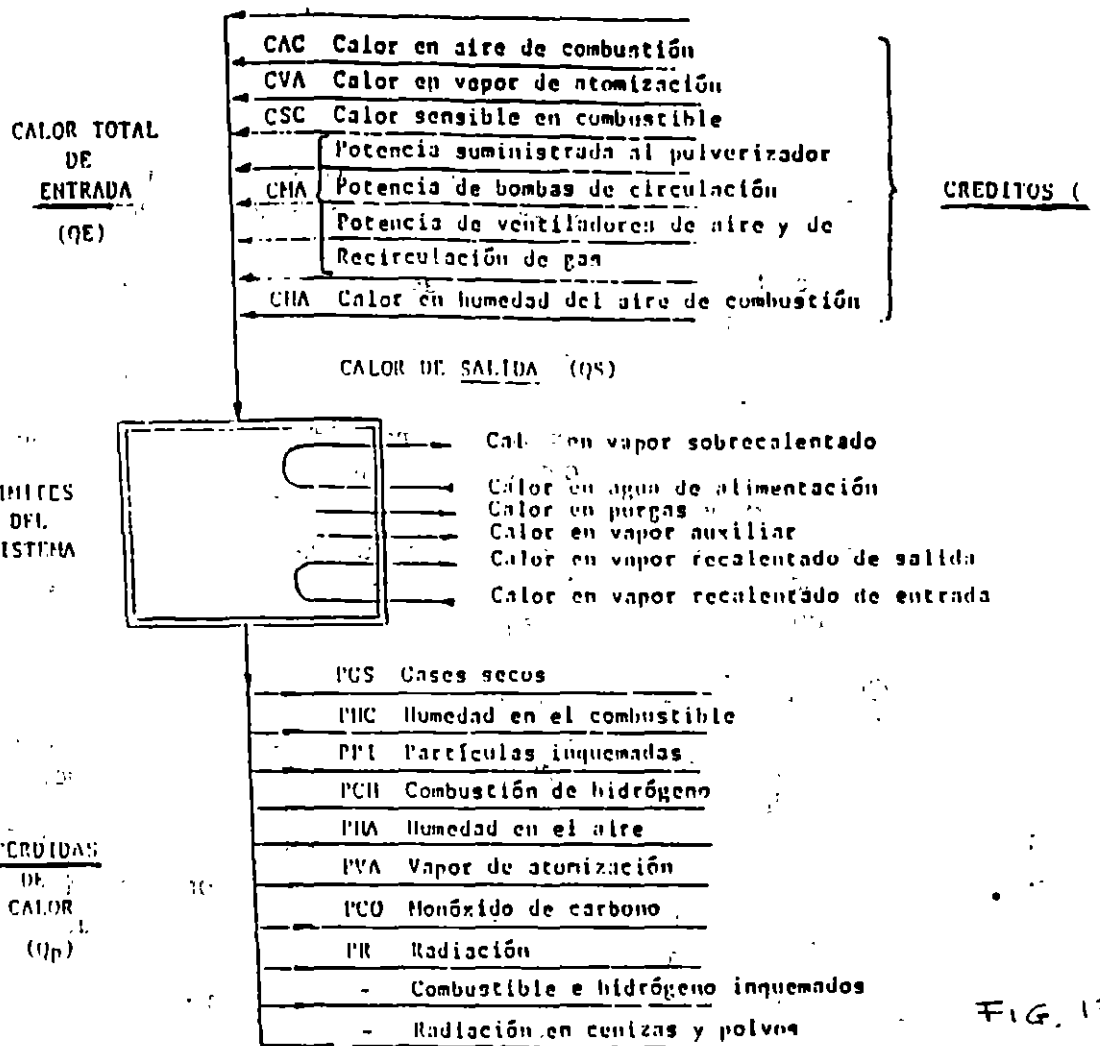


FIG. 13

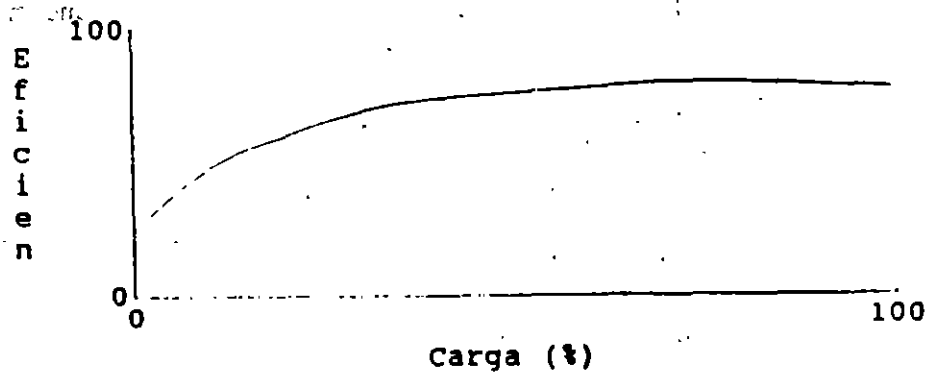


Fig. - 12 A Curva de eficiencia mostrando pérdidas por alto exceso de aire abajo del 50 % de carga.

