

126  
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

ANALISIS Y ESTUDIO DE LA GENERACION DE  
VAPOR EN UNA CALDERA PARA EL  
MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA  
EXPERIMENTAL EN INGENIERIA QUIMICA

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
JUAN CARLOS PORTILLO MERIDA



MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

---

Presidente: Prof. Antonio Valiente Barderas  
Vocal: Prof. Genevevo Silva Pichardo  
Secretario: Prof. Héctor Méndez Fregoso  
1<sup>o</sup> Suplente: Prof. Mariano Pérez Camacho  
2<sup>o</sup> Suplente: Prof. José Ezequiel Gutiérrez Gómez

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Ingeniería Química. Facultad de Química. UNAM  
Instalaciones de Calderas y Control S.A. Chicoloapan. Estado de México.

Asesor del Tema:

  
I.Q. Genevevo Silva Pichardo

Supervisor Técnico

  
O.M. Horacio Portillo Gómez

Sustentante:

  
Juan Carlos Portillo Mérida

**A MIS PAPÁS, HORACIO Y JULIETA**

**A MIS HERMANOS, JORGIO Y JULETA**

**A MI ABUELA MATY**

**A MIS ABUELOS, HORACIO, JORGE Y OLGA**

**A FABIOLA**

## ÍNDICE

CAPÍTULO	PÁGINA
Prefacio.....	1
I. Introducción.....	5
II. Fundamentos Sobre Calderas.....	7
2.1 Clasificación General de las Calderas.....	8
2.2 Descripción de la Caldera del Laboratorio de Ingeniería Química.....	8
2.3 Descripción de los Equipos Periféricos.....	9
2.4 Operación de la Caldera.....	12
2.5 Conceptos Básicos.....	13
III. La Combustión.....	19
3.1 Porqué Explotan las Calderas.....	22
IV. El Agua de Alimentación.....	24
4.1 Calidad del Agua de Alimentación.....	24
4.2 El Efecto de la Calidad del Agua en la Caldera.....	24
4.3 Acondicionamiento del Agua.....	27
V. Cálculo de la Eficiencia de un Generador de Vapor.....	30
5.1 Factores y Variables que afectan la Eficiencia.....	32
5.2 Objetivo y Alcance del Procedimiento.....	32
5.3 Procedimiento de Cálculo.....	38
5.4 Cálculos a Realizar.....	41
5.5 Resultados.....	47
5.6 Memoria de Cálculo.....	55
VI. Propuesta para el Cambio de Combustible a Gas.....	57
VII. Conclusiones.....	61
Bibliografía.....	65
APÉNDICE A.....	66
APÉNDICE B.....	75

## PREFACIO

Hace aproximadamente dos años y después de haber alcanzado un cierto grado de experiencia en la industria en el terreno de los generadores de vapor tuve la curiosidad de ir al Laboratorio de Ingeniería Química a ver el estado en el que se encontraba la caldera que surte de vapor a varios de los equipos que ahí se encuentran. Platicué con algunos docentes y con el personal responsable del Laboratorio los cuales me informaron de la operación deficiente de la caldera y de la necesidad de darle mantenimiento. Para ese entonces desde hace algún tiempo venía desarrollandose en el Laboratorio el Proyecto "Mejoramiento de la Enseñanza Experimental en el Laboratorio de Ingeniería Química" del cual tuve conocimiento en ese momento. Adicionalmente se me informó de la necesidad de ahondar en el conocimiento de la caldera.

Motivado por lo anterior y enterado del programa decidí fijarme como meta el objetivo de participar en la elaboración de un guión sobre la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química. Para esto debía al menos sentar las bases y llegar tan lejos como fuera posible.

Basandome en los lineamientos que marca el Proyecto, realice mi Servicio Social abarcando los siguientes objetivos:

1. Definir de manera precisa el objetivo de conocimiento a ser aprendido y
2. Conceptualizar, diseñar, seleccionar mejorar u optimizar el equipo necesario de laboratorio.

Para lograrlos, primero se efectuó un diagnóstico visual del estado de la caldera encontrandose esta operando en condiciones de riesgo por lo se tuvieron que tomar acciones rapidamente para corregir las fallas mas urgentes. Una vez hecho esto se le dió servicio correctivo con el fin de lograr que la caldera operara optimamente.

Después se dieron algunas sugerencias de operación junto con un análisis de las condiciones actuales de operación.

Una vez terminado el servicio social y para continuar con esta labor la presente tesis abarca

los siguientes objetivos:

3. Selección de los temas o conceptos a ser tratados en el terreno experimental.
4. Abordar los fenómenos o conceptos que mejor se presten para su comprensión por vía experimental.
- 4.1 Dar al docente las herramientas necesarias para tener un control pleno sobre el fenómeno en términos teóricos y experimentales.
5. Establecer condiciones de operación.

Para lograrlos la presente tesis contiene:

a) Conceptos básicos sobre los diferentes enfoques que tiene la capacidad de una caldera, la potencia, la vaporización y las pérdidas de calor (sección 2.5).

b) Los fenómenos que ocurren dentro de la caldera como: el efecto de la calidad del agua de alimentación a la caldera (sección 4.2); la eficiencia de la caldera (capítulo V) y la sección 3.1 que explica el porqué puede explotar una caldera. Entre otros que se prestan para su comprensión por vía experimental.

c) En las secciones sobre acondicionamiento del agua (4.3), descripción de los equipos periféricos (2.3) y descripción de la caldera (2.2) se le brindan al docente las herramientas necesarias para tener pleno control de la caldera.

d) y en la sección sobre la operación de la caldera (sección 2.4); los resultados de los cálculos de la eficiencia (capítulo V) y en las conclusiones se establecen las condiciones de operación que debe tener esta. Para el cálculo de la eficiencia me basé íntegramente en el Código A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) P.T.C. 4.1 Power Test Code ya que es un método muy probado, además de efectivo y sencillo de aplicar dando un margen de falibilidad muy bajo.

Respectivamente.

Es cierto que aún deben depurarse los objetivos que aquí se plantean, pero las bases quedaron firmemente acentadas.

En materia ambiental, ante las nuevas normas ecológicas y previendo las normas que entrarán en vigor en Enero de 1988 (que tendrán mayor rigor que las actuales) este documento pretende plantear mejoras sustanciales a las características del diseño actual de la caldera. Para lograr esto, en el capítulo V se contempla el cambio de combustible diesel por gas L.P. En este capítulo se presenta una tabla que contiene las modificaciones requeridas (con sus respectivos costos) para lograr este fin. Estos costos se manejan en dólares debido a la situación actual tan fluctuante del peso con respecto al dólar para que este capítulo no pierda parte de su vigencia.

Aquí se manejan dos sistemas de unidades: el Métrico y el inglés. Esto se deba al hecho de que aunque los fabricantes de calderas y la A.S.M.E. manejan el sistema Inglés, la tendencia es cambiar al sistema Métrico. Es por esto que en la medida de lo posible se manejan ambas unidades (una junto a la otra) para no perder tiempo realizando cálculos en el cambio de sistema de unidades.

Desgraciadamente, en México aún manejamos indiscriminadamente los dos sistemas, pero de nosotros depende homologarlo.

Es importante hacer mención del valor de este documento como vínculo entre la enseñanza experimental con la industria, ya que todas las enseñanzas que aquí se presentan son aplicables a equipos similares a nivel industrial y de gran utilidad en las áreas de Mantenimiento, Ingeniería de Proceso, Producción y Calidad dándole al ingeniero una herramienta para poder conocer, experimentar, optimizar y aún modificar sustancialmente este equipo de servicio.

Posiblemente, y sin intención alguna, algunos de los conceptos y enseñanzas no son lo suficientemente claras para que el alumno o el profesionista los entienda o maneje, pero encontrará a pié de página o en la bibliografía que la gran mayoría de la literatura de la cual me basé es de muy fácil acceso y muy reciente lo cual puede ayudarle, al que le interesé, en hacerse un experto en calderas de tipo marina, como la mayoría de las que se encuentran en la



Universidad. Este tipo de calderas es la de mayor uso en México, sobre todo en pequeñas y medianas industrias.

También quiero aclarar que las Memorias de Cálculo no fueron hechas a mano gracias a que existen las hojas de calculo de la computadora en donde se puede modificar facilmente cualquier dato o valor. Así es como quedaron impresas.

Aún falta la realizacion del Guión que puede ser aplicable a las materias de Balance de Materia y Energia, Propiedades Termodinámicas, Flujo de Fluidos y Transferencia de Calor y otras que no tienen laboratorio como Ingenieria de Servicios e Ingenieria Ambiental. Con esto quiero decir que se le puede enfocar a una materia en específico o a realizar otros guiones en donde la protagonista no solo sea la caldera, sino la gran variedad de fenómenos que ocurren dentro de ella. En manos de otros dejo esta labor.

México a 1 de Octubre de 1997

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **EL MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA EXPERIMENTAL**

Fundamentalmente, el programa "Mejoramiento de la Enseñanza experimental en el Laboratorio de Ingeniería Química" surge como una necesidad de mejorar el aprendizaje de los alumnos de los fenómenos que ocurren a su alrededor y de que este adopte una conducta de adquisición de conocimientos.

La propuesta de este programa nos explica que la enseñanza teórica es, por naturaleza, pasiva presentando una información filtrada, es decir, que un fenómeno es explicado por un observador que lo comprendió de cierta manera y en muchos casos esta información se distorsiona aún más si la explicación viene de segundos, terceros oídos (fenómeno- escritor- profesor- alumno); esto, aunado con que el quehacer en los laboratorios está dirigido, diseñado y orientado por el docente de acuerdo a lo que este ha vivido anteriormente no deja al estudiante mas que una actitud contemplativa en lugar de ser receptiva<sup>1</sup>.

Lo que el programa busca es crear un proceso enseñanza-aprendizaje que produzca mentes analíticas y críticas, imaginativas e innovadoras y esto debe de lograrse poniendo al alumno ante el objeto o fenómeno natural en el preciso momento en que el fenómeno se enseña a sí mismo.

El estudiante relacionará a la realidad concreta con su representación en términos de leyes o modelos, ya sea mediante el establecimiento de estas leyes o mediante la aplicación de ellas a la realidad misma, pero por vía experimental.

La tarea del profesor a desempeñar es diseñar y organizar la Guía. Esto debido a que en él recae el papel primordial que consiste en garantizar el cumplimiento del objetivo que se persigue con la enseñanza experimental: permitir que el estudiante se enfrente directamente al fenómeno.

---

<sup>1</sup> Propuesta de Reforma de la Enseñanza Experimental. Dr. Martín Hernández Luna, Q. Mercedes Llano Lomas. Facultad de Química. UNAM. Agosto de 1991.

La presente tesis se enfoca, primordialmente, en elaborar una guía sobre la caldera y en motivar al lector en el profundo conocimiento de la misma.

Para lograr el objetivo de crear una guía sobre generadores de vapor se deben seguir los siguientes pasos:

1. Selección de los temas o conceptos a ser tratados en el terreno experimental.
  - 1.1 Considerar los conocimientos más importantes o más formativos de la asignatura.
  - 1.2. Abordar los fenómenos o conceptos que mejor se presten para su comprensión por vía experimental.
2. Dar al docente las herramientas necesarias para tener un control pleno sobre el fenómeno en términos teóricos y experimentales.
3. Diseño y organización de la práctica de laboratorio.
  - 3.1. Definir de manera precisa el objeto de conocimiento a ser aprendido por el estudiante.
  - 3.2. Conceptualizar, diseñar, seleccionar, mejorar u optimizar el equipo necesario de laboratorio.
  - 3.3. Establecer condiciones de operación.
  - 3.4 Definir la secuencia de eventos iniciales que el estudiante debe llevar a cabo.
  - 3.5 Establecer la información estrictamente necesaria a transmitirle al estudiante.
  - 3.6 Elaboración de la guía.

## I. INTRODUCCIÓN

### EL MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA EXPERIMENTAL

Fundamentalmente, el programa "Mejoramiento de la Enseñanza experimental en el Laboratorio de Ingeniería Química" surge como una necesidad de mejorar el aprendizaje de los alumnos de los fenómenos que ocurren a su alrededor y de que este adopte una conducta de adquisición de conocimientos.

La propuesta de este programa nos explica que la enseñanza teórica es, por naturaleza, pasiva presentando una información filtrada, es decir, que un fenómeno es explicado por un observador que lo comprendió de cierta manera y en muchos casos esta información se distorsiona aún más si la explicación viene de segundos, terceros oídos (fenómeno- escritor-profesor- alumno); esto, aunado con que el quehacer en los laboratorios está dirigido, diseñado y orientado por el docente de acuerdo a lo que este ha vivido anteriormente no deja al estudiante mas que una actitud contemplativa en lugar de ser receptiva<sup>1</sup>.

Lo que el programa busca es crear un proceso enseñanza-aprendizaje que produzca mentes analíticas y críticas, imaginativas e innovadoras y esto debe de lograrse poniendo al alumno ante el objeto o fenómeno natural en el preciso momento en que el fenómeno se enseña a sí mismo.

El estudiante relacionará a la realidad concreta con su representación en términos de leyes o modelos, ya sea mediante el establecimiento de estas leyes o mediante la aplicación de ellas a la realidad misma, pero por vía experimental.

La tarea del profesor a desempeñar es diseñar y organizar la Guía. Esto debido a que en él recae el papel primordial que consiste en garantizar el cumplimiento del objetivo que se persigue con la enseñanza experimental: permitir que el estudiante se enfrente directamente al fenómeno.

---

<sup>1</sup> Propuesta de Reforma de la Enseñanza Experimental. Dr. Martín Hernández Luna, O. Mercedes Llano Lomas. Facultad de Química. UNAM. Agosto de 1991.

La presente tesis se enfoca, primordialmente, en elaborar una guía sobre la caldera y en motivar al lector en el profundo conocimiento de la misma.

Para lograr el objetivo de crear una guía sobre generadores de vapor se deben seguir los siguientes pasos:

1. Selección de los temas o conceptos a ser tratados en el terreno experimental.
  - 1.1 Considerar los conocimientos más importantes o más formativos de la asignatura.
  - 1.2 Abordar los fenómenos o conceptos que mejor se presten para su comprensión por vía experimental.
2. Dar al docente las herramientas necesarias para tener un control pleno sobre el fenómeno en términos teóricos y experimentales.
3. Diseño y organización de la práctica de laboratorio.
  - 3.1. Definir de manera precisa el objeto de conocimiento a ser aprendido por el estudiante.
  - 3.2. Conceptualizar, diseñar, seleccionar , mejorar u optimizar el equipo necesario de laboratorio.
  - 3.3. Establecer condiciones de operación.
  - 3.4 Definir la secuencia de eventos iniciales que el estudiante debe llevar a cabo.
  - 3.5 Establecer la información estrictamente necesaria a transmitirle al estudiante.
  - 3.6 Elaboración de la guía.

## II. FUNDAMENTOS SOBRE CALDERAS

### **LA CALDERA**

La Caldera o Generador de Vapor es el equipo productor de energía más común y utilizado en la industria. Es el equipo de servicio que provee de energía calorífica o cinética a los equipos que así lo requieran como son: reactores, turbinas, procesos de destilación, refrigeración mediante vapor de agua, pasteurizadores; y en medianas y micro empresas como baños públicos, lavanderías, tinas de calentamiento, etc.

La Caldera puede ser un equipo de servicio o de proceso, dependiendo de las necesidades de cada proceso específico y es un equipo tan versátil que su clasificación es muy grande.

El conocimiento de las calderas ha crecido tanto que en algunos tipos de calderas alcanzan rendimientos de hasta un 600 % superior al de las primeras calderas<sup>1</sup> y muy seguras gracias a la introducción de controles mecánicos y electrónicos.

Desgraciadamente para muchas empresas nos encontramos con calderas que operan pobremente aumentando así el gasto de combustible y de mantenimiento empobreciendo la combustión que redunda en una mayor emisión de gases contaminantes. Es también frecuente encontrar calderas a las que les faltan o se encuentran averiados los controles y equipo de seguridad y en las que, por lo mismo aumenta el número de fogueiros (operarios) y el riesgo de un siniestro por el tan común "error humano".

En la actualidad, en México existen pocas personas especializadas en el servicio y mantenimiento de estos equipos y es una llamada de atención al Ingeniero Químico en una área poco explotada y que tiene como responsabilidad directa.

