

169
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



**“APLICACION DE TERMOGRAFIA
EN EL ESTUDIO DE AHORRO DE ENERGIA
EN CALDERAS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

MARIA DEL CARMEN VILLANUEVA ARJONA



**FACULTAD DE
QUÍMICA**

**MEXICO, D.F.
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1997



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química

Jurado Asignado

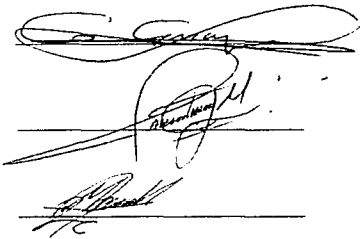
Presidente:	Prof.	Anaya Durand Alejandro
Vocal:	Prof.	Arnaud Huerta Ramón
Secretario:	Prof.	Moreno Padilla Caritino
1er. suplente:	Prof.	Texta Mena José Agustín
2do. suplente:	Prof.	González Mariscal Norma Gisela

Sitio donde se desarrolló el tema: **Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)**
Petróleos Mexicanos (PEMEX)

Asesor del Tema: **M. en C. Alejandro Anaya Durand**

Supervisor técnico: **Ing. José Agustín Texta Mena**

Sustentante: **María del Carmen Villanueva Arjona**



The image shows three handwritten signatures, each written over a horizontal line. The top signature is the most prominent and appears to be 'Alejandro Anaya Durand'. The middle signature is smaller and appears to be 'José Agustín Texta Mena'. The bottom signature is also smaller and appears to be 'María del Carmen Villanueva Arjona'.

A mi hermano (maestro, padre y amigo):

José Luis ✧

Porque con mis ojos puedo ver a través de tu mirada.
Porque en mis sentimientos has dejado guardada :
esta esperanza de un mundo nuevo
donde el amor es la razón de mi existencia.
Y porque en la ausencia de ti
he aprendido a descubrir tus palabras,
las que me alientan a seguir mi camino.

A mi madre:

María Alba

Porque ha sido tu amor,
que con fortaleza y cordura
me da ejemplo de vida,
como el alba que precede al día.
Y por ser no solo mi madre,
sino mi compañera y amigo.

A mi padre:

Carlos Florentino ✧

Por el recuerdo de un amor
que siempre perdurará en mi vida.

A mi hermano:

Francisco Javier y su esposa *Martha*

Por el amor y confianza que compartimos
y que nos mantendrá unidos para siempre.

A mis sobrinos:

Javi, Luis y Sheila.

Por ser la chispa de alegría
que me recuerda lo valioso de la vida.

A mi asesor:

M.I. Alejandro Anaya Durand

De manera especial por el apoyo
que me ha brindado durante mi estancia en el IMP.

A los Ingenieros:

Agustín Texta Mena

Caritino Moreno Padilla

Román Tejeda Castillo

Antonio Reyes Chumacero

Ramón Arnaud Huerta

Por sus valiosos comentarios que ayudaron
a enriquecer el contenido de la tesis.

A Tecnología KLM:

Y de manera especial
al *Ing. José A. Pacheco.*
por sugerirme el tema de tesis
y poner a mi disposición
el termógrafo utilizado para el mismo fin.

A PEMEX-REFINACION:

Que por medio
del *Ing. J. Antonio Machado Soberanes.*
hizo posible realizar la inspección termográfica
de la caldera y recopilar
la información necesaria para el estudio.

Al Instituto Mexicano del Petróleo:

Que a través del Departamento de Diseño
Térmico de Equipo de Combustión
fue posible llevar a cabo el presente trabajo:
en especial al *Ing. Alejandro Hernández Luna.*

A los Ingenieros *Francisco Robles López*

y *Andrés A. Ceballos Serena.*

Por la aportación invaluable de sus conocimientos
para el mejor desarrollo del tema de tesis.

A Fernando y Leticia Quezadas:

Por el apoyo desinteresado
que me han brindado
y por sus consejos
que me han ayudado
a tomar buenas decisiones.

A Judith y Samuel:

Porque las experiencias que compartimos
nos permiten conocer la verdadera amistad
que permanecerá en nuestros corazones
por siempre.

A Pablo y Guadalupe Peralta

Por su amistad y ayuda
con verdadero aprecio.

A mis compañeros del IMP:

En quienes encontré la oportunidad
de tener nuevos amigos.

A mi familia y amigos:

A quienes siempre tengo
muy presente en mi corazón.

INDICE

INTRODUCCION

CAPITULO I

GENERALIDADES

<i>1.1 ENERGIA</i>	<i>1</i>
<i>1.2 FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS</i>	<i>5</i>
<i>1.3 CALDERAS. (GENERADORES DE VAPOR)</i>	<i>14</i>
<i>1.4 TERMOGRAFIA</i>	<i>34</i>
<i>1.5 RADIOMETRO MODELO 760; SISTEMA DE ADQUISICION Y MEDICION DE IMAGENES TERMICAS EN INFRARROJO</i>	<i>39</i>
<i>1.6 THERMAGRAM 95 PARA WINDOWS</i>	<i>40</i>

CAPITULO II

CONSIDERACIONES SOBRE AHORRO DE ENERGIA

<i>2.1 IMPORTANCIA DE LA ENERGIA EN MEXICO</i>	<i>43</i>
<i>2.2 TECNICAS DE CONSERVACION DE ENERGIA TERMICA</i>	<i>46</i>
<i>2.3 RECUPERADORES DE ENERGIA</i>	<i>51</i>

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS ENERGETICO DE CALDERAS

3.1 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA TERMICA DE UN GENERADOR DE VAPOR	60
3.2 PERDIDAS POR LOS GASES DE LA CHIMENEA	64
3.3 PERDIDAS POR COMBUSTIBLE SIN QUEMAR O COMBUSTIBLE QUEMADO PARCIALMENTE (INQUEMADOS)	68
3.4 PERDIDAS POR LAS PAREDES	73

CAPITULO IV

EMPLEO DE TERMOGRAFIA PARA MEDICION DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE

4.1 APLICACION DE LA TERMOGRAFIA EN LOS PROGRAMAS DE CONSERVACION DE ENERGIA	78
4.2 TEORIA BASICA DE INFRARROJO PARA RADIOMETROS DE ADQUISICION DE IMAGENES TERMICAS	82
4.3 REVISION DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS 700 DE INFRAMETRICS	88

CAPITULO V

ANALISIS DE LAS TERMOGRAFIAS UTILIZANDO EL PROGRAMA DE COMPUTO THERMAGRAM 95

<i>5.1 DESCRIPCION DEL REPORTE</i>	<i>103</i>
<i>5.2 LA IMAGEN TERMOGRAFICA</i>	<i>103</i>
<i>5.3 JUEGO DE HERRAMIENTAS PARA ANALISIS</i>	<i>104</i>

CAPITULO VI

ANALISIS DE UN CASO PRACTICO

<i>6.1 INFORMACION DE CAMPO</i>	<i>118</i>
<i>6.2 DIAGNOSTICO ENERGETICO</i>	<i>121</i>
<i>6.3 RESULTADOS DEL CALCULO DE LA EFICIENCIA</i>	<i>124</i>
<i>6.4 RESULTADOS DEL DIAGNOSTICO ENERGETICO, A LAS CONDICIONES DE OPERACION Y SU COMPARACION CON LAS CONDICIONES DE DISEÑO</i>	<i>125</i>
<i>6.5 ANALISIS DE ENERGIA QUE SE PIERDE POR RADIACION Y CONVECCION ATRAVES DE LAS PAREDES, UTILIZANDO LA TERMOGRAFIA</i>	<i>128</i>
<i>6.6 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR POR RADIACION Y CONVECCION MEDIANTE EL METODO GRAFICO</i>	<i>130</i>
<i>6.7 RECOMENDACIONES</i>	<i>133</i>

CAPITULO VII

ANALISIS TECNICO-ECONOMICO DE FACTIBILIDAD

<i>7.1 PARAMETROS CONSIDERADOS EN EL ASPECTO ECONOMICO</i>	<i>135</i>
<i>7.2 MEDIDA 1: INSTALACION DE UN ANALIZADOR CONTINUO DE OXIGENO Y UN ANALIZADOR DE CO (PARA LA REDUCCION DEL EXCESO DE AIRE DE OPERACION A 5%)</i>	<i>138</i>
<i>7.3 MEDIDA 2: SUSTITUCION DEL TIPO DE PRECALENTADOR DE AIRE</i>	<i>144</i>

CONCLUSIONES

ANEXO 1

ANEXO 2

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

El ahorro de energía es uno de los aspectos más importantes que conforman el Plan Nacional de Desarrollo como medio para la preservación estratégica de los recursos energéticos, incremento de la productividad del quehacer industrial y control de emisiones contaminantes al medio ambiente, a través de un uso racionalizado de las fuentes de energía y mediante el aumento de las eficiencias en los dispositivos que utilizan dichas fuentes.

Como resultado de diversos estudios de ahorro de energía realizados por organismos especializados, se ha determinado que los equipos industriales en que más se consume energía a nivel nacional, son los generadores de vapor.

En la generación de vapor y los procesos de combustión es de vital importancia proporcionar niveles de mantenimiento adecuado para reducir las pérdidas de energía y, por ende, reducir los costos de operación. En el caso de un generador de vapor es necesario conocer su eficiencia, para lo cual se requiere establecer los parámetros y las variables que es necesario medir o calcular, y así poder determinar las medidas necesarias y/o factibles de ahorro de energía.

Los parámetros y variables mencionados anteriormente constituyen información indispensable en la aplicación de la metodología seleccionada para el cálculo de la eficiencia. En la presente tesis se describen y aplican al caso práctico, el método de entradas y salidas (método directo) y el método de pérdidas (método indirecto), se comparan resultados de su aplicación y se hacen recomendaciones para su aplicación general.

En este trabajo se describen estos dos métodos, señalando las diferencias que los caracterizan y limitan su aplicación a cada caso en particular.

El método indirecto, dadas las ventajas que ofrece, fue utilizado en el análisis energético de un caso práctico (caldera CB-3 de la Refinería "Lázaro Cárdenas" de Minatitlán, Ver.); la evaluación de la energía que se pierde a través de las paredes del equipo, se realizó por medio de termografía, que hoy en día constituye una de las técnicas más exactas e ilustrativas para la detección oportuna de fugas de energía e inspección física de equipo, lo que da lugar a una mejor planeación de mantenimiento preventivo y predictivo.