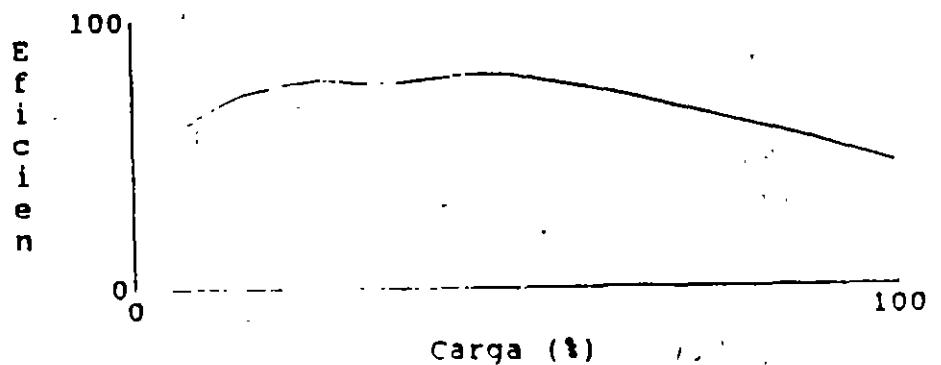


Fig. - 12 B Curva de eficiencia con pérdidas por alta temperatura de la chimenea abajo del 50 % de carga.

las áreas de oportunidad son aplicables a una instalación en particular. La lista no es limitativa y su propósito es alentar los esfuerzos orientados al mejoramiento energético.

En el costo y ahorro potencial de las opciones para mejorar la eficiencia de su planta juegan un papel importante las condiciones de las instalaciones y el valor del combustible utilizado en un periodo típico de operación.

La mayoría de los casos requiere un análisis detallado de la operación de la planta para identificar las causas del desperdicio de energía y encontrar la mejor solución, este trabajo requiere tiempo y esfuerzo. A menudo se dificulta por la escasez de información y mediciones confiables por falta de instrumentación, de instalación permanente y de prueba. Hay muchos ejemplos de plantas que han sido diagnosticadas formalmente y que por esta causa permanecieron con pérdidas de energía y de muchos de millones de pesos no detectadas.

CONCLUSIONES.

- Las calderas presentan un área de oportunidad de alto potencial de ahorro energético y alta densidad de consumo.
- Los diagnósticos energéticos en calderas ofrecen posibilidades de beneficios en diferentes formas de energía y en consumo de agua y mejoramiento del ambiente.
- Un diagnóstico debe incluir el concepto integral de pruebas de combustión y ajuste de control para resultados óptimos.
- El equipo auxiliar y accesorio es importante en el comportamiento energético de las calderas.
- El sistema de distribución puede ser un área de potencial comparable o aun mayor que la caldera.
- La preparación de una caldera para pruebas es fundamental para un diagnóstico exitoso.

REFERENCIAS Y FUENTES DE CONSULTA

- CURSO DE TECNICAS DE AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGIA. EPRI ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE.
- HANDBOOK OF ENERGY AUDITS.- ALBERT THUMAN.
- PUBLICACIONES VARIAS DEL IIE.- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS.
- CURSOS DE AHORRO DE ENERGIA PREPARADOS POR LAS FIRMAS SEPSA, BENTON & BOWLES.
- MANUAL DE EFICIENCIA ENERGETICA.- CADEM.- ESPAÑA.
- PUBLICACIONES Y BOLETINES VARIOS DEL FIDE.
- LA INSTRUMENTACION EN DIAGNOSTICO ENERGETICO.- ALBERTO PLAU-CHU LINA.
- MANUAL DE CAPACITACION.- PROGRAMA INTEGRAL PARA USO EFICIENTE DE LA ENERGIA.- C.F.E. DIVISION GOLFO NORTE.
- EL AHORRO DE ENERGIA LA GRAN OPORTUNIDAD PARA LOS DISTRIBUIDORES DE MATERIAL Y EQUIPO ELECTRICO.- CONACONEE.
- NUMERO ESPECIAL DE LA REVISTA "POWER" TITULADO "BOMBAS".
- BOMBAS DEL INSTITUTO HIDRAULICO. TERCERA EDICION, 1975.
- MANUAL TECNICO CRANE, No. 410.
- GUIA PARA EVALUACION DE EFICIENCIA EN BOMBAS DE POZO PROFUNDO CIA.
- BOMBAS-SELECCION USO Y MANTENIMIENTO R. Hm. NAUGHTON.