---

<sup>1</sup> W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles. La Producción de Energía Mediante el Vapor de Agua, el Aire y los Gases. Edit. Reverté. 1994 México

## **2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS CALDERAS<sup>2</sup>**

Las calderas de vapor se clasifican, atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua, en acuotubulares y pirotubulares; por la posición de los tubos, en verticales, horizontales e inclinados; por la forma de los tubos, de tubos rectos y de tubos curvados; y por la naturaleza del servicio que prestan, en fijas, portátiles, locomóviles y marinas. La elección de una caldera para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida, duración probable de la instalación, y de otros factores de carácter económico.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE INGENIERIA QUÍMICA**

La caldera del Laboratorio de Ingeniería Química es una caldera pirotubular (los gases de combustión fluyen por dentro de los tubos), de tubos rectos y horizontales (por su forma y posición respectivamente) y de tipo marina (por la naturaleza del servicio que presta). Es de la marca Cleaver Brooks, modelo M.100.60, tipo Monitor y actualmente utiliza combustible diesel

El cuerpo de la caldera del Laboratorio consiste en un recipiente cilíndrico (coraza) con tapas en ambos extremos llamadas espejos (ver Apéndice A, figura 1A). A este recipiente lo atraviesa de espejo a espejo otro cilindro llamado cañón u hogar en donde se lleva a cabo la combustión; además de un haz de tubos (fluxes) de menor diámetro que también atraviesan los espejos con un arreglo de tipo triangular. Cada flux (o tubo) va rolado a los espejos. El rolado es un sellado mecánico a presión. Con el rolado se logra que de el lado del agua de la caldera quede hermética bajo condiciones de operación adecuadas. Por el lado de la coraza existen 6 registros de mano distribuidos convenientemente.

Entre la pared interna de la coraza y la pared externa de los tubos y el cañón se encuentran el agua y el vapor. El nivel del agua no debe de estar por debajo de la última hilera superior de tubos para evitar sobrecalentamiento y que la caldera se desfluxe (fuga de vapor), ni tampoco ahogada de agua permitiendo así un cierto espacio para el volúmen de vapor que se

<sup>2</sup> id.

produce durante la operación.

Por la parte interna del cañón se lleva a cabo la combustión y los gases de combustión fluyen (por una combinación del tiro natural de la chimenea y el tiro forzado del ventilador que alimenta el aire para la combustión) haciendo un recorrido de cuatro pasos por el cañón y los tubos desembocando estos por la chimenea. Con esto se logra una eficiente transferencia de calor hacia el lado del agua.

El agua se alimenta por un lado de la coraza y una vez que se alcanzan las condiciones de presión y temperatura el agua comienza a ebullición produciendo vapor que fluirá por la tubería que se encuentra en la parte alta de la caldera.

### **2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PERIFÉRICOS DE LA CALDERA DEL LABORATORIO DE INGENIERIA QUÍMICA**

a) Quemador (ver Apéndice A, figs. 2A, 3A y 4A)

El quemador se compone de los siguientes elementos:

- **Ventilador o Soplador:** Proporciona el aire para la mezcla aire-combustible además del tiro forzado para el flujo de los gases de combustión ( Apéndice A, fig. 2A).
- **Canasta difusora o spin:** Hace que el aire fluya a manera de remolino para lograr una mezcla adecuada de aire-combustible (Apéndice A, fig. 3A).
- **Espreas o inyectores:** Alimentan el combustible atomizado. Estas se encuentran calibradas de fábrica con un ángulo de atomización y un flujo determinado (Apéndice A, fig. 4A).
- **Bomba de Combustible:** Esta es accionada por una banda conectada al motor del ventilador de manera que cuando este arranca la bomba también. Debe de estar calibrada para proporcionar  $7 \text{ kgf/cm}^2$  (100 psi) de presión al combustible (Apéndice A, fig. 2A).



- **Transformador de ignición y electrodos:** Producen un arco eléctrico de 10,000 volts que enciende el combustible al arranque de la caldera (Apéndice A, fig. 2A).
- **Detector de flama:** Se trata de una fotocelda que detecta si hay flama. Se discutirá más adelante su operación en el control de falla de flama (Apéndice A, fig. 3A).

#### b) Bomba de Agua de Alimentación

Esta bombea el agua hacia el interior de la caldera. Para lograr esto es necesario que la bomba tenga una presión máxima de descarga mayor que la presión de operación de la caldera (2 kgf/cm<sup>2</sup> por arriba de la presión de operación de la caldera es una buena consideración).

#### c) Purgas

Las purgas son las salidas inferiores de agua a través de un arreglo de tubería que desemboca a un registro de toma de muestras que a su vez desemboca al drenaje (Apéndice A, fig. 8A).

Hay 3 purgas: Una para el control de nivel y otras 2 en el fondo de la caldera. La finalidad de estas es la de eliminar el sarro y controlar la concentración de sales que se acumulen dentro.

#### d) Válvula de seguridad

Se encuentra en la parte superior de la caldera y esta calibrada a una presión determinada (se recomienda 1.5 kgf/cm<sup>2</sup> (21.3 psi) por arriba de la presión de operación de la caldera). La válvula se abre cuando la presión de la caldera excede los límites de calibración de esta produciendo un fuerte ruido cuya intención es la de alertar que existe un aumento de presión no controlado (Apéndice A, fig. 5A).

#### e) Válvula general de vapor

Es una válvula que generalmente es de compuerta para permitir el flujo de vapor hacia los equipos que lo requieran y se encuentra en la parte superior de la caldera (Apéndice A, fig. 8A).

#### f) Control de Nivel

Este se localiza en un costado de la caldera y en su interior se encuentra un flotador conectado a dos cápsulas con mercurio que funcionan como interruptores y que trabajan con la gravedad terrestre, una de ellas cierra el circuito eléctrico de la bomba de alimentación de agua cuando baja el nivel de agua y la otra abre el circuito del quemador en el caso específico de que el nivel de agua baje drásticamente. Con esto se logra un doble sistema de seguridad en caso que el agua no se suministre suficientemente ( Apéndice A, fig. 6A).

Cuenta con una columna de nivel de vidrio que permite ver el nivel de agua dentro de la caldera.

Además, cuenta con tres grifos de prueba distribuidos de arriba hacia abajo del control de nivel. El intermedio se encuentra en la interfase vapor-agua, el de arriba en franca zona de vapor y el de abajo en franca zona de agua.

#### g) Control de presión

El principio del control de presión es similar al de el control de nivel (inciso f). Consta de una cápsula de mercurio y de un fuelle que responde a los cambios de presión. Si la presión sube se abre el circuito de corriente eléctrica al quemador y si baja esta se cierra el circuito eléctrico que arranca el quemador (Apéndice A, fig. 7A).

#### h) Control de falla de flama

Se compone de un control electrónico y de una fotocelda (sensible a la radiación luminosa) que se encuentra en el quemador. Si la fotocelda no detecta flama el control de falla de flama corta la corriente al quemador. Mientras la fotocelda "vea" lumbre esta mantiene una señal al control de falla para que el quemador siga operando.

#### i) Tapón fusible

Es un tapón enroscado dentro de un orificio que se encuentra oradado en el espejo

trasero (dos pulgadas aprox.) por arriba de la última hilera superior de tubos flux (referirse al segundo párrafo de la sección 2.2). Este debe de estar cubierto por el agua de la caldera. El tapón está compuesto de una aleación que se funde a una temperatura determinada.

La función de dicho tapón es la de garantizar que el nivel de agua no se encuentre por debajo de los tubos flux, en dicho caso, el tapón se funde permitiendo la salida del vapor y produciendo un ruido fuerte con el fin de alertar al fogonero de la situación riesgosa impidiendo que ocurra una ruptura por expansión (desfluxamiento) de los tubos flux.

## **2.4 OPERACIÓN DE LA CALDERA**

### **2.4.1 SECUENCIA DE ARRANQUE**

a) Se revisa que el nivel de agua se encuentre visible en la columna de nivel. De no ser así NUNCA alimentar agua si la caldera se encuentra muy caliente y esperar hasta que se enfrie. Continuar con el siguiente paso. Este punto se discutirá más a fondo por su importancia (referirse a la sección 3.1).

b) Abrir las tres purgas por un lapso de 30 segundos para eliminar lodos y disminuir la concentración de sales en el agua de la caldera. Cerrarlas.

c) Subir el interruptor de la bomba de agua hasta que pare y ver que el nivel del agua se encuentre arriba de la última hilera de tubos flux. Esto se puede ver físicamente comparando el nivel del agua de la columna de vidrio contra una raya de fábrica que tiene el control de nivel.

d) Subir el interruptor del quemador

### **2.4.2 SECUENCIA DE PARO**

a) Con presión en la caldera abrir las tres purgas por 15 segundos. Cerrarlas

b) Bajar el interruptor del quemador seguido del interruptor de la bomba de agua.

## 2.5 CONCEPTOS BÁSICOS

### Caldera de Vapor

Es un equipo de servicio que produce vapor de agua con el objetivo fundamental de producir calor, además de poder almacenarlo por un periodo razonable de tiempo. Su operación se basa en las variables termodinámicas presión y temperatura.

#### 2.5.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA<sup>3</sup>

La producción de un generador de vapor se da comúnmente en kilogramos de vapor por hora. Esta manera de medir la capacidad no mide exactamente la energía producida. Más concretamente, la capacidad de una caldera de vapor debe expresarse en forma de calor total transmitido por la superficie de caldeo (o superficie de intercambio de calor) en kiloJoules por hora. Debido a que este valor es numéricamente grande la A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers por sus siglas) recomienda como unidades los kiloBtu o los megaBtu por hora<sup>4</sup>. El proceso de transmisión de calor en un generador de vapor es un proceso de flujo constante en el cual el calor transmitido es igual a la variación de la entalpía del fluido. En este caso, se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = m_s (h - h_f) [=] \text{KJ} / \text{hr} \quad (\text{o} \quad \text{KBtu} / \text{hr}) \dots \dots \dots (2.1)$$

donde:

Q = Calor producido

$m_s$  = flujo de vapor

h = Entalpía del vapor de agua a P y T de operación

$h_f$  = Entalpía del agua de alimentación a T de entrada.

<sup>3</sup>

id.

<sup>4</sup> The American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC 4.1 Steam Generating Units. New York. 1964. Reaffirmed 1985

### Capacidad Máxima

Es el valor de Q cuando en la fórmula 2.1 el flujo de vapor  $m_v$  es la cantidad máxima que la caldera puede producir.

### Capacidad Normal

Es el valor de Q cuando en la fórmula 2.1 el flujo de vapor  $m_v$  es la cantidad que la caldera puede producir más eficientemente.

### Potencia de una Caldera<sup>5</sup>

Esta definida por la cantidad de calor transmitido y aprovechado por el agua y vapor. La A.S.M.E. define el caballo caldera (HP o C.C.) como unidad de capacidad y es la evaporación de 15.6 kg/hr (35.5 lb/hr) partiendo de 100°C (212°F) a vapor de 100°C (212°F) en una hora a la presión atmosférica normal (1 atm.).

Para los que se pregunten de donde salieron estos valores para tal definición se debe a que la ASME establece en 1889 como base una máquina de vapor que empleaba 30 libras (13.62 Kg.) de vapor por hora a una presión de 4.9 kgf/cm<sup>2</sup> y con el agua de alimentación de la caldera a 38.5 °C. Esto corresponde a los valores del párrafo anterior.

Estas condiciones significan que el fluido absorberá una cantidad de calor igual a:

$$Q = 15.65 \text{ kg/hr} ( 2,675.1 - 417.5) \text{ kJoules/kg} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$Q = 15.65 * 2,257.6 = 35,331.44 \text{ kJoules/hr} ( 633.49 \text{ KBtu / hr} ) \dots\dots\dots(2.3)$$

Otras unidades de capacidad de caldera que se han utilizado para fines comparativos son el *factor de vaporización* y la *vaporización equivalente*.

<sup>5</sup> W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles *La Producción de Energía Mediante el Vapor de Agua, el Aire y los Gases*. Edit Reverté 1994 México.

### Factor de Vaporización

Relación entre el calor absorbido por 1 kg (1 lb) de agua de alimentación en las condiciones reinantes en la caldera y el absorbido por 1 kg (1 lb) de agua a 100°C (212 °F) al vaporizarla a 100°C (212 °F). De donde resulta,

$$\text{Factor de Vaporización} = (h - h_f) / 2,257.6 \dots\dots\dots(2.4)$$

[ en el Sistema Inglés:  $(h - h_f) / 2.14$  ]

### Vaporización Equivalente

Se define como los kg (lb) de agua por hora a 100°C (212 °F), que se vaporizan a 100°C (212 °F) si se hubiese absorbido la misma cantidad de energía que en las condiciones observadas en la caldera. Por lo tanto:

$$\text{Vaporización equivalente} = m_v (h - h_f) / 2,257.6 \dots\dots(2.5)$$

[ en el Sistema Inglés:  $m_v (h - h_f) / 2.14$  ]

### Potencia Nominal

Todas las calderas pequeñas están basadas en 0.93 m<sup>2</sup> (10 ft<sup>2</sup>) de superficie de caldeo por HP de caldera. Según este procedimiento todas las calderas que tengan la misma superficie de caldeo tienen la misma potencia nominal. La potencia nominal no expresa las limitaciones de capacidad de producción de vapor de las calderas; esto quiere decir, que para varias calderas con la misma potencia nominal, la capacidad normal (o potencia normal) puede ser diferente.

## **2.5.2 PÉRDIDAS DE CALOR EN LAS CALDERAS**

### **2.5.2.1 Pérdidas por carbono sin quemar contenido en las cenizas y escorias**

Esta pérdida se refiere al caso en que el combustible no se quema o se quema parcialmente y se deposita en el cenicero (la caldera del Laboratorio de Ingeniería química no tiene) o en las paredes del cañón y de los tubos flux como hollín. Se determina por medio de un análisis de laboratorio del hollín y por la cantidad que se haya recolectado del mismo. Esta pérdida depende de la mezcla aire-combustible. Para lograr una buena mezcla y disminuir esta pérdida es necesario tener una cantidad suficiente de aire de combustión, que la canasta difusora (o spin) (refierase al punto 2.3 de este capítulo) cree una buena turbulencia, que la boquilla aspersora de combustible se encuentre en buen estado y que ningún objeto interfiera con el flujo de combustible esparcido; además, debe de existir un tiro de chimenea suficiente.

### **2.5.2.2 Pérdidas por gases secos de combustión**

Esta es la principal pérdida y es el calor que se pierde por la chimenea. Depende de la superficie de caldeo (superficie de calentamiento) y de que ningún material aislante interfiera con esta misma superficie como pueden ser hollín adherido a las paredes de los tubos flux y/o incrustación de sales de calcio y magnesio adherida a las paredes de los mismos, pero por el lado del agua.

### **2.5.2.3 Pérdidas por contenido de agua en el combustible**

PEMEX garantiza un combustible con menos del 0.0005 % en peso de contenido de humedad en su combustible diesel, sin embargo, debido al manejo, transporte y a un mal almacenamiento del mismo este contenido de agua puede aumentar.

### **2.5.2.4 Pérdidas por la formación de agua de la combustión del hidrógeno contenido en el combustible.**

Esta pérdida suele ser la segunda en importancia y depende unicamente del tipo de

**combustible que se esté quemando.**

#### **2.5.2.5 Pérdidas por humedad en el aire de combustión**

Depende directamente de las condiciones climatológicas en el dado caso de que el aire no sea secado antes de la combustión.

#### **2.5.2.6 Pérdidas por vapor de atomizado**

Existen calderas que utilizan vapor para fluidizar un combustible viscoso y lograr una adecuada atomización del mismo que se mezcla con el aire y con el combustible. La caldera del Laboratorio no cuenta con este sistema.

#### **2.5.2.7 Pérdidas por la formación de monóxido de carbono**

Se presenta frecuentemente en cualquier combustión debido a una combustión incompleta.

#### **2.5.2.8 Pérdidas por hidrógeno sin quemar**

Esta pérdida esta relacionada con la pérdida por carbono sin quemar y se calcula por el contenido de hidrógeno del hollín (por análisis de laboratorio) y por la cantidad de hollín depositada en el cañón y los tubos flux.

#### **2.5.2.9 Pérdidas por hidrocarburos sin quemar**

Existen calderas que por su diseño no queman todo el combustible y se deposita en unos receptáculos *ex profeso*. Las calderas del tipo del Laboratorio de Ingeniería Química practicamente queman todo el combustible que se les suministra.



#### **2.5.2.10 Pérdidas por radiación y convección**

Son las pérdidas por el calor cedido por la caldera al medio circundante que está a la temperatura ambiente. Estas pérdidas se pueden evitar en gran medida forrando la caldera con un material aislante adecuado.