Para la aplicación del método indirecto o método de pérdidas, es indispensable conocer el porcentaje de fugas o pérdidas de calor del equipo; esto puede determinarse por métodos convencionales empleando equipo de medición y realizando los cálculos correspondientes. Dentro de las pérdidas de calor de un equipo con combustión, las correspondientes a convección y radiación (por paredes) pueden ser estimadas por medio de la aplicación de la termografía, que representa una tecnología de mayor versatilidad y alto grado de confiabilidad al determinar el porcentaje de dichas pérdidas.

Considerando lo anterior, el principal objetivo de la presente tesis, es la aplicación de la termografía para la obtención de temperaturas superficiales que permitan el cálculo de la energía que se pierde a través de las paredes de la caldera.

Además de este método, como se mencionó anteriormente, se realiza un balance energético que permite conocer otras pérdidas como son las pérdidas por gases de combustión, que resultan ser de mucha importancia debido al porcentaje que representan dentro del balance. A partir del análisis de los resultados de la evaluación del equipo, se pueden presentar recomendaciones interesantes para lograr un mejor ahorro energético.

El desarrollo de la tesis consta de dos partes fundamentalmente:

- ◆ Una teórica, que contiene una recopilación de información general acerca de calderas, ahorro de energía, definiciones termodinámicas, termografía, desarrollo de ecuaciones para el cálculo de la eficiencia de una caldera y la descripción del termógrafo utilizado en la determinación de las pérdidas a través de las paredes, así como del paquete de computo ThermaGram 95 que permite el análisis del estudio termográfico.
- ◆ La segunda parte consiste en el análisis real de la caldera CB-3 de la refinería "Lázaro Cárdenas" de Minatitlán, Veracruz. Dicho análisis está compuesto por el balance de materia y energía y cálculo de la eficiencia; además, se realiza el análisis de los resultados de la evaluación. Conjuntamente se realiza una comparación entre el método gráfico y termográfico para la estimación del porcentaje de pérdidas de calor a través de las paredes. Finalmente, se proponen opciones para el mejor aprovechamiento de la energía e incremento de la eficiencia en caldera. Estas propuestas son respaldadas por un análisis técnico-económico de factibilidad.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ENERGIA	1
1.1.1 Formas de energía	2
1.1.1.1 Energía cinética	2
1.1.1.2 Energía potencial	2
1.1.1.3 Energía interna	2
1.1.2 Maneras en que se transfiere la energía	3
1.1.2.1 Trabajo	3
1.1.2.2 Calor	4
1.2 FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS	5
1.2.1 Definiciones	5
1.2.1.1 Temperatura	5
1.2.1.2 Presión	5
1.2.2 Principios fundamentales de la calorimetría	6
1.2.3 Mecanismos de transferencia de calor	6
1.2.3.1 Conducción	6
1.2.3.2 Convección	7
1.2.3.3 Radiación	8
1.2.4 Propiedades termodinámicas	8
1.2.4.1 Entalpia	8
1.2.4.2 Entropía	9
1.2.5 Leyes de la termodinámica	10
1.2.5.1 Ley cero de la termodinámica	10

1.2.5.2 Escalas de temperatura	10
1.2.5.3 Primera ley de la termodinámica	11
1.2.5.4 Segunda ley de la termodinámica	11
1.2.5.4.1 Postulados de la segunda ley de la termodinámica	12
1.2.5.5 Tercera ley de la termodinámica	13
1.2.6 Exergía	13
1.2.6.1 Definición de la exergía	13

1.3 CALDERAS. (GENERADORES DE VAPOR) **14**

1.3.1 Bases fundamentales del diseño de calderas	15
1.3.2 Circulación y transferencia de calor	15
1.3.3 Clasificación de calderas	16
1.3.3.1 Calderas pirotubulares o de tubos de humo	17
1.3.3.2 Calderas acuotubulares o de tubos de agua	18
1.3.3.3 Calderas de generación instantánea	19
1.3.3.4 Generadores de vapor propios para centrales térmicas	20
1.3.4 Comportamiento de las calderas	24
1.3.5 Partes constitutivas de un generador de vapor acuotubular	25
1.3.5.1 Area de Combustión	25
1.3.5.1.1 Fogón	25
1.3.5.1.2 Quemadores	27
1.3.5.1.3 Paredes de agua	28
1.3.5.1.4 Chimenea	28
1.3.5.2 Area de generación	28
1.3.5.2.1 Domo de la caldera (domo de vapor)	28
1.3.5.2.2 Banco de tubos o banco generador	29
1.3.5.2.3 Tubos escudo (pantalla)	29

1.3.5.2.4 Sobrecalentador	30
1.3.5.2.5 Desobrecalentador o atemperador	30
1.3.5.2.6 Domo de lodos	31
1.3.5.3 Area de recuperación de calor	31
1.3.5.3.1 Economizador	31
1.3.5.3.2 Recalentador	32
1.3.5.3.3 Precaalentador de aire	32
1.3.5.4 Equipos auxiliares	33
1.3.5.4.1 Ventiladores	33
1.3.5.4.2 Sopladores de hollín	33

<i>1.4 TERMOGRAFIA</i>	34
------------------------	----

1.4.1 Reseña histórica	34
1.4.2 Introducción	35
1.4.3 Técnicas de inspección termográficas	35

<i>1.5 RADIOMETRO MODELO 760: SISTEMA DE ADQUISICION Y MEDICION DE IMAGENES TERMICAS EN INFRARROJO</i>	39
--	----

<i>1.6 THERMAGRAM 95 PARA WINDOWS</i>	40
1.6.1 Características y/o ventajas del software utilizado durante el análisis de la información termográfica.	40
1.6.2 Características de las tarjetas digitalizadoras	41
1.6.3 Lista parcial de características funcionales	42

CAPITULO I GENERALIDADES

De acuerdo con la teoría de la dualidad de la materia, ésta posee masa y energía, y de acuerdo con Einstein éstas son interconvertibles.

Mientras que la masa mide la cantidad de materia, la energía mide la cantidad de movimiento de la materia.

1.1 ENERGIA

Etimológicamente energía proviene del latín tardío, "ENERGIA" y éste, del griego "ENERGEIA", es decir fuerza en acción, por otro lado ha sido definida como la capacidad de un cuerpo ó cuerpos para producir trabajo.

Los físicos en un inicio clasificaban a la energía como mecánica (energía cinética y energía potencial) y no mecánica (energía química, eléctrica, térmica, etc.); actualmente sólo reconocen a nivel macroscópico energía cinética y potencial, denotando la energía potencial con una diferente expresión según la naturaleza de la interacción física correspondiente, y denotando por calor y trabajo dos mecanismos de transferencia de energía. A nivel microscópico, un sistema posee energías electrónicas, nucleares y la interacción de éstas, además de las atómicas y moleculares.

Por otra parte, como la energía no puede crearse ni destruirse, para todos los casos (en que un sistema cambie de estado) debe cumplirse que:

$$\begin{array}{ccc} \text{Entrada de energía} & & \text{Salida de energía} & & \text{acumulación de} \\ \text{al sistema desde los} & = & \text{del sistema hacia} & + & \text{energía dentro del} \\ \text{alrededores} & & \text{los alrededores} & & \text{sistema} \end{array}$$

Para convertir esta expresión cualitativa a una ecuación de balance útil, se deben especificar las formas en que estos intercambios de energía deben ocurrir; para ello necesitamos conocer en términos concretos los tipos de energía involucrados.

La unidad de energía en el sistema internacional es el Joule, mientras que en el sistema inglés se reporta el BTU.

1.1.1 Formas de energía

1.1.1.1 Energía cinética

Es la forma de energía que posee un sistema debido a su movimiento. Específicamente, para el caso de una partícula, se puede calcular mediante la conocida fórmula:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

1.1.1.2 Energía potencial

Es la energía que posee un sistema debido a sus posiciones (u orientaciones) relativas, y ésta se expresa de diferente manera dependiendo de la naturaleza de las interacciones físicas correspondientes (energía potencial eléctrica, gravitacional, magnética, etc.). Así entonces, para la energía potencial gravitatoria de un objeto de masa m que se encuentre en reposo a una altura z (punto a), relativa a algún plano de referencia dentro del campo gravitacional del lugar de intensidad g , (punto b), está dada por:

$$E_{p_g} = -W_{AB}$$

$$W_{AB} = \vec{F} \cdot d\vec{z}$$

$$\vec{F} = m\vec{g}$$

$$W_{AB} = -mgz$$

entonces:

por lo tanto:

$$E_{p_g} = mgz$$

1.1.1.3 Energía interna

Es el equivalente macroscópico de la suma de las energías de todas las partículas que forman al sistema. Es decir, la energía interna es la suma de todas las energías que posee un sistema, sin considerar a la energía cinética ni a la energía potencial del mismo sistema. Generalmente la energía interna se representa mediante el símbolo U .

En resumen, la acumulación total de energía dentro de un sistema que pasa de un estado a otro, puede calcularse mediante la siguiente suma:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_C + \Sigma \Delta E_p$$

Si nos interesa la interacción de un sistema químico con campos eléctricos (electroquímica), debemos introducir el término: ΔE_{eq}

Quedando la ecuación: $\Delta E = \Delta U + \Delta E_C + \Delta E_p + \Delta E_{eq}$

Y así sucesivamente, sucede con otros campos de interacción.

1.1.2 Maneras en que se transfiere la energía

La energía se puede transportar mediante dos modos:

En el modo de trabajo se transporta energía mecánica, energía eléctrica, química; todas estas de manera reversible.

En el modo de calor, se transporta únicamente energía térmica irreversiblemente.

1.1.2.1 Trabajo

En la mecánica clásica, se define el trabajo (dW) como el producto punto de una fuerza (\vec{F}) por un vector de desplazamiento a través de la cual actúa ($d\vec{r}$):

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad \text{cuando } \vec{F} = \text{cte}$$

Si \vec{F} actúa a lo largo de una porción finita de una trayectoria o, alternativamente, queremos conocer el trabajo realizado por \vec{F} en dicha porción finita, debemos subdividir la porción de la trayectoria en elementos vectoriales $d\vec{r}$, y calcular $\vec{F} \cdot d\vec{r}$, donde \vec{F} es función de x , y , z , en los diferentes segmentos $d\vec{r}$, entonces:

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

es el trabajo total ejecutado por la fuerza \vec{F} entre los puntos 1 y 2 de la trayectoria.

En su sentido termodinámico la definición de trabajo es la siguiente:

“Trabajo es un transporte de energía mecánica entre un sistema y sus alrededores, a través de aquellas porciones de los límites del sistema en que no hay transferencia de masa, como

consecuencia de una diferencia en una propiedad intensiva diferente de la temperatura entre el sistema y sus alrededores”.

En otras palabras, el trabajo es transformación de energía mecánica cuyo rasgo característico es la translación macroscópica bajo la acción de ciertas fuerzas.