#### **2.5.2.11 Pérdidas por radiación al cenicero.**

Para las calderas que tienen cenicero (la del laboratorio de la Facultad de Química no tiene) es el calor que se pierde por calentar un cierto volumen de cenizas contenidas en este.

#### **2.5.2.12 Pérdidas por calor sensible en las partículas emitidas por la chimenea en los gases de combustión.**

Estas partículas pueden ser de hollín o de combustible. Esta pérdida se determina con el análisis de laboratorio a una muestra de gases de combustión.

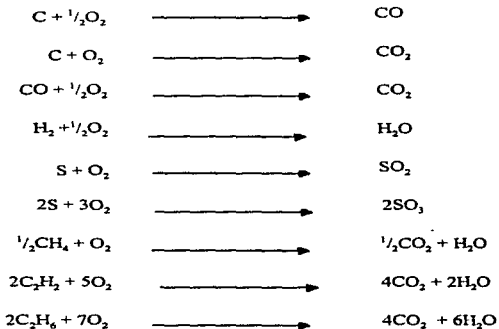
#### **2.5.2.13 Pérdidas por calor cedido a las paredes de enfriamiento de agua.**

No es el caso de una caldera de las características de la del Laboratorio de la Facultad de Química. Este tipo de calderas es muy grande y alivian la intensa radiación con paredes de agua.

### III. LA COMBUSTIÓN

La combustión es una oxidación violenta de una sustancia que contenga carbono, hidrógeno o azufre (o combinación de estos) llamada combustible al mezclarse con el oxígeno del aire. Esta lleva consigo desprendimiento de calor y luz <sup>1</sup>.

La combustión se efectúa en proporciones molares bien determinadas. Así pues, las reacciones químicas que ocurren en cualquier combustión son las siguientes:



Cualquier combustible sólido o líquido solamente empieza a quemarse hasta que el C, H o S o combinación de estos sean llevados al estado gaseosos mediante una fuente de calor externa (en nuestro caso un arco eléctrico).

<sup>1</sup> Manual Science de Calderas. 1976. México. Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.

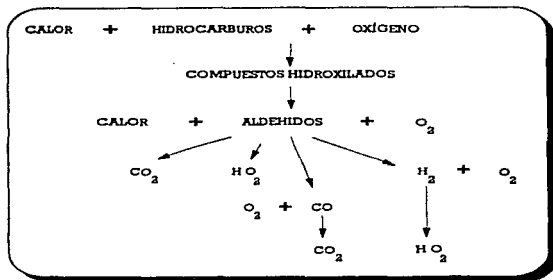
Una vez que se ha iniciado el proceso de la combustión, parte del calor producido se emplea en llevar al combustible de su estado natural líquido o sólido al gaseoso para poder continuar con la combustión. Es por esto que ocurre una mejor combustión en combustibles gaseosos que líquidos o sólidos.

De lo anterior se infiere que para que ocurra la combustión deben de presentarse cuatro elementos indispensables: un combustible en estado gaseoso, oxígeno, una fuente de calor externa de intensidad y cantidad adecuados y proporcionalidad entre combustible - oxígeno. Si uno de estos elementos falla, no se realiza la combustión.

En la mayoría de las aplicaciones industriales no tiene importancia el hecho en si de que se produzca una flama azul o una flama amarillenta, que la luminosidad sea intensa o no lo sea. Lo que hay que cuidar es que el combustible libere su máxima cantidad de calor.

En cualquier combustión de hidrocarburos apreciamos olores, con mayor o menor intensidad. Esto se debe a que es prácticamente imposible efectuar una combustión total de los combustibles ya que la mezcla hidrocarburos - aire se logra por medios mecánicos.

Cuando se queman hidrocarburos aparecen compuestos de radical hidroxilo (OH) que dan paso a aldehidos y que a su vez se combinan con el oxígeno del aire continuando con el proceso de la combustión (ver siguiente página).



Bajo condiciones ideales, para lograr la combustión completa son necesarios 11.5 Kg (25.35 lb) de aire por Kg (lb) de carbono contenidos en el combustible.<sup>2</sup>

En la realidad esto no es así ya que siempre se va a necesitar una mayor cantidad de aire debido a carencias mecánicas y a la naturaleza de los fluidos. A esta cantidad adicional de aire se le conoce como Exceso de Aire.

Para llevar al máximo la combustión es necesario tener control sobre el exceso de aire. Este debe de ser suficiente para evitar que queden productos de una mala combustión como el CO o el hollín que por un lado son perjudiciales, ambientalmente hablando, y por el otro, aún conservan energía que puede aprovecharse en la combustión para generar más calor.

Si se tiene un exceso de aire muy elevado el rendimiento de la caldera disminuye porque se calienta una cantidad innecesaria de aire que no interviene en la combustión y que escapa por la chimenea.

<sup>2</sup>

W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles. *La Producción de Energía Mediante el Vapor de Agua, el Aire y los Gases*. Edit. Reverté. 1994. México

Debe de tenerse muy presente que el diseño de un quemador, desde un mechero hasta un quemador industrial es una consecuencia de los principios fundamentales de la combustión.

### 3.1 PORQUÉ EXPLOTAN LAS CALDERAS

Puede ocurrir una explosión dentro de una caldera por solo dos razones: por acumulación de combustible en estado gaseoso o por acumulación excesiva de vapor.

En el primer caso lo que puede ocurrir es que se acumule en el hogar o cañón combustible en estado vapor o gaseoso y que este entre en ignición. Dependiendo de la cantidad acumulada será la magnitud de la explosión. Como medida de seguridad las calderas Cleaver Brooks (siendo esta la marca de la caldera de la Facultad de Química) cuentan en la parte trasera con un check de seguridad contra explosiones el cual, en el dado caso, se abre amortiguando así la explosión. Si la explosión es muy fuerte, pueden deformarse las puertas delantera y/o trasera dependiendo de la magnitud de la explosión. En la jerga de los fogoneros a este tipo de explosión se le conoce como "torito". En calderas que trabajan con combustibles sólidos o líquidos este tipo de explosiones no implican un gran peligro, no siendo así para calderas que trabajan con gas en donde la magnitud de la explosión puede ser mucho mayor implicando un riesgo para la planta; sin embargo, este tipo de calderas cuenta con un número mayor de controles y dispositivos de seguridad haciéndolas incluso más confiables que las anteriores.

La segunda causa de una explosión ocurre por una sobre acumulación repentina de vapor. Esta ocurre cuando dentro de la caldera no hay ni una gota de agua y los fluxes de la caldera se encuentran extremadamente calientes. Si por algún motivo se le suministra agua a la caldera esta explotará irremediablemente con consecuencias catastróficas. No olvidemos que una mol (lbmol) de cualquier sustancia en estado gas o vapor equivalen aproximadamente a 22.4 litros (0.79 ft<sup>3</sup>) a presión atmosférica (para gases ideales 22.4 litros a 1 atm.). Por esto, cada 18 gramos (0.63 oz.) de agua producirán 22.4 (0.79 ft<sup>3</sup>) litros de vapor y una bomba típica bajo estas condiciones introduce entre 0.5 y 0.7 Kg (1.1 y 1.5 lb) de agua por segundo<sup>3</sup>. Este es el riesgo más grande que se puede presentar en cualquier caldera.

<sup>3</sup> Catálogo de bombas marca Sentinel. Manufacturera TOSA, S.A. Mexico. 1996.

La primera lección que se le debe de dar a cualquier persona que vaya a operar una caldera es la siguiente: Si no se ve el nivel de agua en la columna de nivel de vidrio y la caldera se percibe caliente inmediatamente se deben de bajar todos los interruptores. El segundo paso es verificar por algún medio si la caldera tiene agua; si no es así, se debe esperar el tiempo que sea necesario a que la caldera se enfríe.

Este fenómeno ocurre muy pocas veces ya que las calderas cuentan con muchos dispositivos de seguridad mecánicos ,eléctricos y electrónicos al respecto, sin embargo, la falta de mantenimiento y de medidas de seguridad pueden llevar a un desastre de incommensurables consecuencias.

## IV. EL AGUA DE ALIMENTACIÓN

### 4.1 CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN<sup>1</sup>

Fundamentalmente, el agua de alimentación a la caldera contiene sales minerales, sólidos suspendidos como lodo y materia orgánica, oxígeno y bióxido de carbono disueltos. Para poder conocer las características fisicoquímicas del agua que en un momento dado afectan directamente al funcionamiento de la caldera se deben llevar a cabo los siguientes análisis:

- de pH - Se debe mantener lo mas neutro posible (pH de 7).
- de Dureza - Para determinar la concentración de sales de Calcio y Magnesio. Estas se pueden presentar en forma de carbonatos, sulfatos y cloruros.
- de Sólidos Totales Disueltos - Para conocer la concentración total de sales presentes. Para esto se recomienda el uso de un conductímetro eléctrico que da valores de conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- de Alcalinidad - Es representativa de la concentración de iones  $\text{OH}$ , y/o carbonatos y/o bicarbonatos.
- de Sólidos Suspendidos - Lodos y materia orgánica.

### 4.2 EL EFECTO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL EQUIPO EN CUESTIÓN

#### 4.2.1 INCRUSTACIÓN

Las sales que se encuentran contenidas en el agua son sales solubles, tales como bicarbonatos, sulfatos y cloruros de calcio, magnesio y sodio. Las sales de calcio y magnesio son las que causan la dureza del agua.

Al evaporarse el agua dentro de la caldera obtenemos, por un lado, vapor que, fuera

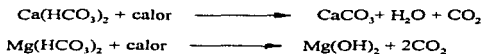
---

<sup>1</sup> Manual Selmes de Calderas - 1976. México. Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.

de la caldera, se condensa en agua casi pura, pero dentro de la caldera las sales y sólidos suspendidos (lodos y materia orgánica) se van acumulando. Cuando la acumulación de estas sales llega a un punto donde se sobrepasa el nivel de solubilidad, dan lugar a la precipitación con sedimentación formando capas de incrustación en las superficies calientes y también precipitándose lodos en el fondo de la unidad generadora.

El caso del sulfato de calcio, que es poco soluble a altas temperaturas, es típico en la formación de capas incrustantes dentro de las calderas, bastante difíciles de remover, dificultando, además, en forma muy marcada la transmisión de calor, que se refleja en sobrecalentamientos en las partes metálicas. Menos solubles aún son carbonato de calcio y magnesio y el silicato de calcio, los que se depositan en forma de incrustación con los mismos resultados.

Al aumentar la temperatura del agua dentro de la caldera se efectúa una descomposición de los bicarbonatos, los cuales en presencia de calcio y magnesio dan lugar a las siguientes reacciones:



El bicarbonato de calcio, es bastante soluble, pero se convierte en carbonato de calcio con una solubilidad muy baja, provocando incrustaciones y lodos muy poco desecables dentro de la caldera.

#### 4.2.2 ESPUMEO Y ARRASTRE

El espumeo se refiere a la condición en la operación de una caldera en la que se produce una espuma estable. La causa del espumeo se puede deber a una muy alta concentración de sales disueltas en la caldera o a la saponificación del agua de la caldera a través de una mezcla de aceite o grasa con una álcali.



Tanto el espumeo como el arrastre pueden ser el resultado de un nivel de agua muy alto o a un área de salida muy reducida.

El espumeo puede traer como consecuencia un vapor húmedo que incruste y corroa las tuberías, válvulas y dañe los equipos.

#### **4.2.3 CORROSIÓN<sup>2</sup>**

Esta también se puede deber a la presencia de  $\text{CO}_2$  y de oxígeno disueltos en el agua de alimentación. El oxígeno disuelto ataca el hierro formando hidróxido férrico. El  $\text{CO}_2$  lo podemos encontrar disuelto en el agua o se puede formar por la descomposición de los bicarbonatos en el agua, o bien, producirse sales de carbonato al elevarse la temperatura y combinado con el agua forma ácido carbónico que es un agente de corrosión bajo ciertas condiciones para metales férreos, aleaciones de níquel y aleaciones de cobre.

Ocasionalmente se presenta gas amoníaco disuelto que produce hidróxido de amonio el cual ataca las aleaciones de cobre comúnmente empleadas en válvulas.

#### **4.2.4 FRAGILIDAD CÁUSTICA**

La fragilidad cáustica es una de las situaciones más peligrosas en una caldera, dado que no es detectable ni se evidencia en ninguna forma aparente.

Es una falla intercrystalina en la estructura de la caldera que sucede cuando la caldera se somete a un esfuerzo más allá del límite elástico estando en contacto con soluciones cáusticas calientes y de alta concentración (que exceda un 10%).

Esta fragilidad ocurre en los bordes de las planchas remachadas de las calderas, es decir, en los remaches y porción metálica situada alrededor de las aberturas en donde el material

<sup>2</sup> Anthony L. Kohan & Harry M. Spring *Boiler Operator's Guide* Mc. Graw Hill, Third Edition, New York, 1994.

ha sido sometido a grandes esfuerzos de tracción durante los procesos de fabricación y funcionamiento.

#### **4.3 ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA**

El agua de alimentación es con la que se alimenta a una caldera para reponer la que se ha extraído en forma de vapor de descargas. Cuando existe un circuito cerrado para el retorno de condensados, el grado de incrustación se disminuye considerablemente ya que el condensado entra nuevamente a la caldera y únicamente se repone el agua que se pierde en el circuito. Cuando no existe retorno de condensados toda el agua que se evapora dentro de la caldera tiene que reponerse con el agua proveniente de la fuente de suministro.

Lo más recomendable es reutilizar el condensado, sin embargo, en ambos casos debe de existir un acondicionamiento adecuado del agua de alimentación y un tratamiento del agua dentro de la caldera, además de realizar purgas periódicas. Para lograr un tratamiento y acondicionamiento de agua adecuado debe de existir un sistema de monitoreo (toma de muestras) periódico.

##### **4.3.1 FILTRACIÓN**

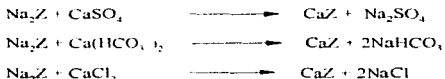
Los filtros mecánicos son muy usados para quitar las materias que el agua tiene en suspensión.

##### **4.3.2 SUAVIZACIÓN**

Existe un proceso frecuentemente usado para la suavización del agua de alimentación a calderas que es por intercambio iónico ciclo sódico, el cual es utilizado, debido a sus facultades y bajo costo de operación.

Los intercambiadores de este tipo contienen una resina a base de silicatos hidratados de sodio y aluminio (conocidas como zeolitas). Esta sustancia tiene la propiedad de absorber el calcio y magnesio de las aguas que la atraviesan, debido a que sus bases son permutables. De

esta manera, en el proceso de ablandamiento el sodio de la zeolita pasa a la solución en forma de carbonato, sulfato o cloruro, debido a que el calcio y magnesio del agua son absorbidos por la zeolita. Los cambios de bases son los siguientes:



(LO MISMO PARA EL MAGNESIO)

no formándose precipitado. El tratamiento con zeolita produce aguas con contenidos muy bajos de calcio y magnesio.

Cuando la zeolita se vuelve inerte se regenera mediante un lavado con salmuera para restituir el sodio por intercambio.



(LO MISMO PARA EL MAGNESIO)

Estos productos pueden soportar altas temperaturas, ácidos y álcalis.

El agua que atraviesa el lecho de zeolita debe estar libre de sólidos suspendidos los cuales tapan las partículas haciéndolas menos eficientes.

#### 4.3.3 TRATAMIENTO QUÍMICO DE AGUA

##### a) Disminución de la fragilidad cáustica<sup>3</sup>

El diseño y construcción de los cilindros de caldera soldados reduce el número de puntos focales en las costuras y agujeros de los roblones (remaches) como emplazamientos de fragilidad cáustica.

<sup>3</sup> Anthony L. Kohan & Harry M. Spring. *Boiler Operator's Guide*. Mc Graw Hill. Third Edition. New York. 1994

La sílice e hidróxido de sodio que son agentes de ataque localizado y que propician la fragilidad caustica se pueden combatir añadiendo nitrato de sodio, quebracho (específicamente la corteza de este árbol sudamericano por su contenido de tanino), tanino y sulfito residual.

b) Tratamiento de la dureza

Los condensados pueden introducir pequeñas cantidades de dureza a la caldera. Un fosfato soluble añadido a las salinas en cantidad suficiente para precipitar las sales de calcio y magnesio y mantener un exceso de fosfato, reaccionará con las sales precipitándola en una forma no adherible evitando así la formación de depósitos.

Los fosfatos más comunes son: fosfato monosódico y monosódico anhídrido, fosfato disódico y disódico anhídrido, fosfato trisódico y metafosfato de sodio.

c) Tratamiento del oxígeno disuelto

Una forma de eliminarlo es añadiendo sulfito de sodio a la caldera que al reaccionar con el oxígeno produce sulfato de sodio el cual no provoca corrosión.

#### **4.3.4 PURGAS**

En todos los métodos de tratamiento de aguas para caldera, excepto en la desmineralización y destilación, los sulfatos y cloruros no se remueven y aparecen como sales de sodio en el agua de alimentación. Las sales de estas aguas dentro de la caldera se concentran en las salinas. Sumado a lo anterior se tiene la precipitación de sólidos, lodos que también se van concentrando dentro de la caldera a medida que se va evaporando agua. Todo esto puede provocar recalentamientos y arrastre de las sales por espumeo o por priming (ebullición explosiva).

La manera de mantener la concentración de las sales dentro de los límites establecidos es purgar una cantidad requerida de ellas al drenaje periódicamente.

## **V. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE UN GENERADOR DE VAPOR POR EL MÉTODO DE PÉRDIDAS DE CALOR<sup>1</sup>**

La operación eficiente de una caldera ayuda a mantener los costos de operación de la unidad en el valor más bajo posible al igual que los niveles de emisiones contaminantes al medio. Por lo anterior, determinar la eficiencia térmica de la caldera en forma periódica y compararla con el valor garantizado de diseño, es un medio para saber si la operación del generador se mantiene en el punto óptimo económico y ecológico.

Por otro lado, del análisis de los resultados que se obtienen durante las mediciones y el cálculo de la eficiencia, en ocasiones es posible detectar algunos problemas que suelen presentarse en el generador de vapor como pueden ser mala combustión, baja recuperación de calor, fugas de calor excesivas, etc y en su caso, tomar las medidas preventivas o correctivas para lograr que la eficiencia térmica se mantenga en el valor más alto posible.

Para el cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor la A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) ha editado el código PTC 4.1 para aplicar dos métodos alternos de obtención de la eficiencia. Estos métodos son:

- a) Método de entradas y salidas y
- b) Método de pérdidas de calor.

El método de entradas y salidas, para obtener resultados confiables, necesita que los flujos de agua de alimentación, vapor y combustible, se midan con precisión. Estos parámetros en la actualidad, debido al tamaño de las unidades y la consiguiente cantidad de flujo asociada a ellos, tienen altos grados de dificultad para ser medidos con exactitud. Por lo tanto, los resultados que se obtienen con la instrumentación convencional que se utiliza en las plantas, no son confiables para una medición de tal importancia.

<sup>1</sup> Desarrollo Profesional en Tecnología Avanzada, A.C. Curso: Optimización de los Sistemas de Combustión de Calderas Instituto de Investigaciones Eléctricas Cuernavaca, Morelos México Octubre de 1988

Para obtener mediciones con el grado de exactitud requerido, es necesario invertir en instrumentación de calidad diferente a la convencional y contar con mayor disponibilidad del personal de operación para estas mediciones.

Por otro lado, el método de pérdidas de calor para el cálculo de la eficiencia, además de menos costoso, es de mayor sencillez en su aplicación y tiene algunas otras ventajas significativas, por ejemplo: proporciona más información sobre el estado de operación de la unidad, al comparar los valores individuales de las pérdidas con los valores esperados. Con respecto a la exactitud de los resultados, las pérdidas totales representan del 10 al 15% del calor total de entrada, por lo que un error o imprecisión en las mediciones afecta solo ligeramente el resultado final, a diferencia del método de entradas y salidas en donde un error o imprecisión similar tiene un efecto 4 ó 5 veces mayor.

Además esta la simplicidad para realizar las mediciones básicas que se utilizan para el cálculo de las pérdidas, dichas mediciones son: análisis y poder calorífico del combustible, temperatura de gases de salida, temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire a la entrada, y el análisis de gases a la salida.

Este método se basa en la información que hace posibles los cálculos para determinar todas las pérdidas involucradas y calores suministrados.

La eficiencia es igual al 100% menos un cociente expresado en por ciento. Este cociente es la suma de todas las pérdidas de calor como numerador y calor en el combustible más los créditos de calor en el denominador. ( sig. página Ec. 4)

La capacidad a la cual la unidad se probará se puede basar en el consumo de agua de alimentación en lugar de la medición del flujo de vapor.

## 5.1 FACTORES Y VARIABLES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA

Los factores y variables más importantes que tienen influencia sobre la eficiencia térmica del generador de vapor son las condiciones climatológicas: Temperatura ambiente y humedad relativa del aire.

## 5.2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROCEDIMIENTO

### 5.2.1. ALCANCE:

El procedimiento de cálculo de la eficiencia de un generador de vapor por el método de pérdidas de calor, está basado en el código PTC 4.1 ASME

### 5.2.2.OBJETIVO:

Determinar la eficiencia global de un generador de vapor, así como el régimen térmico bruto y el consumo específico del combustible.

### 5.2.3.DEFINICIONES:

Eficiencia global: ( $\eta_G$ ). La eficiencia global determinada dentro del alcance de este procedimiento, es la relación de calor absorbido por el fluido o fluidos de trabajo al calor total de entrada a la unidad.

$$\eta_G = \frac{\text{Calor de Salida (QS)}}{\text{Cal or total de entrada (QE)}} \dots\dots\dots(1)$$

$$QE = QS + QP \dots\dots\dots(2)$$

de donde:

$$\eta_G = \frac{(QE - QP)}{QE} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

$$\eta_G = 1 - (QP/QE) \times 100 \dots\dots\dots(4)$$

#### **CALOR TOTAL DE ENTRADA (QE):**

Es el calor desprendido durante las reacciones químicas de combustión del combustible (poder calorífico superior a presión constante PCSp) más los créditos por calor adicionado al fluido o fluidos de trabajo (aire, combustible, vapor, etc.) que cruzan los límites del balance de materia y energía del sistema (Ver fig. 1 siguiente página).

#### **CALOR DE SALIDA (QS):**

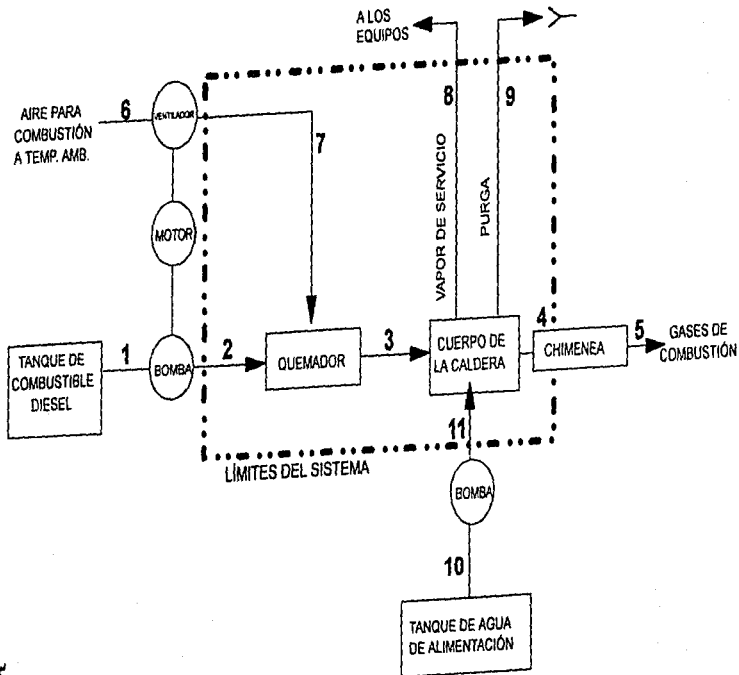
Se define como el calor absorbido por el fluido o fluidos de trabajo.

#### **APORTACIONES DE CALOR. (CC):**

Son aquellas cantidades de calor adicionado a la unidad de generación, diferentes de calor producido en la combustión del combustible. Estos créditos incluyen cantidades tales como: calor sensible en el combustible y en el aire de entrada, además de calor por conversión de potencia en equipos auxiliares (pulverizador de carbón, bombas de circulación ventiladores de aire y recirculador, etc.). En este caso, no existen estos créditos de calor debido a las características del equipo en cuestión.



FIG.1 DIAGRAMA DE LA CALDERA



#### **CALOR PERDIDO (QP):**

Es el calor que se rechaza o que no se absorbe por el fluido o fluidos de trabajo y que finalmente está constituido por todas las pérdidas de calor que disminuyen la eficiencia de generador de vapor.

En la figura no. 2 (siguiente página) se puede observar la relación que existe entre el calor de entrada, el calor de salida , las aportaciones y las pérdidas de calor.

#### **RÉGIMEN TÉRMICO BRUTO (RTB):**

Para propósitos de este procedimiento, el régimen térmico bruto se define como la relación de calor total de entrada (QE) a la potencia generada por la unidad (PG).

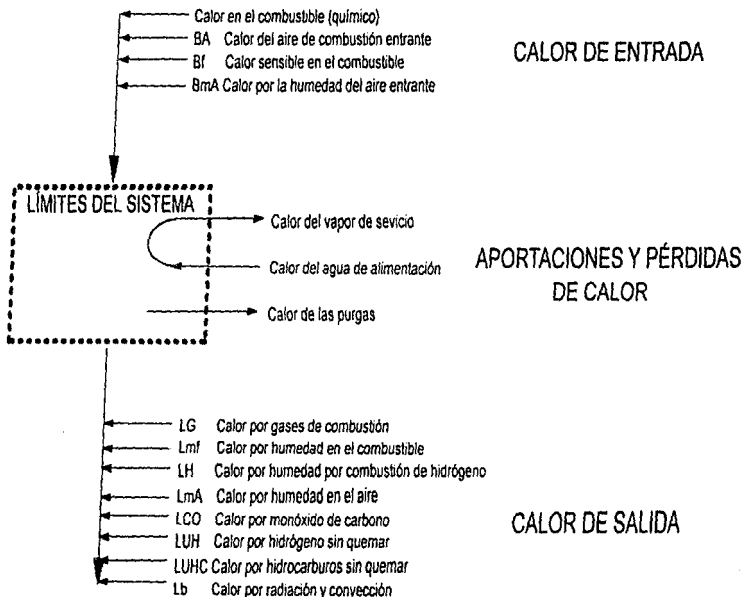
$$RTB=QE/PG.....(5)$$

#### **CONSUMO ESPECÍFICO DEL COMBUSTIBLE (CEC):**

Se define como la cantidad de combustible consumido para producir 1 kilowatt de potencia.

$$CEC=Cc/PG.....(6)$$

FIG. 2 DIAGRAMA DE CALOR EN EL SISTEMA



#### 5.2.4.CONDICIONES DE PRUEBA<sup>2</sup>

##### CAPACIDAD DE PRUEBA:

Con el objetivo de tener referencia de los resultados de la prueba con el valor de eficiencia garantizado, la prueba de eficiencia se llevó acabo a la capacidad de diseño de la unidad o lo más cercano posible a ella, cuidando que los parámetros de operación del sistema de combustión (exceso de aire, presión diferencial cajas de air-hogar (unidades tangenciales) y la carga de la unidad (PG) permanecieran constantes durante la prueba.

##### CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS:

Para esta prueba de eficiencia las mediciones obtenidas fueron tomadas por el tesista en cuestión y por personal de la Compañía Calderas y Control.

Para asegurar la obtención de resultados confiable, el personal que participó en las pruebas fue capacitado para su entendimiento y aplicación de manera que realizó correctamente la función que se le asignó durante las mediciones. Los cálculos fueron realizados por el tesista con ayuda de su asesor.

La frecuencia de las lecturas fueron en intervalos de 15 minutos.

Se tomarón lecturas de temperatura cada media hora y presión cada 15 minutos durante el tiempo que duró la prueba, las lecturas de consumo de combustible y agua de alimentación se tomaron cada hora durante la prueba.

Los valores, que se tomaron para los cálculos fueron el promedio de las lecturas. Durante la prueba se evitó lá limpieza de la caldera.

---

<sup>2</sup> The American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC 4.1 Steam Generating Units. New York. 1964. Reaffirmed 1985.

#### **DURACIÓN DE LA PRUEBA:**

Para determinar la eficiencia con la mayor confiabilidad posible, la duración de la prueba fué de 4 horas para la primera corrida y de 2 horas para la segunda corrida. Al inicio, hubo que esperar 2 horas para garantizar que el material refractario alcanzara al igual que la carga de la unidad y que los parámetros del sistema de combustión permanecieran constantes.

#### **CREDITOS DE CALOR:**

Antes de iniciar la prueba, fué necesario confirmar la existencia o ausencia de créditos de calor debido a entradas al sistema diferentes del calor liberado por el combustible utilizado. Y estos créditos no se encontraron.

#### **REPORTE DE LA PRUEBA:**

Todas las observaciones, mediciones y lecturas de instrumentos requeridos para la prueba, se registraron como se observaron.

### **5.3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO**

#### **GENERALIDADES:**

El método de cálculo de la eficiencia de generadores de vapor por pérdidas de calor, se basa en la información segura y completa, que hace posible calcular las pérdidas y los créditos de calor para la unidad.

La secuencia de cálculo parte de los datos y mediciones que se vivieron durante la prueba, así como de la información necesaria para realizar los cálculos que darán los resultados que se plantearon como objetivo.

## DATOS Y MEDICIONES

### ANÁLISIS DEL COMBUSTIBLE (% EN PESO):

Se le solicitó a la compañía que surte el combustible diesel su procedencia para así pedir al IMP las características fisicoquímicas del mismo como son: el contenido de C, H, S, N, H<sub>2</sub>O, cenizas, etc. y su poder calorífico superior (PCS)

### ANÁLISIS DE LOS GASES DE SALIDA DEL GENERADOR DE VAPOR:

(%volumen en la Chimenea).

El análisis de gases de combustión se realizó con los aparatos de medición y técnicas de muestreo especificados por la norma ecología NOM-085-ECOL-94. Con este análisis se determina el contenido de O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, Partículas y N<sub>2</sub> (por diferencia).

Los equipos de medición utilizados fueron los siguientes:

- Para CO: Bacharach Monoxor II.
- Para O<sub>2</sub> y CO: Bacharach Fyrite II.
- Para Mancha de humo: Bacharach Oil Burner Smoke Pump

### TEMPERATURAS:

Para la temperatura de gases de combustión. Se tomó en el mismo punto de muestreo utilizado en el análisis de los gases para minimizar el efecto de estratificación de los gases en el ducto.

### TEMPERATURA DE AIRE PARA COMBUSTIÓN

Las lecturas de temperatura de bulbo seco (TBS) y bulbo húmedo (TBh) se tomaron en la succión del ventilador del quemador.

## TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE

Las temperaturas del diésel se tomaron en los puntos que se indican en la figura 2 que corresponde al cálculo de créditos de calor por temperatura del combustible.

## PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Esta se tomó hirviendo agua en la ciudad de México dándonos para una temperatura de 93.5°C una presión de vapor de 0.789 atmósferas (11.6 psia)

## ANÁLISIS DE PARTÍCULAS NO QUEMADAS, (% de C):

Las partículas que se recolectan con el equipo isocinético se deben analizar para obtener el contenido de carbón (C) que se utiliza en el cálculo de pérdidas por partículas no quemadas. Como no se dispuso de los medios para efectuar el análisis de partículas, se manejó un exceso de aire promedio del 32.8% para garantizar que la mancha de humo diera un valor de cero y considerar esta pérdida de calor como despreciable.

### 5.4 MATERIAL EMPLEADO:

- Un analizador de gases de CO marca Bacharach modelo Monoxor II.
- Un analizador de gases de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> marca Bacharach modelo Fyrite II.
- Un equipo de medición de mancha de humo Bacharach del tipo Oil Burner Smoke Pump.
- Un tanque de alimentación de agua cubicado.
- 2 cubetas de 20 l aproximadamente.
- Un psicrómetro.
- Un termómetro de 50 a 400 °C.
- Un termómetro de -20 a 150 °C.
- Un Cronómetro.
- Una probeta de 2 l.
- Un porrón de 60 l cubicado para medir el consumo de combustible.

## 5.4 CÁLCULOS A REALIZAR<sup>1</sup>

5.1 Eficiencia:  $n_g = 100 - \frac{L}{H_i + B} * 100$

L = pérdidas totales de calor

5.2  $L = L_{UC} + L_{CG} + L_{mf} + L_A + L_{m\Lambda} + L_z + L_{CO} + L_{NH_3} + L_{NH_4C} + L_p + L_p + L_d + L_r + L_w$

5.3  $L_{UC}$  = Pérdidas de calor por combustible sin quemar [=] Btu perdidos / lb de combustible

Esta pérdida es despreciable ya que este tipo de calderas quema prácticamente todo el combustible.