La expresión para el trabajo termodinámico generalizado es:

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{\lambda}$$

donde \vec{F} es una variable termodinámica intensiva que representa la fuerza macroscópica externa involucrada en la interacción y $d\vec{\lambda}$ representa el cambio (infinitesimal) en la variable extensiva λ representativo del cambio de estado correspondiente. Por otra parte, no cualquier pareja de variables termodinámicas, X, Y, una intensiva y otra extensiva, pueden combinarse para dar lugar a un trabajo termodinámico. Los requisitos para que se cumpla la ecuación anterior son los siguientes:

- a) El producto F y λ debe tener dimensiones de energía.
- b) El producto $Fd\lambda$ debe ser representativo de una interacción física.

Por convención, se dice que el trabajo suministrado a un sistema es positivo, mientras que el trabajo cedido o disipado por un sistema a sus alrededores es negativo.

1.1.2.2 Calor

El calor es energía térmica en transición y se define termodinámicamente como:

“Calor es transporte de energía térmica entre un sistema y sus alrededores, a través de aquellas porciones de los límites del sistema en que no hay transferencia de masa, como consecuencia de la diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores”.

En otra forma, el calor es el transporte de energía térmica que se manifiesta por medio de los choques caóticos de las moléculas en contacto.

Por convención, se dice que el calor suministrado a un sistema es positivo, mientras que el calor cedido o disipado por un sistema a sus alrededores es negativo.

1.2 FUNDAMENTOS TERMODINAMICOS

1.2.1 Definiciones

1.2.1.1 Temperatura

En la termodinámica clásica, la temperatura es aquella variable cuyo valor numérico establece cuándo dos o más sistemas, en contacto térmico entre sí, se encuentran o no en equilibrio. Un concepto más riguroso de temperatura se alcanza con ayuda de la mecánica estadística, según la cual la temperatura como una propiedad física, está directamente relacionada con la energía cinética del movimiento de las partículas de un cuerpo. Si las energías cinéticas medias de las partículas de dos cuerpos son las mismas, entonces cuando los cuerpos son puestos en contacto térmico, las partículas individuales transportarán energía en ambas direcciones pero no se presentará una transferencia neta de energía. Por esta razón, la energía cinética media del movimiento de traslación y vibración de las partículas en la materia se puede tomar como una medida de la temperatura:

$$T = \frac{2}{3} \bar{E}_c = \frac{1}{3} \bar{m} \bar{v}^2$$

como la ecuación anterior tiene unidades de energía, se emplea un factor de conversión (constante de Boltzmann) para expresar la temperatura en grados. El valor de dicha constante es $1.37 \cdot 10^{-23}$ J/K.

1.2.1.2 Presión

La presión P de un fluido sobre una superficie se define como la fuerza normal ejercida por el fluido por cada unidad de área de superficie. Si la fuerza se mide en N y el área en m^2 la unidad básica de presión en el SI, es el Newton sobre metro cuadrado, llamada Pascal y cuyo símbolo es Pa.

El estándar primario de la medida de presión se deriva de su definición. Una fuerza conocida se equilibra mediante la presión de un fluido que actúa sobre un área dada, es decir:

$$P = F/A$$

1.2.2 Principios fundamentales de la calorimetría

1. La cantidad de calor necesaria (Q) para calentar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo.
2. Q es directamente proporcional al cambio en la temperatura de un cuerpo.
3. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de calor específico.
4. La cantidad de calor que hay que suministrar a un cuerpo para calentarlo de t_1 a t_2 es el mismo que hay que quitarle para enfriarlo de t_2 a t_1 .
5. Para elevar la temperatura de un cuerpo hay que suministrarle calor. En cambio, cuando un cuerpo está cambiando de fase, al aumentar o quitar calor no varía la temperatura.
6. La cantidad de calor ganada por un cuerpo es igual a la cantidad de calor perdida por otro.

1.2.3 Mecanismos de transferencia de calor

El calor se propaga de un cuerpo a otro mediante tres mecanismos: por conducción, por convección y por radiación. Los tres tipos de transferencia de calor se pueden producir al mismo tiempo y es aconsejable tomar en consideración la transferencia de calor por cada uno de esos tipos en cada caso particular. A continuación son descritos los tres mecanismos para la transferencia de calor:

1.2.3.1 Conducción

Es la transferencia de energía en forma de calor que se lleva a cabo debido a que las moléculas que se mueven más rápido en la parte más caliente de un cuerpo comunican mediante impactos una parte de su energía a las moléculas adyacentes. En los sólidos, la conducción de calor se debe tanto a los movimientos de los electrones libres en el interior del sólido, como las vibraciones de las moléculas dentro del mismo. En los líquidos y gases, las moléculas se mueven y la conducción de calor se lleva a cabo gracias a los movimientos de traslación de las mismas.

La ecuación básica que establece la rapidez de transferencia de calor por conducción es la que representa la ley de Fourier, desarrollada en 1822 por él mismo y que dice: "La cantidad instantánea de transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperaturas dt que impulsa el calor a través de la pared de espesor dx ".

$$dQ = -KA dt/dx$$

La propiedad "K" se denomina conductividad térmica del material y depende del estado del mismo, en particular de la temperatura; puede determinarse a partir de experimentos de laboratorio y está básicamente definida por la ecuación anterior. O bien, en el caso de sólidos y gases, puede determinarse o predecirse a partir de la teoría cinética molecular.

El signo negativo (-) de la ecuación indica que un gradiente negativo de temperatura produce transferencia de calor en la dirección positiva x . La conductividad térmica depende de la temperatura y aumenta con un incremento de la misma.

1.2.3.2 Convección

Es la transferencia de calor desde un punto a otro dentro de un fluido, un gas o un líquido, mediante la mezcla de una porción caliente con otra porción fría. La transferencia de calor puede ser por convección natural o forzada. La diferencia entre ambas es que en la primera el desplazamiento del fluido se debe a una diferencia de densidades del mismo provocada por un diferencial de temperaturas; mientras que, en la convección forzada el movimiento del fluido es provocado por un medio externo (bomba, agitador, etc).

La expresión que corresponde al flujo convectivo de calor no tiene el carácter de ley física, es sólo una ecuación empírica. El flujo térmico convectivo, es producto de tres términos:

- 1.- El área de la superficie de contacto entre sólido y fluido.
- 2.- La diferencia entre la temperatura de la superficie sólida, y la temperatura del fluido a cierta distancia de dicha superficie.
- 3.- El coeficiente de transferencia de calor (promedio).

La ecuación que describe lo anterior es:

$$dQ = h_c A dt$$

La constante de proporcionalidad "h_c" es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y el régimen de flujo y debe ser evaluado experimentalmente. Esta constante recibe el nombre de coeficiente de transferencia de calor.

1.2.3.3 Radiación

Es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas a través del espacio. Por ejemplo: rayo X, rayos ultravioleta, luz, etc., todas son formas de radiación y difieren únicamente por su longitud de onda y su frecuencia. El calor es transferido por radiación cuando un cuerpo a una temperatura alta, emite energía radiante, esta energía viaja a través de un espacio y alcanza otro cuerpo con una temperatura menor, una parte de esta energía es reflejada y otra es absorbida y transformada en calor. En los dos cuerpos, hay un intercambio continuo de energía entre ambos. El más caliente emite más energía que la que absorbe; el más frío absorbe más que la que radia. Aún después de que se alcanza el equilibrio térmico, el proceso de radiación y absorción entre ambos continúa.

La ecuación fundamental que rige este proceso fue propuesta empíricamente por Stefan en 1879 y quién la dedujo teóricamente a partir de la segunda ley de la termodinámica fue Boltzmann en 1884.

$$Q/A = \sigma \epsilon T^4$$

Dónde σ es la constante de Stefan - Boltzmann y ϵ es la emisividad la cuál debe ser determinada experimentalmente.

El valor de la constante de Stefan Boltzman es: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^2$ o $1.73 \cdot 10^{-9} \text{ BTU/hrft}^2\text{oR}^4$.

1.2.4 Propiedades termodinámicas

1.2.4.1 Entalpía

La entalpía es la energía total de un sistema que interacciona con el medio y se define explícitamente por la expresión matemática:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

Donde: U = Energía Interna.
P = Presión Absoluta.
V = Volumen.
H = Entalpía

Las unidades de todos los términos de esta ecuación deben ser las mismas. El producto PV tiene unidades de energía al igual que U; por consiguiente, H también tiene unidades de energía (joule en el sistema internacional).

1.2.4.2 Entropía

La entropía (S) es una propiedad intrínseca de la materia caracterizada por que su valor se incrementa al aumentar la ineficiencia de la energía total del sistema. Su magnitud depende solo de la naturaleza de la materia considerada y del estado en que se encuentre; es independiente de su posición externa o de su movimiento respecto a otros cuerpos.

En resumen, la entropía es la medida de desorden de un sistema.

Los requisitos para la definición cuantitativa de la entropía, son tres: calor, temperatura y reversibilidad. La ecuación que involucra los conceptos anteriores es la siguiente:

$$dS = dq/T \quad (\text{para un cambio reversible})$$

Expresado en palabras la relación de la entropía con el calor, la temperatura y reversibilidad queda como sigue:

Entropía - calor. La entropía de un sistema crece en la absorción de calor producido por cualquier mecanismo o fuente.

Entropía - temperatura. El incremento de entropía que acompaña la adición de una cantidad determinada de calor a un sistema crece al disminuir la temperatura a la cual se cede el calor.

Entropía - reversibilidad. El incremento de entropía de un sistema se mide por la cantidad de calor absorbida únicamente en el caso en que todos los cambios en los estados intrínsecos de la materia del sistema tienen lugar reversiblemente.

1.2.5 Leyes de la termodinámica

1.2.5.1 Ley cero de la termodinámica

La ley que en termodinámica ha recibido el nombre de "ley cero", establece que cuando dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico respecto a un tercero, entonces estarán en equilibrio térmico entre sí, y por ende, presentarán una misma temperatura.

Hablando con poco rigor, la parte esencial de la ley cero es: existe una cantidad útil llamada "TEMPERATURA".

1.2.5.2 Escalas de temperatura

La unidad fundamental de temperatura en el Sistema Internacional es el grado Kelvin (K). Esta escala de temperatura se utiliza para definir otra escala métrica de temperatura de uso común : la escala Celsius. Las temperaturas en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) están relacionadas con las temperaturas en Kelvin mediante:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - 273.15 \text{ K}$$

en donde T es la temperatura en K. Nótese que la magnitud del intervalo de temperatura que representa un grado Celsius es numéricamente idéntica a un grado Kelvin.

La unidad de temperatura en el sistema AE es el grado Rankine ($^{\circ}\text{R}$). Por definición, el intervalo de temperatura que representa un grado Rankine es igual a 5/9 del intervalo de temperatura que mide un grado Kelvin.

Existe una escala de temperatura de uso común en Estados Unidos : la escala Fahrenheit. La conversión de temperaturas expresada s en grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) a temperaturas Rankine, está definida por la relación :

$$t(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459.67^{\circ}\text{R}$$

Nótese que la magnitud del intervalo de temperatura que representa un grado Fahrenheit es numéricamente idéntica a un grado Rankine.

1.2.5.3 Primera ley de la termodinámica

Una de las leyes más importantes de la naturaleza, es la ley de la conservación de la energía, a pesar de que esta ley es enunciada en diversas formas, todas tienen en esencia el mismo significado. Los siguientes enunciados constituyen algunos ejemplos: "Cuando la energía se transforma de una forma a otra ésta siempre se conserva"; "La energía no puede destruirse ni crearse, siempre se conserva; la suma de todas las energías permanece constante".

Matemáticamente la 1ª ley queda establecida por medio de la ecuación siguiente:

$$dE = dQ - dW$$

donde :

- dE = Cambio en el contenido de energía del sistema.
- dQ = Calor transferido al sistema.
- dW = Trabajo transferido desde el sistema.

1.2.5.4 Segunda ley de la termodinámica

La termodinámica trata las transformaciones de la energía y sus leyes describen los límites dentro de los cuales se ha observado que ocurren estas transformaciones. La primera ley expresa que la energía se conserva en cualquier proceso común y corriente y no impone ninguna restricción respecto a la dirección del proceso; sin embargo, la experiencia indica

la existencia de esa restricción cuya formulación complementa los fundamentos de la ciencia termodinámica y su expresión concisa constituye la segunda ley.

La segunda ley de la termodinámica se puede expresar de diversas maneras. Sin embargo, independientemente de la terminología empleada, el propósito de la segunda ley es dar un sentido o dirección a los procesos de transferencia de energía. Al combinarla con la primera ley, obtenemos la información necesaria para analizar tales procesos de transmisión energética. La segunda ley de la termodinámica establece que:

Siempre que se transfiera energía, el nivel de la misma no puede conservarse, y parte de ella tiene que reducirse permanentemente a un nivel inferior.

Cuando combinamos lo anterior con la primera ley, el principio de conservación de la energía, se obtiene el resultado siguiente:

Siempre que se produce una transferencia de energía, esta debe conservarse, pero su nivel no puede permanecer igual, y parte de ella tiene que reducirse en forma permanente a un nivel inferior.

1.2.5.4.1 Postulados de la segunda ley de la termodinámica

1. Toda transformación cíclica cuyo único resultado final sea el de absorber calor de un cuerpo o fuente térmica a una temperatura dada y convertirlo íntegramente en trabajo, es imposible.
Postulado de Kelvin - Planck, 1851

2. Toda transformación cíclica cuyo único objetivo final sea el de transferir una cierta cantidad de calor de un cuerpo de baja temperatura a uno de mayor temperatura, es imposible.
Postulado de Clausius, 1850

El primer enunciado no implica que el calor no se pueda transformar en trabajo, sino que el proceso no puede dejar sin cambio al sistema ni a los alrededores.

La palabra cíclico indica que el sistema periódicamente regresa a su estado original. En el caso de que el proceso se repita, se transforma en un proceso cíclico.

La segunda ley no prohíbe la producción de trabajo a partir de calor, pero limita la fracción de calor que puede convertirse en trabajo en un proceso.

1.2.5.5 Tercera ley de la termodinámica

El principio de la termodinámica permite el cálculo de la entropía absoluta. El postulado de Nernst acerca de la tercera ley es: "La entropía absoluta de una sustancia cristalina pura en equilibrio interno total, es nula a la temperatura del cero absoluto (0°K)".

1.2.6 Exergía

La primera referencia del uso del término "EXERGIA" se atribuye a Rant en 1956. Antes de esta fecha, la exergía se conocía como "capacidad de trabajo" o "trabajo disponible"; desde entonces, el término ha sido aceptado mundialmente y se utiliza para proveer un desarrollo integrado de los principios de la segunda ley de la termodinámica aplicada a sistemas industriales reales.

En la década de los sesentas, fueron establecidos los fundamentos del método de exergía gracias a los trabajos de diferentes investigadores que aparecieron en diferentes libros, artículos y reportes técnicos.

1.2.6.1 Definición de la exergía

La exergía se define como el trabajo disponible en un gas, fluido o masa, como el resultado de su condición de no equilibrio relativa a alguna condición de referencia.

Esta condición se conoce como "Estado Muerto" y generalmente es al nivel del mar o condiciones atmosféricas del medio ambiente que rodea al sistema.

La exergía es una propiedad de estado explícita en las condiciones de equilibrio. Sus valores pueden ser calculados en cualquier punto del sistema de energía, a partir de las otras propiedades que son determinadas por el balance de energía en el proceso del sistema.

1.3 CALDERAS. (GENERADORES DE VAPOR)

En los generadores contemporáneos de vapor son varios los componentes dispuestos para absorber eficazmente el calor de los productos de la combustión. Estos componentes se describen en general en esta forma: (1) caldera, (2) sobrecalentador, (3) recalentador, (4) economizador y (5) calentador de aire.

Los generadores de vapor se planean para producir el vapor que se requiere en el proceso, para procesos con generación de energía eléctrica y, a veces, sólo para generación de energía eléctrica. En cualquier caso, el incentivo primario es diseñar la caldera más eficiente y confiable con el mínimo costo. Existen muchos factores que influyen en el diseño y selección del tipo de generador de vapor.

Las calderas del mercado industrial se han planeado para quemar una amplia variedad de combustible y operar a presiones hasta de 12.4 MPa (1,800 lbf/in²) y velocidades de vaporización hasta de 455,000 kg/h (1,000,000 lb/h). Se han ensamblado calderas de alta capacidad para operar en el intervalo de 4,500 kg/h (10,000 lb/h) hasta aproximadamente 250,000 kg/h (550,000 lb/h). Estas unidades se diseñan para trabajar a presiones hasta de 11.1 Mpa (1,650 psig) y temperaturas de 783 °K (950 °F). Aunque las calderas se diseñan para trabajar con combustible gaseoso o líquido, se tienen diseños para quemar carbón pulverizado. El incremento significativo en el costo de los combustibles y la creciente confianza en el carbón han sido el motor que impulsa hacia el empleo de calderas de alta capacidad, en áreas que trabajan a altas presiones y proporcionan sobrecalentamiento y posible recalentamiento.

Las calderas diseñadas para el servicio en sistemas de energía eléctrica con diversos usos, operan a presiones subcríticas (presiones por abajo de 221.1 bar (3,206 lbf/in²) y presiones supercríticas para el vapor. Los calentadores de presión subcrítica comprenden presiones de diseño hasta de 18.6 MPa (2,700 lbf/in²) y capacidades de vaporización hasta de $2,948 \cdot 10^3$ kg/h ($6,500 \cdot 10^3$ lb/h). Las calderas para presiones supercríticas se han creado para trabajar a presiones hasta de 344.5 bar (5,000 psig). En la práctica, se ha establecido el ciclo de 241.2 bar (3,500 psig) para la industria de servicios y también se encuentran en servicio calderas con capacidades de vaporización hasta de $4,219 \cdot 10^3$ kg/h ($9,300 \cdot 10^3$ lb/h) con temperaturas de sobrecalentamiento y recalentamiento de hasta 814 K (1,005 °F).

1.3.1 Bases fundamentales del diseño de calderas

El diseño de calderas incluye la interacción de muchas variables: circulación de vapor-agua, características del combustible, sistemas de combustión e introducción de calor y transferencia de calor. El límite del horno es uno de los componentes más importantes de un generador de vapor y debe diseñarse en forma conservadora para asegurar la alta disponibilidad de la caldera. La configuración del horno y sus dimensiones se determinan de acuerdo con los requerimientos de combustión, las características del combustible, los patrones de emisión de algunas sustancias específicas y la necesidad de proporcionar un flujo uniforme de gas y temperatura al entrar a las superficies de absorción de calor en la zona de convección, para reducir al mínimo los depósitos de cenizas, las temperaturas del metal sobrecalentado y los puntos de sobrecalentamiento en el metal.

1.3.2 Circulación y transferencia de calor

La circulación del agua o vapor, o una mezcla de ambos, a través de los tubos cercanos a la pared del horno, tiene la finalidad de absorber el calor a una velocidad que asegure un enfriamiento suficiente durante cualquier condición todas las condiciones de operación, con un margen adecuado de reserva para perturbaciones transitorias. Esto es con la finalidad de prevenir que las temperaturas o sus gradientes sean excesivos y puedan provocar fallas debido a sobreesfuerzo, sobrecalentamiento o corrosión del material de los tubos.

En los generadores de vapor, la circulación de agua, vapor o la mezcla de ambos a través de los tubos más próximos a las paredes del equipo, tienen como objetivo absorber el calor de los tubos a una velocidad que asegure un enfriamiento suficiente de los mismos durante cualquier condición de operación, con un margen adecuado de reserva para perturbaciones transitorias. Una circulación adecuada previene que las temperaturas o sus gradientes sean excesivos y puedan provocar fallas debido a un sobreesfuerzo, sobrecalentamiento o corrosión en el material de los tubos.

La transferencia de calor desde los tubos al fluido depende en primer término de la turbulencia y el flujo de calor. La turbulencia es una función de la velocidad de la masa del fluido y de la rugosidad del tubo. Se ha logrado alcanzar turbulencia para altas velocidades

1.3.1 Bases fundamentales del diseño de calderas

El diseño de calderas incluye la interacción de muchas variables: circulación de vapor-agua, características del combustible, sistemas de combustión e introducción de calor y transferencia de calor. El límite del horno es uno de los componentes más importantes de un generador de vapor y debe diseñarse en forma conservadora para asegurar la alta disponibilidad de la caldera. La configuración del horno y sus dimensiones se determinan de acuerdo con los requerimientos de combustión, las características del combustible, los patrones de emisión de algunas sustancias específicas y la necesidad de proporcionar un flujo uniforme de gas y temperatura al entrar a las superficies de absorción de calor en la zona de convección, para reducir al mínimo los depósitos de cenizas, las temperaturas del metal sobrecalentado y los puntos de sobrecalentamiento en el metal.

1.3.2 Circulación y transferencia de calor

La circulación del agua o vapor, o una mezcla de ambos, a través de los tubos cercanos a la pared del horno, tiene la finalidad de absorber el calor a una velocidad que asegure un enfriamiento suficiente durante cualquier condición todas las condiciones de operación, con un margen adecuado de reserva para perturbaciones transitorias. Esto es con la finalidad de prevenir que las temperaturas o sus gradientes sean excesivos y puedan provocar fallas debido a sobre esfuerzo, sobrecalentamiento o corrosión del material de los tubos.