5.4  $L_{CG}$  = Pérdidas de calor por gases de combustión [=] Btu perdidos / lb de combustible

$$L_{CG} = W_G * C_{PG} (t_G - t_{RA})$$

donde:

$$W_G = \frac{\text{lb de gas seco}}{\text{moles de gas seco}} * \frac{1}{\frac{\text{lb de carbón}}{\text{moles de gas seco}}} * \frac{\text{lb de carbón}}{\text{lb de combustible}} = \frac{\text{lb de gas seco}}{\text{lb de combustible}}$$

de esta se obtiene:

$$W_G = \frac{44.01 \text{ CO} + 32.00 \text{ O}_2 + 28.02 \text{ N}_2 + 28.01 \text{ CO}}{12.01 (\text{CO}_2 + \text{CO})} * (\text{Cb} + \frac{12.01 \text{ S}}{32.07})$$

$$W_G [=] \frac{\text{lb de gas seco}}{\text{lb de combustible}}$$

$\text{CO}_2$ , CO y  $\text{O}_2$  = del análisis de los gases de combustión [=] %v

<sup>1</sup> En esta sección las unidades se manejan en el sistema inglés porque así es como viene en el código ASME de Prueba de Potencia.  
The American Society of Mechanical Engineers. ASME PTC 4.1 Steam Generating Units. New York. 1964. Reaffirmed 1985



El  $N_2$  se calcula por diferencia. Los pesos moleculares en esta fórmula son de 4 dígitos para disminuir el error al hacer los cálculos<sup>2</sup>.

$$C_b = C - \frac{Wd'p' \cdot Hd'p'}{14,500} \quad [ - ] \text{ lb de carbón quemado / lb de combustible}$$

donde:

$$Wd'p' = \frac{\text{lb de combustible no quemado} \quad [ - ] \quad \text{lb}}{\text{lb de combustible} \quad \text{lb}}$$

$$Hd'p' = \frac{\text{Btu del combustible (análisis de laboratorio del combustible)} \quad [ - ] \quad \text{Btu / lb}}{\text{lb de combustible}}$$

14,500 = Poder calorífico en Btu's de 1 lb de carbón.

Como:

$Wd'p'$  es prácticamente cero todo ese término se elimina y nos queda:

$$C_b = C \text{ (de análisis de laboratorio del combustible)} \quad [ - ] \quad \% \text{p} \dots\dots\dots (8.4.1)$$

donde:

$$C = \frac{\text{lb de carbón del combustible quemado (análisis de lab. del combustible)} \quad [ - ] \quad \% \text{p}}{\text{lb de combustible}}$$

$$S = \frac{\text{lb de azufre (análisis de laboratorio del combustible)} \quad [ - ] \quad \% \text{p}}{\text{lb de combustible}}$$

$C_{pO}$  = calor específico promedio de los gases de combustión (Fig. 7) [ = ] Btu/lb °F

$t_g$  = temperatura de los gases de combustión [ - ] °F

$t_{RA}$  = temperatura de referencia (temperatura de alimentación del agua) [ = ] °F

5.5  $L_{mf}$  = Pérdidas de calor por humedad en el combustible

$$L_{mf} = m_i ( h_v - h_{RW} ) \quad [ - ] \quad \text{Btu perdidos / lb de combustible}$$

donde:

$$h_v = \text{Entalpia de vapor a la presión parcial } P_{mf}, \text{ y temperatura de los gases de combustión} \\ t_g \text{ de tablas de vapor} \quad [ - ] \quad \text{Btu / lb} \dots\dots\dots (8.5.1)$$

<sup>2</sup> National Bureau of Standards, Circular 564-11 Enero 1955

$P_{mO}$  = presión parcial del agua en los gases de combustión [=] lb / in<sup>2</sup>

$$P_{mO} = \frac{P_A}{1 + 100 \cdot \frac{1.5 C_b}{m_O (CO_2 + CO)}}$$

$P_A$  = presión atmosférica [=] lb / in<sup>2</sup>

$C_b$  = referase a la ecuación (8.4.1)

$m_O$  = 8.936 H + ( $W_{m_A}$ ) ( $W_A$ ) +  $m_r$  +  $W_r$  +  $m_p$  [=] lb de agua en los gases de combustión  
lb de combustible quemado

8.936 = lb de agua producidas por quemar 1 lb de combustible

H = lb de hidrógeno del agua del combustible quemado / lb de combustible.....(8.5.2)

$W_{m_A}$  [=] lb de agua del aire de combustión / lb de aire seco de combustión

$$W_{m_A} = \frac{\text{presión parcial del agua}}{\text{presión total} - \text{presión parcial del agua}} \cdot \frac{P_{\text{M agua}}}{P_{\text{M aire}}} \dots\dots\dots(8.5.3)$$

$W_A$  [=] lb de aire seco / lb de combustible

$$W_A = \frac{28.02 (N_2) \cdot (C_b + \frac{12.01 S}{32.07})}{\frac{12.01 (CO_2 + CO)}{0.7685}} - N \dots\dots\dots(8.5.4)$$

$C_b$  = referase a la ecuación (8.4.1)

N = por diferencia del análisis de los gases [=] %v

S = lb de azufre por lb de combustible (del análisis de laboratorio del combustible) [=]

%p

CO<sub>2</sub> y CO = del análisis de los gases de combustión [=] %v

0.7685 = lb de nitrógeno por lb de aire standard<sup>3</sup>

$m_r$  [=] lb de humedad por lb de combustible

$W_v = [=]$  lb de vapor de atomizado por lb de combustible (este término se elimina)

$m_p = [=]$  lb de humedad evaporadas en el cenicero por lb de combust (este término se elimina)

$h_{Rw} =$  entalpia del liquido saturado a la temp. de referencia  $t_{RA} [=]$  Btu / lb.....(8.5.5)

5.6  $L_{H_2} =$  pérdidas de calor por agua producida por la combustión del hidrógeno del combustible

$$L_{H_2} = 8.936 * H ( h_4 - h_{Rw} ) [=] \text{ Btu perdidos / lb de combustible}$$

donde:

8.936 = es la cantidad de agua producida por quemar una lb de hidrógeno

H = referirse al término (8.5.2)

5.7  $L_{mA} =$  pérdidas de calor por humedad en el aire

$$L_{mA} = W_{mA} * W_A ( h_4 - h_{Rw} )$$

donde:

$W_{mA} =$  referirse a la ecuación (8.5.3)

$W_A =$  referirse a la ecuación (8.5.4)

$h_4 =$  referirse al término (8.5.1)

$h_{Rw} =$  referirse al término (8.5.5)

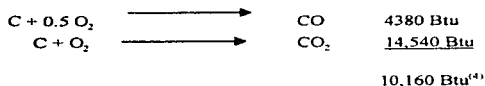
5.8  $L_{CO} =$  Pérdidas de calor por la formación de monóxido de carbono

$$L_{CO} = \frac{CO}{CO_2 + CO} * 10160 * C_b$$

donde:

CO y  $CO_2$  = del análisis de los gases de combustión [=] %v

10160 = Btu generados al quemar 1 lb de carbón a CO y  $CO_2$  :



Cb = referirse a la ecuación (8.4.1)

**5.9  $L_{UH}$  = Pérdidas de calor por hidrógeno sin quemar**

Esta pérdida la consideramos como despreciable. Fundamentalmente por el hecho de manejar un exceso de aire sobrado y por el diseño de la caldera y el quemador.

**5.10  $L_{UHC}$  = Pérdidas de calor por hidrocarburos sin quemar**

Esta pérdida es despreciable ya que este tipo de calderas quema prácticamente todo el combustible y por el exceso de aire que estamos manejando.

**5.11  $L_p$  = Pérdidas de calor por radiación y convección superficial**

Para esta pérdida y considerando el tipo y la capacidad de esta caldera se tomó un valor de 2%<sup>5</sup>.

**5.12  $L_{pr}$  = Pérdidas por radiación al cenicero**

Esta pérdida se considera inexistente por esta caldera carecer de este componente.

**5.13  $L_r$  = Pérdidas de calor por partículas en los gases de combustión**

Esta pérdida es despreciable porque manejamos un exceso de aire que garantiza un mínimo de partículas en los gases de combustión.

---

<sup>4</sup> Fuels & Combustion Handbook Johnson & Auth. Publicado por Mc Graw Hill Book Co.  
<sup>5</sup> Manual Selmec de Calderas. 1976. México. Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.

**5.14  $L_r$  = Pérdidas de calor en los desechos del pulverizador**

Esta pérdida es inexistente en esta caldera.

**5.15  $L_w$  = Pérdidas de calor por agua de enfriamiento de la caldera**

Esta pérdida es inexistente en esta caldera.

**5.16 Resumiendo las pérdidas de calor:**

$$L = L_{cv} + L_{nr} + L_{rl} + L_{exh} + L_{co} + L_p$$

PRIMERA CORRIDA DEFINITIVA (unidades en el Sistema Inglés)

	PRON																	
Tiempo (hr:min)	00:00	00:15	00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	01:45	02:00	02:15	02:30	02:45	03:00	03:15	03:30	03:45	04:00	04:30
P vapor (lb/in <sup>2</sup> )	74	76.1	69.7	69.7	74	76.8	65.4	74.7	69.7	65.4	78.2	74	65.4	75.4	78.2	79.7	66.9	72.5
T vapor (°F)	266	266	266	266		266		266	261		266		266	266		266		266
T agua (°F)	60.8				61.7				62.6				63.5				63.5	62.4
T ambient (°F)	62.6					66.2			66.2			66.2			68			65.8
T aire comb. (°F)	62.6								66.2				69.8					70.7
T combust (°F)	66.2				64.4				66.2				66.2					66.2
G combust. (gal.)	0				3.43				6.6				10					13.2
G agua (gal.)	0				34.2				70.7				111					143
T ts (°F)	63.5					65.3				67.1				68				69.8
T bh (°F)	58.1					58.1				57.7				57.2				57.2
T gases (°F)	423		442	414			424		426				419				424	425
Exceso aire (%)	32		31				33		33				34				34	32.8
O <sub>2</sub> (%v)	5.4		5.3				5.6		5.5				5.7				5.7	5.53
CO <sub>2</sub> (%v)	11.5		11.6				11.4		11.4				11.3				11.3	11.4
CO (%v)	52		61				64		68				64				63	62
*Mancha	0		0				0		0				0				0	0

\*Mancha: Medición del contenido de partículas suspendidas en los gases de combustión

**SEGUNDA CORRIDA DEFINITIVA (unidades en el Sistema Inglés)**

	PRON									
Tiempo (hr:min)	00:00	00:15	00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	01:45	02:00	02:00
P vapor (lb/m <sup>2</sup> )	70	71	57	75	71	64	74	68	64	68
T vapor (°F)	266		257		266		266		266	264
T agua (°F)	63				64				65	64
T ambient. (°F)	72				71				72	71
T aire comb. (°F)	73				72				73	73
T combust. (°F)	67		68				68		70	68
G combust. (gal.)	0		2.1		3.3		5.3		6.7	6.7
G agua (gal.)	0		25		36		56		73	73
T bs (°F)	71					70				70
T bh (°F)	59					60				59
T gases (°F)	423			435				428		429
Exceso aire (%)	32			30				29		30
O <sub>2</sub> (%v)	5.4			5.2				5.1		5.2
CO <sub>2</sub> (%v)	12			12				12		12
CO (%v)	82			95				95		91
Mancha	0			0				0		0

\*Mancha: Medición del contenido de partículas suspendidas en los gases de combustión.

**PRIMERA CORRIDA DEFINITIVA (unidades en el Sistema Métrico)**

	PRON																		
Tiempo (hr.min)	00:00	00:15	00:30	00:45	01:00	01:15	01:30	01:45	02:00	02:15	02:30	02:45	03:00	03:15	03:30	03:45	04:00	04:00	
P vapor (Kg/cm2)	52	53	49	49	52	54	46	52	49	46	55	52	46	53	55	56	47	51	
T vapor (°C)	130	130	130	130	130		130		127		130		130		130		130		
T agua (°C)	16				16.5				17				17.5				17.5	16.9	
T ambient (°C)	17					19			19			19			20			18.8	
T aire comb. (°C)	17								19				21				21.5	19.6	
T combust (°C)	17				18				19				19					19	18.4
G combust. (litros)	0				13				25				38					50	50
G agua (litros)	0				130				268				420					540	540
T bs (°C)	17.5					18.5			19.5					20				21	19.3
T bh (°C)	14.5					14.5			14.3					14				14	14.3
T gases (°C)	217		228	212			218		219				215				218		218
Eficiencia (%)	85		84.7				85		85				85.1				84.9		85
Pérdidas (%)	15		15.3				15		15				14.9				15.1		15.1
Exceso aire (%)	32		31				33		33				34				34		32.8
O2 (%v)	5.4		5.3				5.6		5.5				5.7				5.7		5.53
CO2 (%v)	11.5		11.6				11.4		11.4				11.3				11.3		11.4
CO (%v)	52		61				64		68				64				63		62
*Mancha	0		0				0		0				0				0		0

\*Mancha Medición del contenido de partículas suspendidas en los gases de combustión



**SEGUNDA CORRIDA DEFINITIVA (unidades en el Sistema Métrico)**

	PROM									
	00 00	00 15	00 30	00 45	01 00	01 15	01 30	01 45	02 00	02 00
Tiempo (hr:min)										
P vapor (Kg /cm2)	4.9	5	4	5.3	5	4.5	5.2	4.8	4.5	4.8
T vapor (°C)	130		125		130		130		130	129
T agua (°C)	17				18				19	17.7
T ambient. (°C)	22				22				22	21.8
T aire comb. (°C)	23				22				23	22.7
T combust (°C)	20		20				20		21	20.1
G combust. (litros)	0		8		13		20		26	25.5
G agua (litros)	0		96		136		211		276	276
T bs (°C)	22					21				21.3
T bh (°C)	15					16				15.3
T gases (°C)	217			224				220		220
Eficiencia (%)	85			85				85		85.1
Pérdidas (%)	15			15				15		14.9
Exceso aire (%)	32			30				29		30.3
O2 (%v)	5.4			5.2				5.1		5.23
CO2 (%v)	12			12				12		11.6
CO (%v)	82			95				95		90.7
*Mancha	0			0				0		0

\*Mancha: Medición del contenido de partículas suspendidas en los gases de combustión.