En los generadores de vapor, la circulación de agua, vapor o la mezcla de ambos a través de los tubos más próximos a las paredes del equipo, tienen como objetivo absorber el calor de los tubos a una velocidad que asegure un enfriamiento suficiente de los mismos durante cualquier condición de operación, con un margen adecuado de reserva para perturbaciones transitorias. Una circulación adecuada previene que las temperaturas o sus gradientes sean excesivos y puedan provocar fallas debido a un sobre esfuerzo, sobrecalentamiento o corrosión en el material de los tubos.

La transferencia de calor desde los tubos al fluido depende en primer término de la turbulencia y el flujo de calor. La turbulencia es una función de la velocidad de la masa del fluido y de la rugosidad del tubo. Se ha logrado alcanzar turbulencia para altas velocidades

de masa, que asegura que la ebullición a nivel de núcleo tenga lugar en la superficie interna del tubo. Si no existe suficiente turbulencia, ocurre una desviación de la ebullición a nivel del núcleo. Se refiere a la formación de una película de vapor en la superficie interna del tubo que impide el flujo de calor para enfriar al mismo.

Se puede obtener una operación satisfactoria con tubos que tienen un reborde helicoidal en su interior, lo que genera un flujo en remolino. La acción de las fuerzas centrífugas resultantes obliga a que las gotas de líquido se dirijan hacia la superficie interna del tubo y previene la formación de una película de vapor. Las superficies con ranuras mantienen una ebullición a nivel del núcleo con mayor calidad de vapor y con velocidades de masa mucho menores que en los tubos lisos.

La razón de circulación, definida como el peso del flujo circulante dividida entre el peso del vapor generado, es un criterio empírico para la evaluación del funcionamiento de sistemas de circulación.

1.3.3 Clasificación de calderas

La superficie de la caldera se define como aquella parte de los tubos, tambores y cilindros que forman parte del sistema de circulación de la misma y están en contacto con los gases calientes por un lado, y con el agua (o con una mezcla de agua y vapor) por el otro. Aun cuando con la palabra "caldera" se nombra a toda la unidad generadora de vapor, la expresión "superficie de caldera" no incluye al economizador o cualquier otro componente que no sea la caldera misma.

Las calderas de vapor se clasifican de diferentes maneras :

- a) Atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua : en acuotubulares (o de tubos de agua) y piro-tubulares (o de tubos de humo).
- b) Por la posición de los tubos: en verticales, horizontales e inclinados.
- c) Por la forma de los tubos: de tubos rectos y de tubos curvados.
- d) 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.

1.3.3.1 Calderas pirotubulares o de tubos de humo

En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales se hallan rodeados de agua.

Posiblemente las más empleadas sean las llamadas de tipo Económico (horizontales), las cuales poseen uno o dos tubos de llama que constituyen el primer paso; los productos de la combustión invierten su sentido en la llamada cámara de combustión y pasan a través de tubos de menor diámetro que forman el segundo paso, al final de los mismos invierten de nuevo su sentido para circular por los tubos que forman el tercer paso. Hay calderas de dos, tres y cuatro pasos de humo.

Presentan como ventajas; dimensión reducida, gran efecto de acumulación, el ser poco sensibles a la carga y el no requerir un tratamiento de agua muy exigente.

Sin embargo por sus características constructivas la presión de vapor y la capacidad de vaporación son limitadas.

Características principales:

- Presión de hasta 17 kg/cm^2 .
- Producción de hasta 23 tm/h .

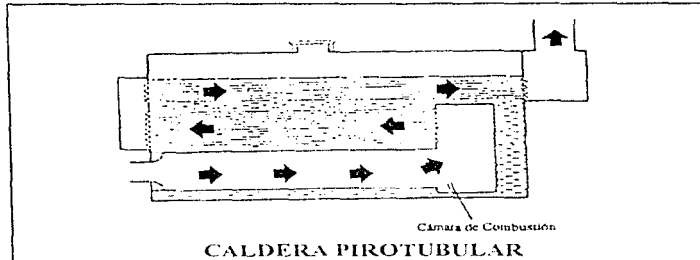


Figura 1.1

1.3.3.2 Calderas acuotubulares o de tubos de agua

En las calderas acuotubulares el agua y el vapor se encuentran dentro de los tubos y los gases calientes están en contacto con las superficies exteriores de los mismos. La caldera se construye con un cierto número de secciones de tubo, calentadores y cilindros, unidos de tal forma que se logra la circulación del agua para el enfriamiento adecuado de todas las partes, eliminando los esfuerzos indeterminados presentes en las calderas con tubos de humo. Con el diseño a base de tubos de agua es posible proteger cilindros pesados de los gases calientes y los esfuerzos térmicos elevados resultantes. Con una operación correcta, las explosiones quedan eliminadas cuando se emplean tubos de agua. Por otra parte, el espacio de agua se divide en secciones dispuestas de tal forma que si alguna sección fallara, no se produce una explosión general, limitándose así los efectos destructores.

La construcción con tubos de agua facilita el logro de una mayor capacidad en las calderas y el empleo de presiones más elevadas. Por otra parte, la caldera con tubos de agua ofrece una más variada adaptación en cuanto al diseño, lo que permite el empleo más eficaz del horno, el sobrecalentador, el recalentador y otros componentes de recuperación del calor.

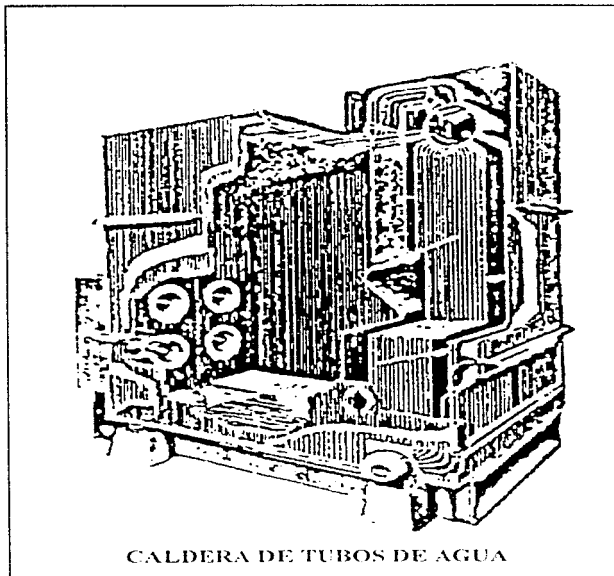
Estas calderas, básicamente constan de una cámara de combustión que ocupa aproximadamente la mitad del volumen de la caldera, la otra mitad se denomina la zona de convección y normalmente aloja el sobrecalentador. La geometría de cámara de combustión, es completamente diferente de las calderas piro-tubulares, es más bien de forma cúbica en vez de cilíndrica y alargada. El hogar suele ser de paredes refrigeradas por tubos de agua.

Las calderas de tubos de agua están previstas para presiones elevadas y capacidades de evaporación muy grandes. Asimismo, requieren una buena depuración y tratamiento del agua de alimentación.

Estas calderas se emplean en centrales térmicas, en papeleras para recuperación de licor negro, en refinerías y en industrias con consumos de vapor generalmente superiores a las 20 tm/h.

Características principales:

- Presiones entre 10 y 225 kg/cm².
- Producción de hasta 125 tm/h.



CALDERA DE TUBOS DE AGUA

FIGURA 1.2

1.3.3.3 Calderas de generación instantánea

Son calderas que pueden considerarse como de tubos de agua, se les denomina también generadores de vapor, calderas flash o calderas de serpentín.

Su capacidad de almacenamiento de agua, es muy reducida y el vapor se obtiene a pocos minutos de la puesta en marcha, pueden producir hasta 7 tm/h de vapor y presiones de hasta 20 kg/cm².

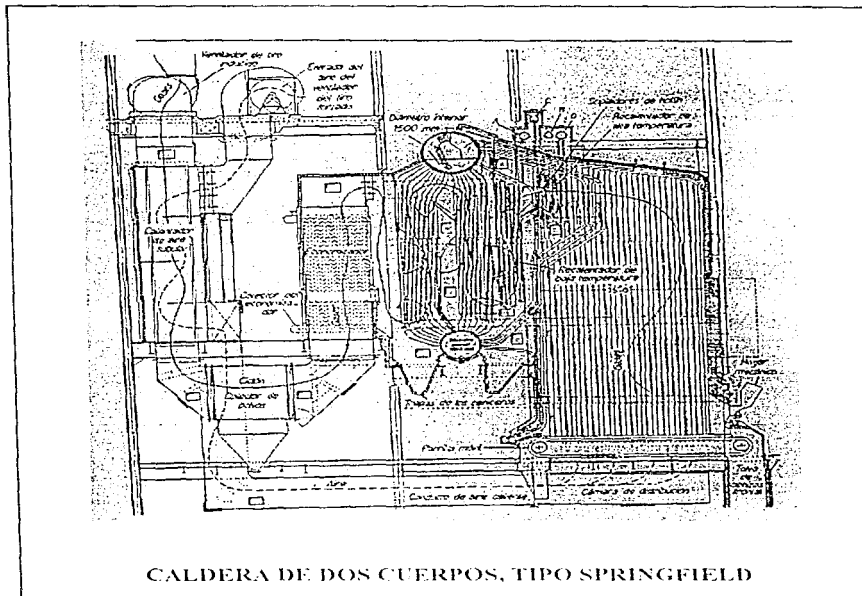
La cámara de combustión suele ser un cilindro vertical, concéntrico en su interior, y junto a las paredes hay un serpentín. El quemador normalmente funciona invertido (en sentido descendente) y los gases atraviesan los serpentines.

Este tipo de calderas, por su tamaño reducido y características suelen encontrarse en algunos hoteles, hospitales e industrias con consumo de vapor medio o bajos.

1.3.3.4 Generadores de vapor propios para centrales térmicas

La figura 1.3 representa un generador de vapor propio para una central térmica: capaz de producir 54.000 kg/h de vapor a una presión relativa de 43 kg/cm² y a una temperatura total de 440 °C a la salida del recalentador. El hogar de la caldera es mecánico, pero igualmente puede quemar, combustóleo, gas o carbón pulverizado. La caldera tiene dos cuerpos cilíndricos enlazados por tubos curvados y va equipada con ventiladores para tiro inducido y forzado, recalentador de aire tubular, colectores centrifugos de polvo, economizador tubular y recalentadores de baja y alta temperatura.

El cuerpo cilíndrico superior lleva lavadores y desecadores de vapor, a través del cual pasa el vapor saturado antes de entrar en el recalentador de baja temperatura. Los tubos de este recalentador están unidos individualmente al cilindro; de esta forma queda suprimido el colector de entrada. Al pasar el vapor del recalentador de baja al de alta temperatura se le inyecta agua procedente de la condensación en cantidad variable (1.350 kg/h como máximo) a la presión de la bomba de alimentación de la caldera, para controlar la temperatura final de recalentamiento. Este control mantiene una temperatura de 440 °C + 1 °C en el vapor que sale del recalentador de alta temperatura, incluso cuando la demanda del vapor varíe del 50 al 100% del valor nominal. El recalentador de alta temperatura se halla sometido a cierto calentamiento por radiación, ayudando de esta forma, a conseguir una temperatura de recalentamiento más uniforme al variar la carga.



CALDERA DE DOS CUERPOS, TIPO SPRINGFIELD

FIGURA 1.3

La figura 1.4 representa una caldera de cuerpo cilíndrico único propia para una central térmica. Su altura total llega a 45 metros. Su producción de vapor pasa de 612.900 kg/h y su presión relativa es de 161 kg/cm², con temperaturas del orden de 565 °C. El recalentamiento del vapor es controlable. El aire que sale de los ventiladores de tiro forzado atraviesa los precalentadores rotativos y de ellos pasa al hogar, en donde se distribuye entre los quemadores de carbón en forma de aire secundario. El aire primario se inyecta a través de los molinos de carbón y transporta el carbón pulverizado a los quemadores.

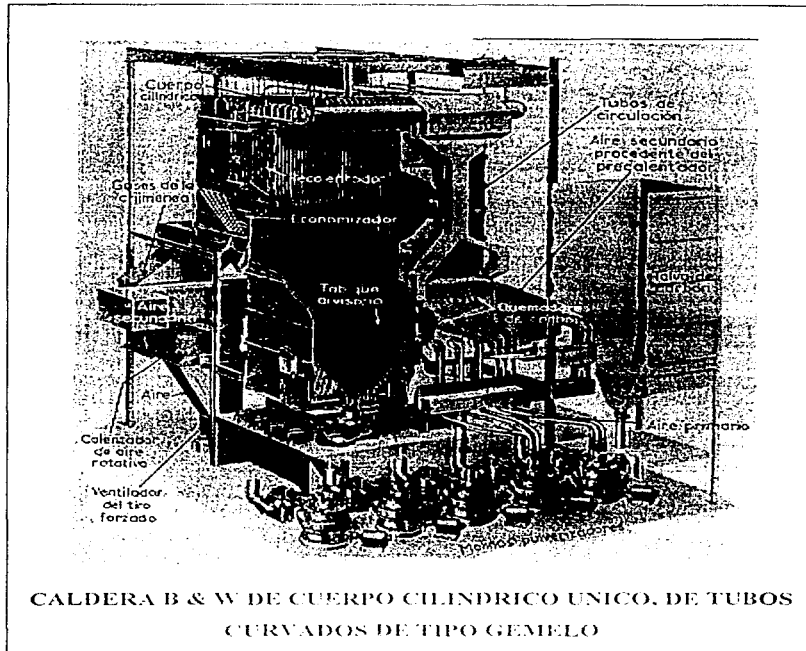


FIGURA 1.4

La figura 1.5 representa una caldera de paso abierto, construida para una producción máxima de vapor de 408,600 kg/h a una presión relativa de 66,5 kg/cm² y a una temperatura de 510 °C. En esta caldera los gases pasan tres veces por ella, tal como indican las flechas. Debido a que todos los tubos de la caldera a excepción de la hilera de enmedio (la cual hace de diafragma), están situados en las paredes laterales; la resistencia ofrecida al paso de los gases es mínima, así como también la limpieza de los tubos. Las cenizas se sacan de la caldera en forma de escorias fundidas; la altura de la unidad no es

excesivamente grande. El combustible es carbón pulverizado, el cual se inyecta a quemadores horizontales.

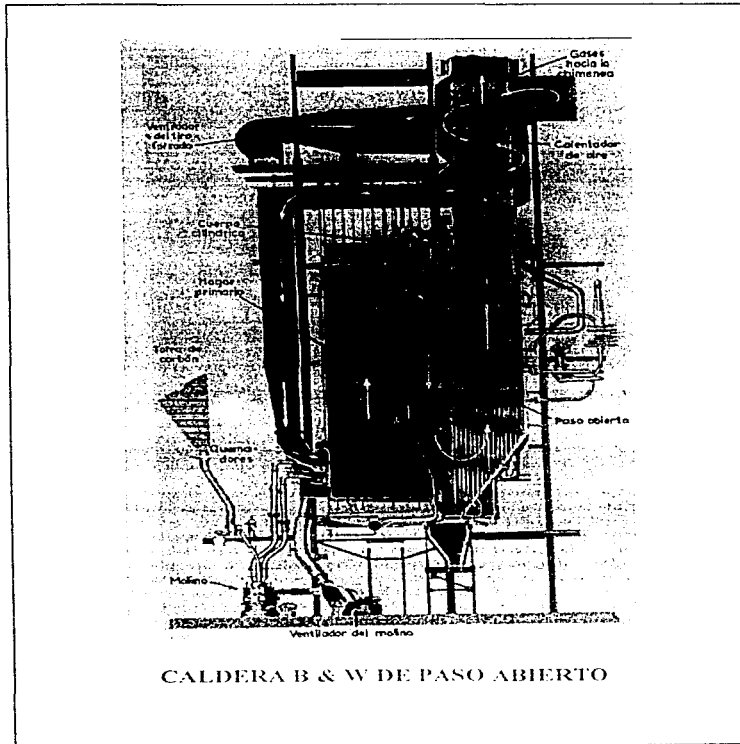


FIGURA 1.5

1.3.4 Comportamiento de las calderas

El comportamiento de un generador de vapor puede expresarse en función de los kilogramos de vapor producidos, velocidad de combustión, transmisión de calor en kcal por metro cuadrado de superficie de caldeo y por hora, temperatura de los gases de la chimenea, porcentaje de CO₂ en dichos gases, combustible sin quemar contenido en las cenizas y escorias, porcentaje de la potencia nominal de la caldera y rendimiento global.

La eficiencia global de una caldera de vapor, en cualesquiera condiciones de funcionamiento, es la relación entre el calor transmitido y la energía suministrada en forma de combustible, es decir:

$$\eta = (W_v(h_v - h_{aa}) / W_c * PCS) * 100$$

en donde:

- η = Eficiencia del generador de vapor, en %; incluyendo caldera, recalentador, hogar, camisas de agua, calentador del aire y economizador.
- W_c = Peso total del combustible quemado, en kg/h para combustible líquido o en m³/h tratándose de combustible gaseoso.
- PCS = Poder calorífico superior del combustible quemado, en kcal/kg para combustible líquido o en kcal/m³ tratándose de combustible gaseoso.
- W_v = Peso total del vapor generado, en kg/h.
- h_v = Entalpía del vapor en kcal/kg.
- h_{aa} = Entalpía del agua de alimentación en kcal/kg

La velocidad de combustión se puede expresar en kilogramos de combustible quemado (a) por metro cuadrado de superficie de parrilla y por hora, o (b) por metro cúbico de volumen de hogar y por hora. La capacidad que una caldera (kilogramos de vapor producidos por hora) puede desarrollar depende de la velocidad de combustión, es decir, de la clase de combustible, tamaño y tipo de parrilla, y cantidad de aire suministrada. En calderas de tipo de locomotora se han obtenido velocidades de combustión de 976 kg de carbón por metro cuadrado de superficie de parrilla y por hora, dando como resultado una gran capacidad de

producción, pero a expensas del rendimiento. En las centrales térmicas modernas se determina experimentalmente la velocidad de combustión apropiada para conseguir la máxima eficiencia en una caldera determinada. La eficiencia aumenta con la capacidad de la caldera y velocidad de combustión hasta alcanzar un valor máximo, pasado el cual disminuye al aumentar la capacidad de producción.

Las calderas provistas de hogares mecánicos pueden alcanzar una eficiencia comprendida entre 60 y 85%, dependiendo principalmente del tamaño de la caldera, forma del hogar y de los equipos auxiliares instalados para la recuperación de calor. Grandes instalaciones que queman carbón pulverizado tienen un rendimiento de caldera comprendido entre 80 y 88%. Si en estas centrales se utilizan precalentadores de aire y economizadores, se consiguen en ocasiones rendimientos globales del 85 al 92%.

1.3.5 Partes constitutivas de un generador de vapor acuotubular

Cada una de las partes que a continuación van a describirse, generalmente integran una unidad de tubos de agua a fuego directo, su inclusión va a depender básicamente del tipo y tamaño de la caldera a instalarse en una planta (Refinería, Central Eléctrica, Complejo Petroquímico, etc.).

1.3.5.1 Area de Combustión

1.3.5.1.1 Fogón

El fogón más comúnmente llamado "hogar" es la sección principal de la caldera, que tiene como propósito envolver la reacción química del combustible durante el proceso de combustión; el calor liberado en el seno de dicho proceso es rápidamente absorbido en altos porcentajes por las paredes que lo conforman, o por alguna de las otras superficies de absorción contenidas en él, como lo son el sobrecalentador radiante y el banco de tubos pantalla. Por lo tanto, en esta zona del generador es donde los gases, producto de la combustión, alcanzan las más altas temperaturas.

El fogón está constituido por las dos paredes laterales, la pared frontal y la pared de quemadores (esta última proporciona una protección adecuada, así como los soportes necesarios para el equipo de combustión seleccionado). Dichas paredes a su vez, están

constituídas por diversas secciones de tubos, ya sea desnudos o bien aletados, los últimos para ofrecer una mayor superficie de absorción de calor y una eficiencia más elevada. Además, van soldados entre sí o por medio de membranas con el fin de lograr un sello completo en el hogar y así evitar la más mínima fuga de gases de combustión hacia el exterior con sus consecuentes pérdidas de tiro y calor.

El volumen y configuración del hogar son función directa de la forma y longitud de la flama, las que a su vez dependen del tipo de combustible o combustibles alimentados y del tipo de dispositivo para quemarlos.

En general el hogar deberá diseñarse para cumplir con los siguientes lineamientos:

- Tener capacidad para suficiente aire, con objeto de reducir la temperatura de los gases a un nivel aceptable a los requerimientos de sobrecalentamiento.
- Tener la altura suficiente para asegurar una circulación adecuada del agua en los tubos.
- Tubos de diámetro adecuado para asegurar una mínima caída de presión y evitar impedancias en la mezcla agua-vapor, garantizando un flujo suficiente que se oponga a quemaduras en el tubo.
- Tamaño suficiente para evitar que la flama ataque las paredes. Forma y dimensiones adecuadas para asegurarse de que los gases llenen el hogar, proporcionando una absorción óptima de todas las partes y dar el tiempo necesario para que las partículas se quemen y reduzcan su temperatura abajo del punto de fusión.
- Limitar la formación de NO_x a niveles aceptables.