**HOJA DE PRUEBA DEL CÓDIGO ASME  
POR EL MÉTODO ABREVIADO DE CÁLCULO DE EFICIENCIA  
(unidades en el Sistema Inglés)**

PRUEBA No. 1 CALDERA No. 1 FECHA: JUE 17 ABRIL DE 1947  
 PROPIETARIO: FACULTAD DE QUÍMICA LOCALIZACIÓN: FACULTAD DE QUÍMICA CIUDAD UNIVERSITARIA  
 PRUEBA DIRIGIDA POR: J. CARLOS PORTILLO OBJETIVO DE LA PRUEBA: EFICIENCIA ACTUAL DURACIÓN: 4 HORAS  
 TIPO Y CAP DEL QUEM.: INTEGRAL CAPACIDAD PROMEDIO: 50 HP  
 MCA Y TIPO DE CALD.: CLEAVER BROOKS TIPO MONITOR: MODELO N 10040

**PRESIÓN Y TEMPERATURAS**

1	P DEL VAP EN CUERPO	72.55	psia
6	TEMP DEL AGUA ENT	62.42	F
10	TEMP AMBIENTE	65.84	F
11	TEMP ARC COMBUST	67.33	F
12	TEMP DEL COMBUST	65.12	F
13	TEMP DE LOS GASES	424.65	F

**DATOS**

15	H LÍQUIDO SATURADO	285.7	Btu/lb
16	H VAPOR SATURADO	1184	Btu/lb
17	H AGUA DE ALIM	30.67	Btu/lb
20	Q ABSORBIDO VAP	1153.33	Btu/lb
25	Q ASESORADO COMBUST CALM	18.83291	106p

**MEDICIONES DE CONSUMO**

26	AGUA EVAPORADA	297.68	lb/hr
28	CANT COMBUST QUEMADO	23.73	lb/hr
29	Q TOTAL ENT	457.989	kBtu/hr
31	Q TOTAL DE SALIDA	343.3233	kBtu/hr

**ANÁLISIS DE LOS GASES DE EMISIÓN**

32	CO <sub>2</sub>	11.42	% VOL
33	O <sub>2</sub>	5.53	% VOL
34	CO	0.063	% VOL
35	N <sub>2</sub> (DIFERENCIA)	82.987	% VOL
36	EXCESO DE AIRE	32.83	%

**DATOS DEL COMBUSTIBLE**

51	FLASH POINT	41 C min.
52	GRAVEDAD ESPECIFICA	0.861
53	VISCOSIDAD A 37.8 C	32/40 seg.
44	HIDROGENO TOTAL	13.41 %p
41	Btu/lb	19,300

**ANÁLISIS ÚLTIMO DEL DIESEL**

43	CARBÓN %p	86.34
44	HIDROGENO %p	13.41
45	OXIGENO %p	0
46	NITROGENO %p	0.036
47	AZUFRE %p	0.12
40	CENIZAS %p	0.01
37	HUMEDAD %p	0.0005
	TOTAL	99.9165

**EF. POR PÉRDIDAS DE Q (Btu/lb de C.Q.)**

65	POR EMISIONES	8.612
66	POR HUM EN EL COMBUST	0.003
67	H <sub>2</sub> O POR COMBUST DEL H <sub>2</sub>	7.564
69	POR RADIACION	2.000
70	OTRAS PERDIDAS	2.402
71	TOTAL	20.581
72	EFICIENCIA	79.419

### HOJA DE CÁLCULOS (unidades en el Sistema Inglés)

PROPIETARIO FACULTAD DE QUÍMICA PRUEBA No. 1 CALDERA No. 1 FECHA JUE 17 ABRIL DE 1997

<b>25</b>	GAS SECO LB DE COMBUSTIBLE QUEM	$(1.002+0.02 \cdot H_2+0.01 \cdot CO) \cdot LB \text{ DE CARBON QUEM} + LB \text{ DE COMBUST} \cdot 3/8 \cdot 9)$ $(3.002+0.0)$	<b>18.83291</b>
<b>36</b>	EXCESO DE AIRE =	$100 \cdot \frac{O_2-CO/2}{O_2+2N_2+100-CO/2}$	<b>32.80999</b>

#### EFICIENCIA POR PÉRDIDAS DE CALOR

		Btu/lb de COMBUSTIBLE QUEM.	PÉRDIDA %
<b>65</b>	PERDIDAS POR GASES SECCOS LB DE GAS SECO LB DE COMBUSTIBLE QUEM	$\cdot Cp \cdot (T_{gas\ secos} - T_{aire})$ =	<b>1,662.16</b> <b>8.612</b>
<b>66</b>	POR HUMEDAD DEL COMBUST. LB DE COMBUSTIBLE QUEM	$\cdot (ENTALPIA \text{ VAPOR A } 1 \text{ PSIA Y } T_{gas\ secos})$ - $(ENTALPIA \text{ LIQUIDO A } T_{aire})$ =	<b>0.61</b> <b>0.003</b>
<b>67</b>	POR H2O DE COMBUST. H2 9H2O	$\cdot (ENTALPIA \text{ DE VAPOR A } 1 \text{ psia Y } T_{gas\ secos})$ - $(ENTALPIA \text{ DEL LIQUIDO A } T_{aire})$ =	<b>1,459.77</b> <b>7.564</b>
<b>69</b>	POR RADIACION LB DE COMBUSTIBLE QUEMADO	(PÉRDIDAS TOTALES POR RADIACION) (Btu) / (H) =	<b>386.00</b> <b>2.000</b>
<b>70</b>	OTRAS PERDIDAS	=	<b>463.57</b> <b>2.402</b>
<b>71</b>	TOTAL	=	<b>3,972.10</b> <b>20.581</b>
<b>72</b>	EFICIENCIA = (120 - ARTICULO 71)	=	<b>79.419</b>

**HOJA DE PRUEBA DEL CÓDIGO ASME  
 POR EL MÉTODO ABREVIADO DE CÁLCULO DE EFICIENCIA**  
 (unidades en el Sistema Métrico)

PRUEBA No	1	CALDERA No	1	FECHA	JUE 17 ABRIL DE 1997
PROPIETARIO	FACULTAD DE QUÍMICA	LOCALIZACIÓN	FACULTAD DE QUÍMICA CIUDAD UNIVERSITARIA		
PRUEBA DIRIGIDA POR	J. CARLOS PORTILLO	OBJETIVO DE LA PRUEBA	EFICIENCIA ACTUAL	DURACIÓN	4 HORAS
TIPO Y CAP DEL QUEM	INTEGRAL	CAPACIDAD PROMEDIO	60 H P		
MCA Y TIPO DE CALD	CLEAVER BROOKS	TIPO MONITOR	MODELO M 100 60		

**PRESIÓN Y TEMPERATURAS**

1	P. DEL VAP. EN CUERPO	5.1	kgf/cm <sup>2</sup>
8	TEMP. DEL AGUA ENT.	16.9	°C
10	TEMP. AMBIENTE	18.8	°C
11	TEMP. AIRE COMBUST.	19.6	°C
12	TEMP. DEL COMBUST.	18.4	°C
13	TEMP. DE LOS GASES	218.1	°C

**DATOS**

15	H. LÍQUIDO SATURADO	664.5382	kJ/kg
16	H. VAPOR SATURADO	2753.984	kJ/kg
17	H. AGUA DE ALIM.	71.33842	kJ/kg
20	Q. ABSORBIBLE VAP.	6239.834	kJ/kg
25	GAS QUE COMBUSTIONA W	18.83291	kg/kg

**MEDICIONES DE CONSUMO**

26	AGUA EVAPORADA	135.0276	kg/hr
28	CANT. COMBUST. QUEMADO	10.76393	kg/hr
29	Q. TOTAL ENT.	509788.8	kJ/hr
31	Q. TOTAL DE SALIDA	888890.3	kJ/hr

**ANÁLISIS DE LOS GASES DE EMISIÓN**

32	CO <sub>2</sub>	11.42	% VOL.
33	O <sub>2</sub>	5.53	% VOL.
34	CO	0.063	% VOL.
35	N <sub>2</sub> (DIFERENCIA)	82.987	% VOL.
36	EXCESO DE AIRE	32.83	%

**DATOS DEL COMBUSTIBLE**

31	FLASH POINT	41 C min.
52	GRAVEDAD ESPECÍFICA	0.861
53	VISCOSIDAD A 37.8 C	32/40 seg.
44	HIDROGENO TOTAL	13.41 %p
41	kJ/kg	44,892

**ANÁLISIS ÚLTIMO DEL DIESEL**

43	CARBÓN %p	86.34
44	HIDROGENO %p	13.41
45	OXIGENO %p	0
46	NITROGENO %p	0.036
47	AZUFRE %p	0.12
40	CENIZAS %p	0.01
37	HUMEDAD %p	0.0005
	TOTAL	99.9165

**EF. POR PÉRDIDAS DE Q (kJ/kg de C.Q.)**

63	POR EMISIONES	8.611
66	POR HUM. EN EL COMBUST.	0.003
67	H <sub>2</sub> O POR COMBUST. DEL H <sub>2</sub>	7.563
69	POR RADIACIÓN	2.000
70	OTRAS PÉRDIDAS	2.402
71	TOTAL	20.580
72	EFICIENCIA	79.420

### HOJA DE CÁLCULOS (unidades en el Sistema Métrico)

PROPIETARIO FACULTAD DE QUIMICA PRUEBA No. 1 CALDERA No. 1 FECHA JUE 17, ABRIL DE 1992

25 GAS SECO =  $11CO_2 + 8O_2 + 7N_2 + CO$  \* (kg DE CARBÓN QUEM / LB DE COMBUST - 3/8 S) = 18.83291

kg DE COMBUSTIBLE QUEM  $3(CO_2 + CO)$

36 EXCESO DE AIRE =  $100 * \frac{O_2 - CO / 2}{0.2682N_2 - (CO_2 + CO / 2)}$  = 32.80999

#### EFICIENCIA POR PÉRDIDAS DE CALOR

		k.J/kg de COMBUST. QUEM.	PÉRDIDA %
65	PÉRDIDAS POR GASES SECOS = $\frac{kg \text{ DE GAS SECO} * Cp * (T_{gas \text{ salida}} - T_{aire})}{kg \text{ DE COMBUST. QUEM}}$	3,865.65	8.611
66	POR HUMEDAD DEL COMBUST = $\frac{kg \text{ H}_2O * [(ENTALP \text{ VAPOR A 1 PSIA } \vee T_{gas \text{ salida}}) - (ENTALP \text{ LÍQUIDO A } T_{aire})]}{kg \text{ DE COMBUST. QUEM}}$	1.42	0.003
67	POR H2O DE COMBUST H2 = $\frac{5H_2 * [(ENTALP \text{ DE VAPOR A P. PARC. Y T. } T_{gas \text{ salida}}) - (ENTALP \text{ DEL LÍQUIDO A } T_{aire})]}{(PÉRDIDAS \text{ TOTALES POR RADIACIÓN } \text{ } kg / Hr)}$	3,395.38	7.563
69	POR RADIACIÓN = $\frac{(PÉRDIDAS \text{ TOTALES POR RADIACIÓN } \text{ } kg / Hr)}{kg \text{ DE COMBUSTIBLE QUEMADO}}$	897.84	2.000
70	OTRAS PÉRDIDAS =	1,078.26	2.402
71	TOTAL =	9,238.54	20.580
72	EFICIENCIA = $(100 - \text{ARTICULO 71})$	=	79.420

## 5.6 MEMORIA DE CÁLCULO (sistema Inglés de Unidades)

**LG'**= 259.9101 Btu/lb C Q  
**WG'**= 2.944889 lb gas seco/lb C Q  
**Cb**= 0.8634 lb Carbon quemado/lb C Q  
**S**= 0.0012 lb S/lb de C Q  
**CpG'**= 0.247 (Btu/lb F (tablas Fig. 7))  
**tG**= 424.65 F  
**TRA**= 67.33 F  
**CO2**= 11.42 %v  
**O2**= 5.53 %v  
**N2**= 21.05 %v  
**CO**= 62 %v

**Lmf**= 0.60909 Btu por hum. en el C Q/lb de C Q  
**mf**= 0.0005 lb de hum por lb de C Q/lb de C Q

**\* h12,14,15**= 1252.96 Btu/lb Entalpia de vap a P. parc. y T gases comb. (1012, 14, 15) (tablas de vapor)  
**PmG**= 4.68247 lb/in<sup>2</sup> (p. parc. de H<sub>2</sub>O en gases de comb.)  
**PA**= 11.5 lb/in<sup>2</sup>  
**Cb**= 0.8634 lb de Carbon quemado/lb C Q.  
**mG**= 1.211537 lb de H<sub>2</sub>O producido/lb de C Q.  
**H<sub>2</sub>**= 0.1341 lb de H<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O de C Q/lb de C Q.  
**WmA'**= 0.018 lb de H<sub>2</sub>O/lb a s. ent. = Y" (p. parc. a / pt-p. parc. a)"/Ma"/Mb  
**WA'**= 0.70666 lb de a s./lb de C Q  
**mf**= 0.0005 lb H<sub>2</sub>O/lb de C Q  
**CO2**= 11.42 %v  
**CO**= 62 %v  
**hRW**= 34.78 Btu/lb (Entalpia de liq. sat. a TRA= 19.3 C)

**LH**= 1459.767 Btu perdidos por H<sub>2</sub>O del H<sub>2</sub> quemado/lb de C Q.  
**H**= 0.1341 lb de H<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O de C Q/lb de C Q  
**hRW**= 34.78 Btu/lb (Entalpia de liq. sat. a TRA= 19.3 C)

**LmA**= 15.49511 Btu perdidos por H<sub>2</sub>O en el aire/lb de C Q.  
**WmA'**= 0.018 lb de H<sub>2</sub>O/lb a s. ent. = Y" (p. parc. a / pt-p. parc. a)"/Ma"/Mb  
**WA'**= 0.70666 lb de a s./lb de C Q  
**h12,14,15**= 1252.96 Entalpia de vap a P. parc. y T gases comb. (1012, 14, 15)  
**hRW**= 34.78 Btu/lb (Entalpia de liq. sat. a TRA= 19.3 C)

**LCO**= 7407.694 Btu perdidos por la formación de CO/lb de C Q  
**CO2**= 11.42 %v  
**CO**= 62 %v  
**Cb**= 0.8634 lb de Carbon quemado/lb C Q

**LUH**= 0 Btu perdidos por H<sub>2</sub> en quemado/lb C Q  
**ft3 de H<sub>2</sub>/ft3 gas seco**= 0  
**WG'**= 2.944889 lb gas seco/lb C Q  
**p. especif. de gases**= 0.078017 a 65 F y 14.7 psia  
**CO2**= 11.42 %v  
**O2**= 5.53 %v  
**CO**= 62 %v  
**N2**= 21.05 %v  
**SO2**= %v  
**H2**= %v

**LB**= 386 Btu perdidos por radiación y convección/lb de C Q

\* L. Haar, J.S. Gallagher, G.S. Keil. Tablas de Vapor. Editorial Interamericana. México, 1985

## 5.6 MEMORIA DE CÁLCULO (Sistema Métrico de Unidades)

<b>LG'</b>	<b>3865.652</b>	<b>kJ/kg C Q</b>
<b>WG'</b>	<b>18.83291</b>	<b>kg gas seco/kg C Q</b>
	<b>Cb=</b>	<b>0.8634</b> kg Carbon quemado/kg C Q
	<b>S=</b>	<b>0.0012</b> kg S/kg de C Q
	<b>CpG'</b>	<b>1.034</b> kJ/kg °C (tabla)
	<b>tG=</b>	<b>218.1389</b> °C
	<b>tRA=</b>	<b>19.62778</b> °C
	<b>CO2=</b>	<b>11.42</b> %v
	<b>O2=</b>	<b>5.53</b> %v
	<b>N2=</b>	<b>82.987</b> %v
	<b>CO=</b>	<b>0.063</b> %v
<b>Lmf=</b>	<b>1.416725</b>	<b>kJ per hum en el C Q /kg de C Q</b>
	<b>mf=</b>	<b>0.0005</b> kg de hum por kg de C Q /kg de C Q
<b>* h12,14,15=</b>	<b>2914.35</b>	<b>kJ/kg (Entalpia de vap. a P. parc. (PmG) y T gases comb. (tG))</b>
<b>PmG=</b>	<b>0.095263</b>	<b>bar (p. parc. de H2O en gases de comb.)</b>
	<b>PA=</b>	<b>0.793</b> bar
	<b>Cb=</b>	<b>0.8634</b> kg de Carbon quemado/kg C Q
	<b>mG=</b>	<b>1.539856</b> kg de H2O producido/kg de C Q
	<b>H=</b>	<b>0.1341</b> kg de H2 de H2O de C Q /kg de C Q
	<b>WmA'</b>	<b>0.018</b> kg de H2O/kg a s. ent. = Y* (p. parc. a / pt. p. parc. a) °Ma/Mb
	<b>WA'</b>	<b>18.94657</b> kg de a s /kg de C Q
	<b>mf=</b>	<b>0.0005</b> kg H2O/kg de C Q
	<b>CO2=</b>	<b>11.42</b> %v
	<b>CO=</b>	<b>0.063</b> %v
	<b>hRW=</b>	<b>80.9</b> kJ/kg (Entalpia de liq. sat. a TRA=19.63 °C)
<b>LH=</b>	<b>3395.375</b>	<b>kJ perdidos por H2O del H2 quemado/kg de C Q</b>
	<b>H=</b>	<b>0.1341</b> kg de H2 de H2O de C Q /kg de C Q
	<b>hRW=</b>	<b>80.898</b> kJ/kg (Entalpia de liq. sat. a TRA= 19.63 °C)
<b>LmA=</b>	<b>966.3147</b>	<b>kJ perdidos por H2O en el aire/kg de C Q</b>
	<b>WmA'</b>	<b>0.018</b> kg de H2O/kg a s. ent. = Y* (p. parc. a / pt. p. parc. a) °Ma/Mb
	<b>WA'</b>	<b>18.94657</b> kg de a s /kg de C Q
<b>h12,14,15=</b>	<b>2914.35</b>	<b>kJ/kg (Entalpia de vap. a P. parc. (PmG) y T gases comb. (tG))</b>
	<b>hRW=</b>	<b>80.9</b> kJ/kg (Entalpia de liq. sat. a TRA=19.63 °C)
<b>LCO=</b>	<b>111.944</b>	<b>kJ perdidos por la formación de CO/kg de C Q</b>
	<b>CO2=</b>	<b>11.42</b> kJ/kg (Entalpia de liq. sat. a TRA=19.63 °C)
	<b>CO=</b>	<b>0.063</b> %v
	<b>Cb=</b>	<b>0.8634</b> kg de Carbon quemado/kg C Q
<b>LUH=</b>	<b>0</b>	<b>kJ perdidos por H2 sin quemar/kg C Q</b>
<b>ft3 de H2/ft3 gas sec=</b>	<b>0</b>	
	<b>WG'</b>	<b>18.83291</b> kg gas seco/kg C Q
<b>p. especific. de gases=</b>	<b>0.078033</b>	<b>a 20 °C y 1.0135 bar</b>
	<b>CO2=</b>	<b>11.42</b> %v
	<b>O2=</b>	<b>5.53</b> %v
	<b>CO=</b>	<b>0.063</b> %v
	<b>N2=</b>	<b>82.987</b> %v
	<b>SO2=</b>	<b>0</b> %v
	<b>H2=</b>	<b>0</b> %v
<b>LB=</b>	<b>897.836</b>	<b>kJ perdidos por radiación y convección/kg de C Q</b>

\* L. Haar, J.S. Gallagher, G.S. Kell. Tablas de Vapor. Editorial Interamericana. México. 1985

## **VI. PROPUESTA DE CAMBIO DE COMBUSTIBLE DIESEL A GAS L.P EN LA CALDERA DEL LABORATORIO DE INGENIERIA QUÍMICA**

El combustible que actualmente ocupa la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química es diesel. Sin embargo, la tendencia actual es el uso de gas L.P. para calderas cuya capacidad es semejante a la de la caldera del Laboratorio (nos referimos a calderas de 150 H.P. para abajo).