Los regímenes de calor absorbido deberán estar comprendidos preferentemente entre 19 a 15×10^6 BTU/Ft²/h. La capacidad de los quemadores deberá estar entre 110 a 130×10^6 BTU/h.

Los fogones son clasificados generalmente de acuerdo a sus diferentes características de operación o diseño como pueden ser:

- La ubicación de los quemadores en las paredes, los cuales pueden ser paralelos o bien tangenciales (situados en cada una de las esquinas del hogar).
- Por la construcción de sus paredes que pueden ser de refractario sólido, de refractario enfriado con aire, o de paredes enfriadas con agua (diseño que predomina actualmente).

- Por la presión mantenida en éstos se clasifican en presurizados (que incorpora únicamente en su diseño el ventilador de tiro forzado); de tiro balanceado (que incorpora tanto el ventilador de tiro forzado como el de tiro inducido en el sistema), y supercargado por el tipo de combustible que va a ser alimentado, el cual puede ser sólido como el carbón o desechos industriales, líquido como lo es el combustóleo o también desechos industriales, o bien gaseoso como el gas combustible.

1.3.5.1.2 Quemadores

Los quemadores son los dispositivos empleados para efectuar el proceso de combustión.

La combustión es el conjunto de combinaciones químicas que se producen a ciertas condiciones liberándose gran cantidad de calor. Para que se lleve a cabo la combustión, necesariamente deben estar presentes el combustible y el comburente (que es el aire atmosférico), pero ambos por sí solos no la producen, ya que no es un proceso espontáneo. Se requiere de una alta temperatura para que la combustión tenga lugar. Si la liberación de calor producida por la combustión es suficiente para mantener la temperatura necesaria, la combustión podrá mantenerse y la flama será estable.

Los quemadores pueden clasificarse de acuerdo al tipo de combustible a quemar:

- **QUEMADORES DE ACEITE:** Vaporizan o atomizan el combustible alimentado y lo mezclan con el aire suministrado para la combustión. Cuando se cumplen estas condiciones se consigue obtener una combustión completa con un exceso de aire mínimo.
- **QUEMADORES DE GAS:** Son divididos generalmente en dos grupos de acuerdo a la presión del gas combustible que se requiere en la boquilla para lograr una operación satisfactoria:
 - (a) Quemadores de gas a baja presión,
 - (b) Quemadores de gas a alta presión.

- **QUEMADORES DE COMBINACION ACEITE-GAS:** Los quemadores de combinación resultan de adaptar cañones de aceite a los diferentes tipos de quemadores de gas.
- **QUEMADORES DE CARBON (MATERIAL SOLIDO):** Los quemadores pueden diseñarse específicamente para quemar diferentes tipos de carbón mineral, usualmente por medio de pulverizadores o por la acción mecánica de "stokers". Su selección depende básicamente de un análisis económico para determinar la factibilidad de cualquiera de los dos dispositivos.

1.3.5.1.3 Paredes de agua

En las unidades modernas, las paredes de agua consisten en tubos verticales, que conectan al cabezal inferior con el superior, formando las paredes del hogar; su función principal es generar vapor y a su vez enfriar el hogar. Existen algunos diseños de construcción de paredes de agua y son:

- PAREDES DE MEMBRANA.
- PAREDES DE MEMBRANA CON FORRO REFRACTARIO.
- PAREDES TANGENCIALES.
- PAREDES DE TUBO Y LADRILLO.

1.3.5.1.4 Chimenea

Las principales funciones de una chimenea son: a) inducir el flujo de aire de combustión hacia el interior de la caldera y b) producir el tiro suficiente para que el flujo de los gases de combustión supere todas las obstrucciones y sean descargados a la atmósfera, al mismo tiempo mantener una presión negativa a lo largo de todo el sistema.

1.3.5.2 Area de generación

1.3.5.2.1 Domo de la caldera (domo de vapor)

El domo de vapor es un recipiente a presión de paredes de gran espesor, generalmente de forma cilíndrica con cabezas semiesféricas, dotado de boquillas para las líneas de agua de

alimentación, alimentación de químicos, descarga de vapor principal y de purgadas continuas e intermitentes. Tubos cortos para: la salida de agua al circuito de la caldera, salida de vapor saturado hacia el sobrecalentador y entrada de la mezcla agua-vapor proveniente del hogar y del banco generador.

1.3.5.2.2 Banco de tubos o banco generador

El banco generador está constituido por un haz de tubos vertical soportado en su parte superior por el domo de vapor y en su parte inferior por el domo de agua o de lodos.

Los tubos van reducidos de diámetro en sus extremos y éstos se unen a los domos. Este diseño aumenta la capacidad de la caldera, ya que se puede colocar un mayor número de tubos en el espacio disponible en los domos.

El banco generador se localiza después del sobrecalentador. Tanto el hogar como el banco generador, tienen la característica de estar integrados por una porción de tubos en los que circula una mezcla de líquido y vapor, o exclusivamente líquido, por lo que en esta sección de la caldera se genera únicamente vapor saturado, el que se alimenta al domo superior o de vapor.

1.3.5.2.3 Tubos escudo (pantalla)

Son las primeras hileras de tubos en la zona de convección. Reciben calor de radiación proveniente del refractario del hogar (si se cuenta con él), y también recibe calor de radiación y convección de los gases de combustión que pasan a través de ellos.

Los tubos están conectados en su parte inferior con el domo de agua o de lodos y en su parte superior con el domo de vapor. Son tubos espaciados perpendicularmente con respecto al flujo de los gases de combustión, para prevenir el taponamiento debido al hollín que contienen los gases y así facilitar la limpieza de estos. La circulación de agua a través de los tubos pantalla es ascendente.

En unidades pequeñas, el sobrecalentador reemplaza a los tubos pantalla.

1.3.5.2.4 Sobrecalentador

El sobrecalentador es una superficie que absorbe calor y su función es elevar la temperatura de vapor por encima de la temperatura de saturación.

Existen dos ventajas para que un generador de vapor tenga sobrecalentador: primera, hay una ganancia termodinámica en cuanto a eficiencia, y la segunda, es que el sobrecalentador seca el vapor antes de que entre a la turbina.

Está formado por un sistema de tubos que se interponen al paso de los gases, es alimentado con vapor saturado de la caldera misma, de modo que el vapor recibe una cantidad adicional de calor que procede de los gases de combustión. Esta transferencia de calor eleva la temperatura de vapor y aumenta su volumen.

En el sobrecalentador, el vapor llega directamente de la superficie principal de calefacción de la caldera y ocupa aproximadamente un 9% del área de transferencia total absorbiendo un 10% del calor.

Los sobrecalentadores se pueden clasificar de acuerdo a la transferencia de calor en:

- SOBRECALENTADORES POR CONVECCION.
- SOBRECALENTADORES POR RADIACION.
- SOBRECALENTADORES COMBINADOS (RADIACION Y CONVECCION).

El diseño y tipo de sobrecalentador depende esencialmente del destino y uso final del vapor.

1.3.5.2.5 Desobrecalentador o atemperador

El control por atemperación significa que la temperatura del vapor sobrecalentado se reduce quitándole energía, dándole a la turbina las condiciones de temperatura precisas.

El desobrecalentador tipo spray esprea agua directamente al vapor, el agua es evaporada por el vapor y la temperatura de la mezcla disminuye.

El desobrecalentador se localiza a la descarga del cabezal de salida del sobrecalentador o en algún paso intermedio de éste.

1.3.5.2.6 Domo de lodos

Generalmente se encuentra localizado en la parte inferior del banco de tubos a los cuales se encuentra interconectado, el agua que desciende a través de los mismos es recibida en este domo en donde se llega a acumular una gran cantidad de residuo que arrastra el agua, formándose lodos en el fondo del domo.

1.3.5.3 Area de recuperación de calor

1.3.5.3.1 Economizador

Cuando los gases abandonan la sección de absorción de calor de la caldera, contienen una cantidad considerable de energía calorífica, la cual es recuperada por un economizador.

Los economizadores calientan el agua de alimentación y por cada 10 °F de incremento en la temperatura, la eficiencia del generador de vapor se incrementa en 1%.

Los economizadores son usados cuando la temperatura del flujo de gases es baja y se espera que haya condensación ácida.

Los economizadores pueden ser de hierro fundido y se emplean en el caso anterior, pero los de tubos de acero son los de uso más común.

La tubería de acero puede ser delgada y con espacios más cerrados, ofrece una mayor superficie de transferencia de calor por cm. menor peso y es más económica. Ya que a más bajas temperaturas es necesario exponer una mayor área, por esta razón se añade una superficie de absorción extendida para incrementar el contacto entre el metal y el gas.

Para evitar la corrosión interna, el agua que entra al economizador generalmente es desaireada. Esto también es una buena práctica para mantener un pH entre 8 y 10 . La temperatura del agua a la entrada puede causar condensación en la parte externa de las superficies. Este factor limita las temperaturas de entrada del agua a 200°F, para unidades de alta presión.

Un economizador ocupa un 6% del área total de transferencia y absorbe un 6% del calor total.

Podemos clasificar a los economizadores de la siguiente forma:

- ECONOMIZADORES INTEGRALES.
- ECONOMIZADORES ADYACENTES.
- ECONOMIZADORES EXTERNOS.
- ECONOMIZADORES CONDENSANTES.

1.3.5.3.2 Recalentador

El recalentador es una absorbedor de calor. El cual eleva la temperatura del vapor arriba de su punto de saturación.

El vapor al trabajar en una máquina o en una turbina se expande, baja su presión y por consiguiente pierde calor. A consecuencia de esta pérdida de temperatura, el vapor descenderá pronto hasta el punto de saturación si el sobrecalentamiento fue insuficiente. Para evitar esta posibilidad, las turbinas se diseñan de tal manera que el vapor es recirculado para su recalentamiento antes de pasar a las etapas finales de la misma. La tendencia de la construcción actual es intercalar un ciclo de recalentamiento para cada instalación, excepto en las presiones supercríticas en las que se trabajan con dos ciclos de recalentamiento.

Es preferible recalentar y no tratar de elevar demasiado la temperatura inicial debido a los problemas que se presentan durante la atemperación.

Los recalentadores se clasifican en:

- RECALENTADORES POR CONVECCION.
- RECALENTADORES POR RADIACION.