El diesel y el Gas L.P. básicamente tienen el mismo poder calorífico por kg de combustible, sin embargo, es más fácil obtener una buena combustión de un gas por las siguientes razones:

1. Se obtiene una mejor mezcla con el aire de combustión.
2. No se empobrece la combustión cuando el combustible choca contra alguna pieza del equipo como pueden ser los electrodos de ignición o las paredes del cañón.
3. El gas L.P. no contiene azufre.

Adicionalmente, la combustión de una caldera que utiliza gas como combustible es mejor trayendo consigo los siguientes beneficios:

1. El grado de hollinamiento del quemador y de los tubos flux es mucho menor que el de una caldera que opera con diesel lo que abate los costos por mantenimiento.
2. En términos ecológicos, las emisiones a la atmósfera de CO y de hollín disminuyen considerablemente
3. Aumenta la eficiencia de combustión de la caldera entre un 1 y 2 % disminuyendo el gasto de combustible y consecuentemente los costos fijos.



Comparativamente, el manejo del gas L.P. es más delicado que el del diesel y requiere de mayores medidas de seguridad en el transporte, almacenamiento y manejo. Por lo mismo, los dispositivos de seguridad son mayores en número y más costosos.

Es importante mencionar que las calderas Cleaver Brooks tienen muchos años de arraigo en México, son muy comerciales y de gran flexibilidad y cuentan con un respaldo técnico fuerte, además de que se pueden encontrar las refacciones fácilmente. Es por esto que el cambio de combustible a gas es técnica y funcionalmente factible.

A continuación se enumeran las modificaciones necesarias que se deben hacer para el cambio de combustible de diesel a gas en baja presión para el caso específico de la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química. Se incluyen los costos.

#### CAMBIOS REQUERIDOS PARA LA CALDERA EN GAS A BAJA PRESIÓN

##### 1. Modificaciones en la puerta delantera

INCISO	CONCEPTO	COSTO (U.S. Dlls.)
a)	Acceso para línea de gas.	\$ 80.00
b)	Substitución del transformador de encendido.	\$ 130.00
c)	Instalación de un switch de aire.	\$ 100.00
d)	Modificación de la tapa intermedia.	\$ 50.00
e)	Instalar sellos y juntas en la línea de gas	\$ 30.00

##### 2. Modificaciones en el quemador

INCISO	CONCEPTO	COSTO (U.S. Dlls.)
a)	Substitución de la caja del quemador.	\$ 845.00
b)	Substitución del quemador.	\$ 460.00
c)	Instalación de piloto	\$ 100.00
d)	Instalación de barra detectora	\$ 70.00

3. Instalación de un tren de gas consistente de (fig. 9A):

INCISO	CONCEPTO	
a)	Regulador de gas de 2 pulgadas	
b)	Válvula motorizada "shut off" de 2 pulgadas.	
c)	Válvula de esfera de 2 pulgadas	
d)	Válvula solenoide de 1/2 pulgada.	
e)	Regulador de presión de 1/2 pulgada.	
f)	Válvula de seguridad de alta presión	
g)	Válvula de seguridad de baja presión.	
h)	Válvula de esfera de 1/2 pulgada	
<b>TOTAL DE ESTA PARTIDA:</b>		<b>U.S.D. \$ 2660.00</b>

Nota: La anterior cotización fué realizada por la compañía Calderas y Control para el Laboratorio de Ingeniería Química.

Los precios se dan en dólares ya que la mayoría de los equipos requeridos son estadounidenses y considerando la situación fluctuante de la moneda nacional.

Es importante recalcar que con el equipo adecuado y con una buena capacitación del fogonero una caldera que trabaja con gas a baja presión es muy segura.

Con respecto a la normatividad actual la norma ecológica NOM-085-ECOL-1994 establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera y para calderas con una capacidad de combustión de hasta 5,250 MJ / hr (1.25E6 Kcal / hr) (la caldera del Laboratorio de Ingeniería Química tiene una capacidad de combustión de 2,100 MJ / hr (0.501E6 Kcal / hr)) establece lo siguiente:

**LÍMITES DE EMISIÓN**

TIPO DE COMBUSTIBLE	DENSIDAD DE HUMO (No. de mancha)	BIÓXIDO DE AZUFRE (kg de SO <sub>2</sub> / 10 <sup>6</sup> kcal)	EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN (% volumen)
diesel	3	4.08	60
gaseosos	0	No Aplica	60

y para el 1° de Enero de 1998 en adelante la norma quedara como sigue.

**LÍMITES DE EMISIÓN PARA 1998<sup>1</sup>**

<b>TIPO DE COMBUSTIBLE</b>	<b>DENSIDAD DE HUMO (No. de mancha)</b>	<b>BÍOXIDO DE AZUFRE (kg de SO<sub>2</sub> / 10<sup>6</sup> kcal)</b>	<b>EXCESO DE AIRE DE COMBUSTIÓN (% volumen)</b>
diesel	2	2.04	50
gaseosos	0	No Aplica	50

Con lo anterior podemos inferir que la tendencia es mejorar nuestros procesos de combustión y mejorar la calidad del aire, por lo que es conveniente y muy recomendable considerar mejores alternativas para la generación de energía.

## VII. CONCLUSIONES

### Discusión de Resultados

Como se puede ver en la Hoja de Prueba del Código ASME la eficiencia calculada es de 79.419 %; esto es, 20.581 % de pérdidas de calor por las siguientes razones:

Debido a la dificultad para medir el porcentaje de Pérdidas por Radiación y Convección este se estimó en un 2 % para el caso de una caldera Cleaver Brooks de 60 C.C.<sup>1</sup>

Otras Pérdidas incluye las Pérdidas de Calor por Humedad del Aire para Combustión y las Pérdidas por la Formación de CO de la Combustión. Las primeras representan el 2.15% y las segundas el 0.25%.

El resto de las pérdidas representan el 16.18%.

### Conclusiones

En cuanto a los resultados del estudio de la eficiencia:

La eficiencia actual de la caldera es de 79.42 %, la siguiente tabla nos ayudará a formular una conclusión al respecto

<i>TIPO DE GENERADOR DE VAPOR</i>	<i>EFICIENCIA</i>
<i>de tubos de agua curvos, con paredes de agua, economizador y precalentador de aire; petróleo crudo.</i>	<i>79 a 85 %</i>
<i>el mismo anterior sin economizador ni precalentador de aire; petróleo crudo.</i>	<i>72 a 80 %</i>
<i>de tubos de agua rectos, tipo horizontal, sin economizador ni precalentador de aire; petróleo crudo.</i>	<i>70 a 75 %</i>
<i>tubos de humo, 4 pasos, hogar interior, alimentado con petróleo crudo o aceite ligero (Equivalente a la caldera de la Facultad de Química).</i>	<i>80 a 83.5 %</i>
<i>tubos de humo 3 pasos, hogar interno, petróleo crudo o aceite ligero.</i>	<i>70 a 75 %</i>
<i>tubos de humo de retorno, hogar debajo de la caldera, alimentado con petróleo crudo o aceite ligero.</i>	<i>50 a 60 %</i>
<i>verticales alimentadas con petróleo crudo o aceite ligero, operación manual.</i>	<i>28 a 40%</i>

<sup>1</sup> Manual Selmecc.de Calderas 1976 Mexico. Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.

*Nota: Las eficiencias que aparecen en esta tabla han sido determinadas a través de la experiencia. Varían con el modo de operar y con las condiciones de estado de la caldera y equipo auxiliar<sup>2</sup>*

Considerando la tabla anterior vemos que, aunque el tipo de caldera en cuestión es de las más eficientes, se tiene una eficiencia ligeramente por debajo del promedio. Esta puede mejorar bajando el exceso de aire con la consecuencia de que aumentara la concentración de partículas de hollín y de CO en los gases de combustión.

El mayor porcentaje de pérdidas se deben a las Pérdidas por Gases Secos y a las Pérdidas por Agua Formada por la Combustión del Hidrógeno del Combustible. Ambas pérdidas salen por la chimenea representando el 16.2%. Las demás pérdidas no son significativas (únicamente representan el 4.4% restantes).

En cuanto a los objetivos planteados en la introducción y su realización:

Los objetivos que se llevaron a cabo fueron los siguientes:

1. Selección de los temas o conceptos a ser tratados en el terreno experimental.
- 1.2 Abordar los fenómenos o conceptos que mejor se presten para su comprensión por vía experimental.
2. El profesor debe adquirir un conocimiento y control pleno sobre el fenómeno en términos teóricos y experimentales.

En lo que se refiere a este objetivo quedan descritos muchos de los fenómenos que ocurren en la caldera. Del profesor depende tomarlos y practicar con ellos para entenderlos plenamente.

### 3.1 Definición precisa del objeto de conocimiento a ser aprendido por el estudiante.

El objeto de conocimiento aún no queda definido con precisión ya que este debe de discutirse profundamente para poder plasmarlo en la guía, sin embargo, la presente tesis sirvió como embudo para desechar los menos significativos y plasmar los más importantes de donde se tomará el que más o los que más convengan.

### 3.2 Conceptualizar y diseñar o seleccionar el equipo necesario de laboratorio.

Para la experimentación todo el material empleado se obtuvo del Laboratorio de Ingeniería Química a excepción de un analizador de gases de combustión de celdas electroquímicas el cual se sugiere conseguir.

### 3.3 Establecer condiciones de operación.

Estas quedaron muy bien planteadas. Los resultados de la experimentación pueden servir como referencia. Además, se incluyó una sección con instrucciones precisas para el paro y el arranque de la caldera.

Los demás objetivos se refieren fundamentalmente a la elaboración de la guía los cuales quedan aún sin cubrirse.

En lo que se refiere al medio ambiente:

Una semana antes de la experimentación se efectuó un servicio de mantenimiento completo y de carburación de la caldera con lo que se puede garantizar que durante la experimentación la caldera operaba en óptimas condiciones emitiendo así la menor cantidad posible de gases contaminantes en un equipo de estas características.

Adicionalmente se incluyó un capítulo en donde se propone el cambio de combustible de diesel a gas L.P. con lo que mejoraría la combustión y se emitiría una menor cantidad de gases contaminantes. Es importante considerar el cambio de combustible ya que de esta manera

la caldera cumpliría fácilmente con la normatividad en materia de emisiones contaminantes a la atmósfera de que se espera para enero de 1998.

En cualquier proceso de combustión ocurren reacciones específicas y es muy importante hacer incapié en ellas. Es indispensable que la combustión sea lo mejor posible para lograr que el combustible este tan bien quemado que los gases emitidos tengan la menor cantidad posible de gases mal degradados.

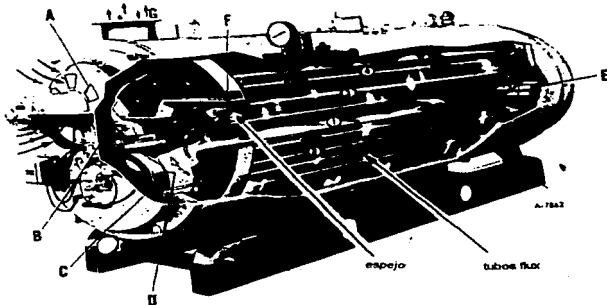
Debemos de considerar que la caldera desde hace muchos años es el medio de generación de energía por excelencia para muchos procesos. Aunque existen muchas maneras de proporcionar calor a los equipos que lo requieren, las características de la caldera, como son el costo de inversión, los gastos de mantenimiento y de operación, el consumo de combustible, la capacidad de almacenamiento de calor, sus dispositivos de seguridad, la capacidad de distribución de calor a casi cualquier equipo y proceso en cualquier punto de una planta unicamente distribuyendo líneas de tubería, la gran variedad de combustibles con los que puede operar y la gran variedad de equipos auxiliares que existen en el mercado específicos para cualquier necesidad siguen haciendo de la caldera el equipo más versátil, económico y comercial para suministrar energía calorífica.

## BIBLIOGRAFÍA

- W.H. Severns, H.E. Degler, J.C. Miles. La Producción de Energía Mediante el Vapor de Agua, el Aire y los Gases. Editorial Reverté. 1994. México.
- Manual Selmec de Calderas 1976 México Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.
- ASME PTC 4.1. Steam Generating Units The American Society of Mechanical Engineers. New York. 1964. Reaffirmed 1985.
- Anthony L. Kohan & Harry M. Spring. Boiler Operator's Guide. Mc. Graw Hill. Third Edition. New York. 1994.
- Dr. Martín Hernández Luna, Q. Mercedes Ilano Lomas. Propuesta de Reforma de la Enseñanza Experimental. Facultad de Química. UNAM. Agosto de 1991.
- Curso: Optimización de los Sistemas de Combustión de Calderas (Memorias). Desarrollo Profesional en Tecnología Avanzada, A.C. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos. México. Octubre de 1988.
- Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994. Diario Oficial de la Federación, Viernes 2 de Diciembre de 1994.
- Donald Q. Kern. Procesos de Transferencia de Calor. Compañía Editorial Continental. México. 1992.
- Manual de Datos Técnicos. Selmec. 1992. 15a Edición. México.
- Johnson & Auth.. Fuels & Combustion Handbook. Publicado por Mc. Graw Hill Book Co.
- Información Termodinámica (compendio). Propiedades Termodinámicas. Facultad de Química. 1990.
- L.Haar, J.S. Gallagher, G.S. Kell. Tablas de Vapor. Nueva Editorial Interamericana. México, D.F. 1985.
- Catálogo de Bombas marca Sentinel. Manufacturera TOSA, S.A. México. 1996.
- National Bureau of Standards. Circular 564. 11 Enero 1955.
- International Critical Tables.



# APÉNDICE A



#### CONSTRUCCION DE CUATRO PASOS

Este corte muestra cómo los gases son forzados para que circulen a través de los cuatro pasos en el orden indicado. El aire de combustión entra al quemador por el registro ajustable A. El soplador lo forza a través de los orificios B, C y del difusor D (Vea la Fig. 3A) en la cámara de combustión, lo que constituye el Paso No. 1. El desvío en (E) permite el paso de los gases hacia el frente de la caldera solamente a través del Paso No. 2; Aquí la placa (F) permite que se dirijan hacia la parte de atrás de la caldera a través del Paso No. 3. De la tapa trasera los gases son forzados por el Paso No. 4 hacia el escape.

FIG. 1A Flujo de gases a través de la caldera  
(Cleaver - Brooks de México, S.A.)

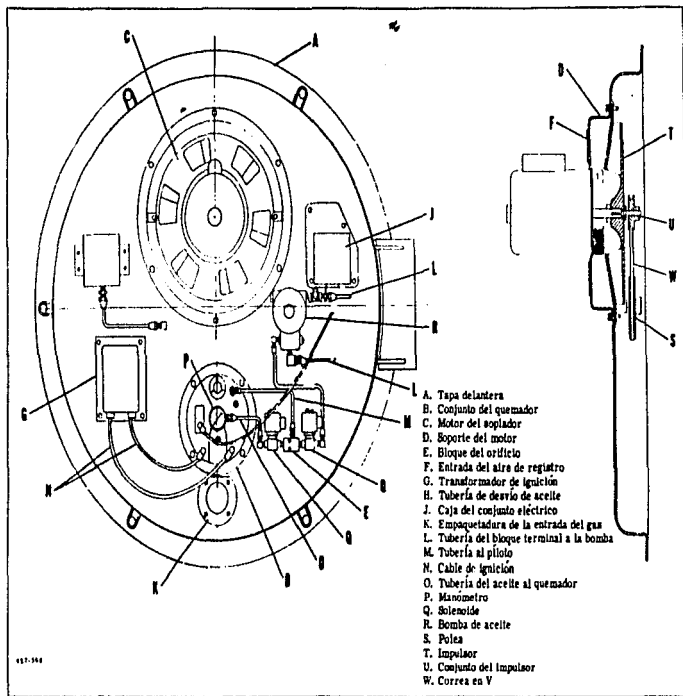


FIG. 2A Vista de la tapa frontal de la caldera

(Cleaver - Brooks de México, S.A.)

- A. Fotocélula
- B. Plancha trasera del quemador
- C. Conjunto de la tubería del piloto de aceite
- D. Cuerpo del inyector
- E. Resorte de extensión

- F. Tubo
- G. Conjunto difusor del quemador
- H. Inyector del piloto
- K. Electrodo
- L. Manómetro de la presión

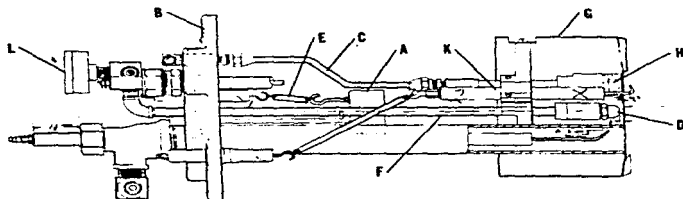


FIG. 3A Detalle del del quemador.

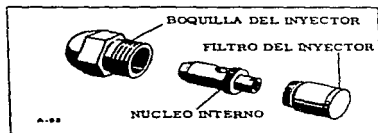
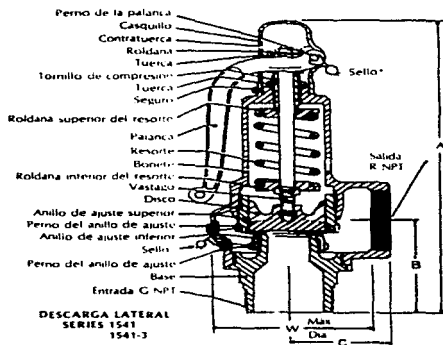


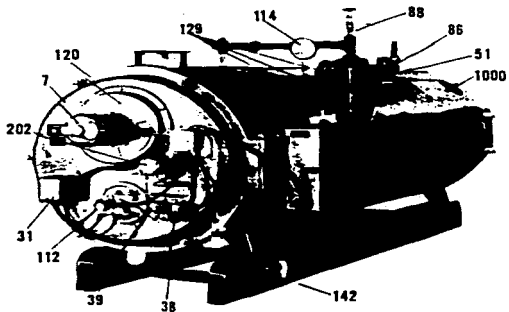
FIG. 4A Detalle del inyector.

(Cleaver - Brooks de México, S A.)

**CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA VALVULA DE SEGURIDAD**



**FIG. 5A** Corte esquemático de una válvula de seguridad.  
 (Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.)



- 7. Motor del soplador
- 31. Transformador de ignición
- 38. Válvula solenoide del aceite (Primaria)
- 39. Válvula solenoide del aceite, (fuego alto (Retardada))
- 51. Control del bajo nivel de agua
- 86. Válvula de seguridad
- 88. Válvula rompe-vacío o de prueba

- 112. Manómetro de la presión de aceite del quemador
- 114. Manómetro de la presión del vapor
- 120. Registro del aire secundario
- 129. Llaves de prueba
- 142. Conexión del abastecimiento de aceite
- 202. Unidad del aceite, dos etapas
- 1000. Caja de conexiones del servicio

FIG. 6A Vista esquinada de una caldera Cleaver Brooks Modelo M-100-60.

(Cleaver - Brooks de Mexico, S.A.)

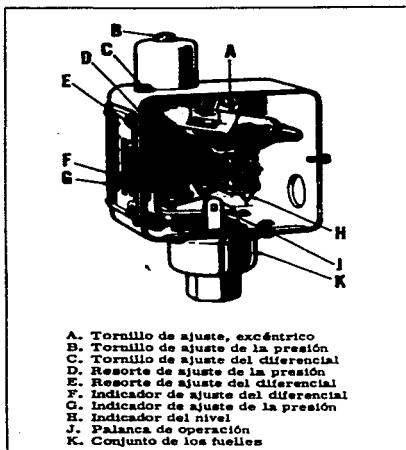
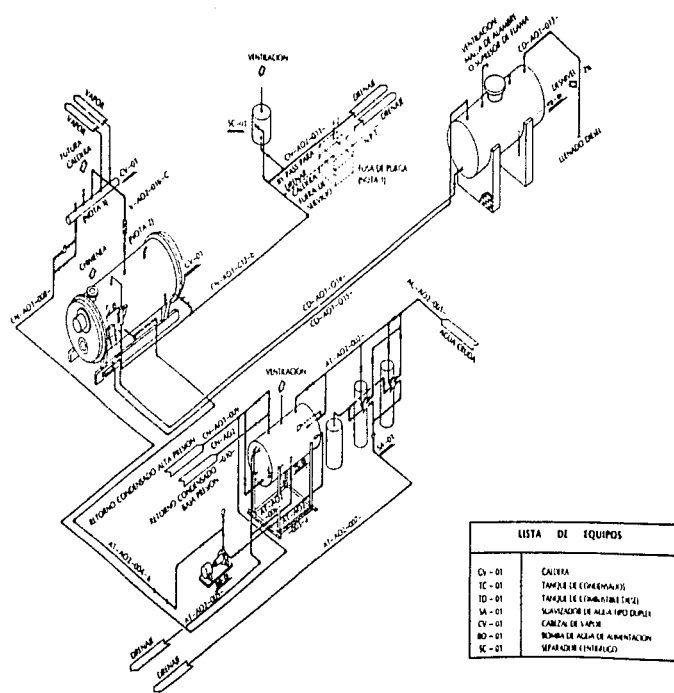


FIG. 7A Detalle de un control de presión.  
 (Clever - Brooks de México, S.A.)



LISTA DE EQUIPOS	
CO - 01	CALDERA
TC - 01	TANQUE DE COMBUSTIBLES
ID - 01	TANQUE DE COMBUSTIBLES (C)
SA - 01	SEPARADOR DE AGUA (TPO DUBLE)
CV - 01	CAMBIO DE VALVULAS
MD - 01	BOMBA DE AGUA DE ALIMENTACION
SE - 01	SEPARADOR (VAPOR)

FIG. 8A Diagrama de Tuberías e Instrumentación de la Caldera y Equipos Auxiliares

(Sociedad Electro Mecánica, S.A. de C.V.)



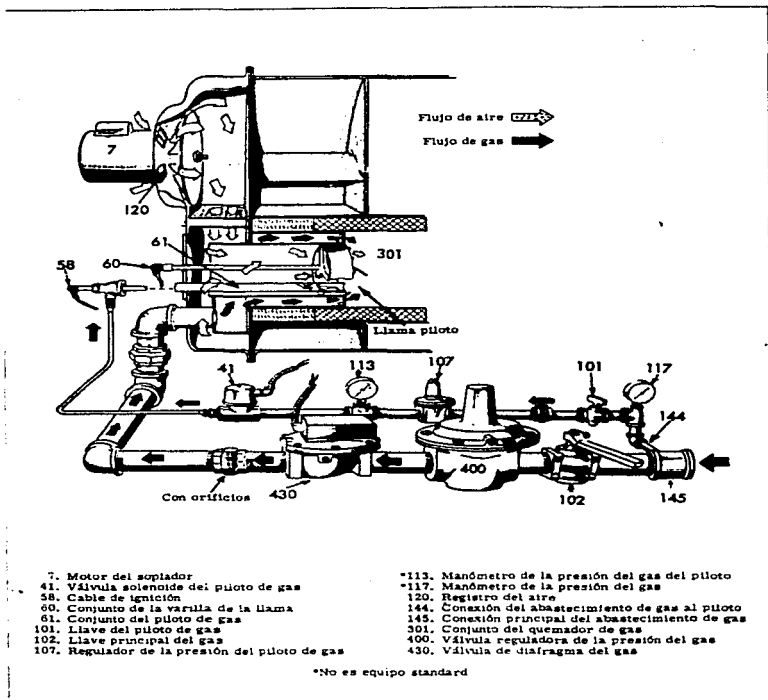


FIG. 9A Diagrama de un tren de combustible gas

(Cleaver - Brooks de Mexico, S.A.)

# APÉNDICE B



INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO  
CALLE CENTRAL LAZARO CARDENAS 12 077M MEXICO D.F. TELS. 5665411 5678600 Y 5678100

INFORME		
REGISTRO		
D	M	A
FECHA		

GERENCIA DE LABORATORIO CENTRAL

INFORME DE RESULTADOS

PROCEDENCIA \_\_\_\_\_ ATENCION \_\_\_\_\_  
SOLICITUD No. \_\_\_\_\_ FECHA \_\_\_\_\_ PROYECTO \_\_\_\_\_  
DESCRIPCION E IDENTIFICACION DE MUESTRAS Diesel

Carbon	% peso	26.34
Hydrogen	% peso	13.41
Nitrogen	% peso	0.036
Sulfur	% peso	0.12
Peso especifico	Btu/lb.	19,200
Humedad		500 ppm

OBSERVACIONES

RESPONSABLE \_\_\_\_\_ FIRMA \_\_\_\_\_

Este resultado aplica a las muestras recibidas en el presente informe  
El IMP no es responsable del origen de las muestras  
Este documento solo puede reproducirse en su totalidad y no parcialmente

NOMBRE DEL PRODUCTO:

DIESEL SIN

Especificación No. 413-DS/93

JULIO DE 1993

<u>Pruebas</u>	<u>Unidades</u>	<u>Métodos ASTM</u>	<u>Especificaciones</u>
Peso Especifico a 20/4 °C	-----	D 1298-85(90)	Reportar
Destilación (1)		D 86-90	
TIE	°C		Reportar
EL 10 % destila a	°C		275 MAX
EL 50 % destila a	°C		Reportar
EL 90 % destila a	°C		345 MAX
TFE	°C		Reportar
Temperatura de Inflamación	°C	D 93-90	45 MIN
Temperatura de Escurecimiento (2)	°C	D 97-87	-----
Temperatura de Nublamiento	°C	D 2500-91	Reportar
Número de Cetano ó	-----	D-613-86	48 MIN
Índice de Cetano	-----	D 976-91	48 MIN
Azufre Total	% P	UOP 357-80 ó D 4294-90	0.05 MAX
Corrosión al Cu, 3hrs, a 50°C	-----	D 130-88	STD 1 MAX
Carbón Ramsbottom (en 10% del residuo)	%P	D 524-88	0.25 MAX
Agua y Sedimento	%V	D 1796-83	0.05 MAX
Viscosidad Cinemática a 40 °C	cSt	D 445-88	1.9 / 4.1
Cenizas	%P	D 482-91	0.01 MAX
Color ASTM	-----	D 1500-91	2.5 MAX
Aromáticos	% V	D 1319-89 ó D 2549-91 ó D 5186-91	30 MAX

Observaciones:

- ( 1 ) Las temperaturas de destilación son corregidas a 760 mmHg  
 ( 2 ). De Marzo a Octubre 0°C Máx, de Noviembre a Febrero -5 °C Máx.

HOJA 1/2

(Instituto Mexicano del Petróleo)

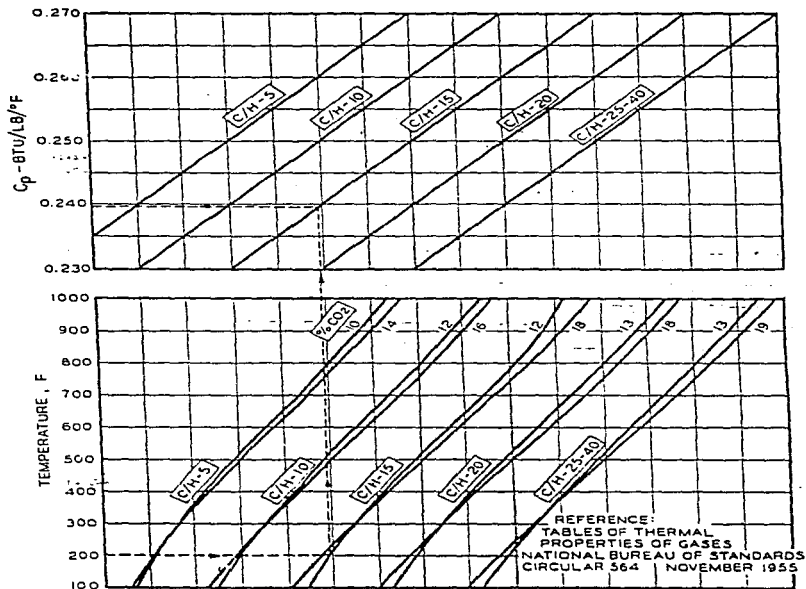


FIG. 7 INSTANTANEOUS SPECIFIC HEAT OF DRY FLUE GAS FOR CARBON HYDROGEN RATIOS (FUEL) - 3 - 40

(ASME PTC 4.1 Steam Generating Units)

ESTA TESIS HA DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

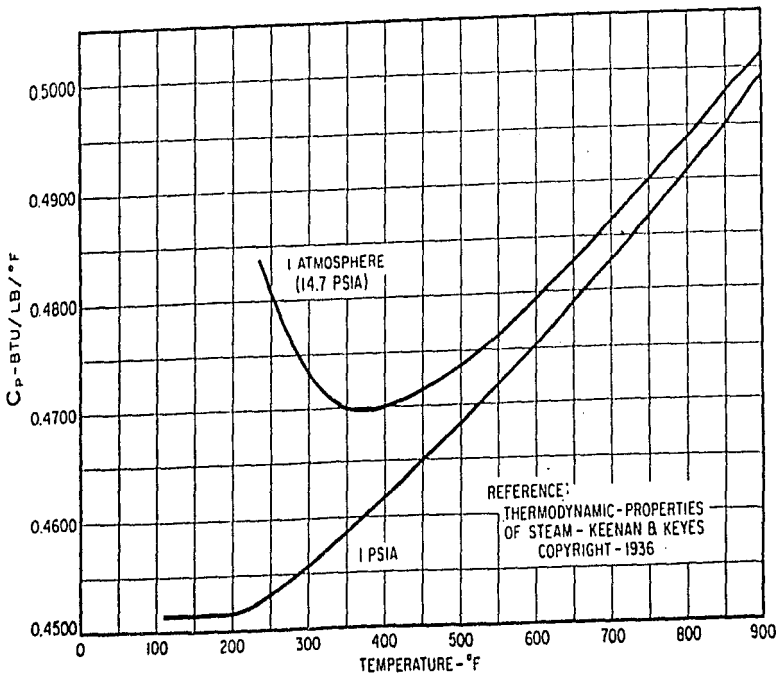


FIG. 4 INSTANTANEOUS SPECIFIC HEAT OF STEAM  
(ASME PTC 4.1 Steam Generating Units)

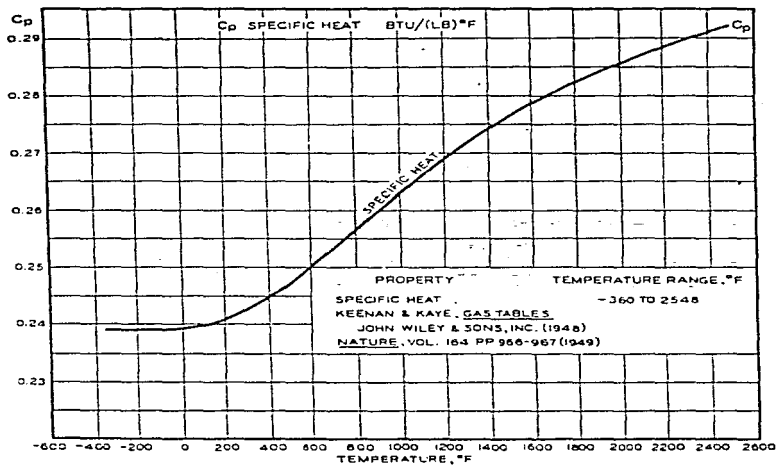


FIG. 3 INSTANTANEOUS SPECIFIC HEAT OF AIR  
 (ASME PTC 4-1 Steam Generating Units)