1.3.5.3.3 Precalentador de aire

Un precalentador de aire es un equipo de intercambio de calor, a través del cual el aire absorbe indirectamente el calor cedido por los gases de combustión.

El empleo de los precalentadores de aire es necesario, puesto que, una reducción de 55 K en la temperatura de los gases de combustión significa que la eficiencia de la caldera aumenta de un 2.3 a 2.6% aproximadamente; o bien, incrementar en 55 K la temperatura del aire de combustión, dará como resultado un aumento en la eficiencia térmica del 2% aproximadamente.

Los precalentadores pueden clasificarse de acuerdo con su principio de operación, de la siguiente manera:

- PRECALENTADORES RECUPERATIVOS.
- PRECALENTADORES REGENERATIVOS.

1.3.5.4 Equipos auxiliares

1.3.5.4.1 Ventiladores

Un ventilador mueve cierta cantidad de gas o de aire, al añadirle a éstos suficiente energía para empezar su movimiento y vencer todas las resistencias para establecer un flujo. Consiste en un rotor de aspas o de un impulsor que toma el aire de un colector, lo descarga y lo dirige a donde se requiere. La fuerza requerida depende del aire o gas movido por unidad de tiempo, de la presión diferencial requerida, y de la eficiencia y manejo del ventilador.

Existen esencialmente dos clases de ventiladores:

- VENTILADORES CENTRIFUGOS.
- VENTILADORES DE FLUJO AXIAL.

1.3.5.4.2 Sopladores de hollín

La acumulación de cenizas procedentes de los productos de combustión constituyen una fuente de problemas para la operación y mantenimiento del equipo, puesto que se adhieren a la superficie de transferencia de calor reduciendo el área de contacto del flujo de gases.

además de causar corrosión. La acumulación de ceniza reduce el coeficiente de transmisión de calor puesto que incrementa fuertemente la resistencia al paso del calor.

Por las razones anteriores, la acumulación de escoria y hollín tiene que ser removida. El método más usado para la limpieza es el soplado, que consiste en el empleo de aparatos mecánicos para lanzar chorros de vapor o aire a presión, para limpiar las superficies de absorción de calor.

Los tipos de sopladores de hollín generalmente empleados son:

- SOPLADORES RETRACTILES.
- SOPLADORES FIJOS.

1.4 TERMOGRAFIA

1.4.1 Reseña histórica

Hará poco menos de 200 años que la existencia infrarroja del espectro electromagnético ni siquiera se sospechaba; su descubrimiento fue meramente accidental por el Astrónomo Real William Herchel, del Rey Jorge III de Inglaterra, mientras buscaba un material para usarlo como filtro óptico y así reducir la brillantez de la imagen del sol en los telescopios durante sus observaciones.

Mientras ensayaba con diferentes muestras de vidrio coloreado, que emitían reducciones similares en brillantez, encontró que algunas de las muestras pasaban muy poco calor solar, mientras otras pasaban tanto que era un peligro para sus ojos después de unos segundos de observación.

Repetiendo el experimento del prisma de Newton, buscando más por el efecto de calor que la distribución visual de intensidad en el espectro, encontró un rápido aumento en la temperatura al final del violeta y del rojo del espectro visible, también descubrió una región oscura más allá del rojo, la cual es conocida ahora como porción infrarroja del espectro electromagnético.

1.4.2 Introducción

Termografía es la técnica de detectar y medir variaciones en energía emitida como calor por varias regiones de una superficie y convertirlas en señales electrónicas que pueden ser registradas y analizadas. En la industria en que se requiere de la termografía, es necesaria la combinación de equipo adecuado y personal de operación para emplearla efectivamente como una poderosa herramienta de diagnóstico.

Radiómetros de imagen de alta resolución proveen información en la forma de desplegado en tiempo real, el cual puede ser cuantificado e interpretado en sitio o almacenados en cinta de vídeo o disco flexible para un análisis más profundo.

Antes de hacer una inversión en un radiómetro de imágenes térmicas (termógrafo), es importante evaluar cómo será empleado el instrumento y considerar las necesidades reales de la aplicación y todas las características del sistema que conduzcan al mejor balance de funcionamiento, tales como:

- Líneas de infrarrojo por marco.
- Píxeles por marco.
- Imágenes por segundo.
- Líneas de infrarrojo por segundo.
- Velocidad de datos (date rate).
- Consumo de energía.
- Relación señal a ruido.
- Peso.
- Velocidad de formación de imágenes.
- Resolución de muestreo digital.
- Resolución espacial.

1.4.3 Técnicas de inspección termográficas

La termografía infrarroja es una herramienta relativamente nueva en el inventario de personal de mantenimiento de plantas y de los coordinadores de conservación de energía.

El equipo infrarrojo para termografía en tiempo real, permite la inspección rápida y adecuada de equipos y líneas de proceso para detectar pérdida y radiación de energía que

ordinariamente podrían pasar desapercibidas. Además del descubrimiento rápido de estas anomalías, que bajo otras condiciones podrían ser invisibles y desconocidas, es posible grabarlas utilizando un accesorio simple y medir temperaturas exactas en el área de interés.

El equipo opera de manera muy similar a un sistema de circuito cerrado de T.V.; en vez de recibir la luz incidente, el escáner recibe la radiación infrarroja emitida por el objeto que esta siendo enfocado. La radiación infrarroja es dirigida mediante óptica especial, a un detector infrarrojo que ha sido subenfriado a una temperatura aproximada de -168°C (-270°F).

El detector cambia las salidas de voltaje conforme capta la radiación infrarroja incidente, estos voltajes los amplificados y posteriormente presenta una imagen infrarroja en blanco y negro o una imagen a color en pantalla de cristal líquido (LCD), de la misma forma que una T.V. presenta una imagen visual.

En algunos equipos la imagen es generada a razón de 25 cuadros por segundo; los desarrollos tecnológicos actuales hacen posible equipos portátiles con velocidad de adquisición de 60 imágenes/seg, lo que elimina centelleo y da la posibilidad de inspecciones en movimiento y la captura de eventos térmicos rápidos sin deformación en la imagen. Asumiendo que un punto en la imagen es una temperatura conocida, entonces el operador podrá determinar las temperaturas de otros puntos de la termografía de manera muy exacta.

En las imágenes o termografías es posible detectar y medir temperaturas de hasta 51,200 puntos, el tamaño equivalente de un punto es el de un termopar de contacto ordinario.

La diferencia mínima de temperatura detectable para sistemas de alta resolución es de 0.1°C y en el peor de los casos de 2°C .

Cuando consideramos la portabilidad y movilidad de los equipos de infrarrojo disponibles actualmente, muchas aplicaciones rentables en refinerías y plantas petroquímicas vienen a la mente.

Las aplicaciones rentables en la industria para este equipo son:

- La inspección de sistemas de distribución y transmisión eléctrica.
- Fallas en el flujo de fluidos.
- Inspección del estado de aislamiento y del refractario.

- Programas de conservación de energía (evaluación de pérdidas de energía); etc.

Una de las grandes bondades de los equipos de infrarrojo es la de que se manejan a distancia de sus objetivos, por lo cual la producción de la Planta no se interrumpe y, por supuesto, la maquinaria podrá estar trabajando a toda su capacidad, a toda potencia y a su máxima temperatura de operación durante la inspección para poder encontrar problemas de sobrecalentamiento.

Los sistemas de imagen infrarroja no solo muestran en la pantalla la imagen del patrón térmico de un objeto, sino que también "mide" las temperaturas de cualquier punto del objeto en cuestión, de ahí la posibilidad de localizar de inmediato los problemas potenciales, una vez conociendo los gradientes.

La aplicación universal de la inspección infrarroja puede ser resumida así: **"El exceso de calor (o frío) en una área local es la primera manifestación de problemas"**

Este simple hecho no puede ser discutido. Es una realidad en el campo industrial, médico, militar, aeroespacial y en todos los campos donde toma lugar algún proceso dinámico.

A fin de hacer máximo uso de estos sistemas, se ha encontrado que la tradicional y bien establecida filosofía de mantenimiento de planta "repararlo, cuando deje de funcionar", podría ser substancialmente mejorado adoptando un nuevo y superior concepto: "mantenimiento predictivo con equipos infrarrojo".

Usando esta nueva filosofía, pueden ser instituidos verdaderos programas de mantenimiento preventivo de plantas, los cuales arrojarían reducciones muy significativas de costos en el área de operaciones de planta.

Los sistemas típicos que normalmente pueden ser inspeccionados en plantas industriales son: subestaciones, barras, centros de control de motores, motores y todo equipo de proceso crítico.

Otra área donde la inspección infrarroja juega un papel importante en la industria es en las áreas termomecánicas: pérdida de refractario, deterioro de paredes de recipientes, reactores, regeneradores, bloqueo de flujo en tuberías de gas, hermeticidad en válvulas, así como la

aplicación en turbinas conociéndose por ejemplo: temperatura exacta de carcaza en todas las etapas.

Con la localización de estos problemas en sus diferentes etapas y su clasificación de acuerdo a su gravedad, pueden ser planeadas las medidas de corrección, además de poderse instituir y sincronizar con los programas de producción con un ahorro considerable de dinero.

Las ventajas técnicas más significativas de las inspecciones infrarrojas se apoyan en:

- La velocidad de las inspecciones.
- Las inspecciones no interrumpen la operación del equipo.
- Localiza el punto exacto del problema.
- Las inspecciones localizarán problemas que, en la mayoría de los casos, pasarán inadvertidos usando técnicas convencionales.

Una inspección infrarroja en una turbina nos localizará puntos y áreas con problemas potenciales de acuerdo al mapa térmico que se manifieste, así como problemas que pueden existir en componentes eléctricos, válvulas, etc., en sus diferentes etapas; igualmente al conocer el perfil térmico de las chumaceras se podría advertir problemas existentes en esta zona, por ejemplo un desalineamiento.

De lo anterior, podemos deducir lo siguiente:

La determinación de las temperaturas en cualquier elemento o sistema permitirá evaluar satisfactoriamente su estado, detectar problemas incipientes y al correlacionarla con otras técnicas de medición (vibración, pulsación, flujo) se podrá obtener un diagnóstico de falla certero.

Es por esto que la inclusión de inspecciones termográficas rutinarias en los programas de mantenimiento predictivo es cada vez más necesario en la industria moderna.

1.5 RADIOMETRO MODELO 760: SISTEMA DE ADQUISICION Y MEDICION DE IMAGENES TERMICAS EN INFRARROJO

El equipo utilizado en la inspección termográfica de la caldera en cuestión, tiene características indispensables y suficientes que cumplen con los requerimientos de un estudio confiable con datos precisos.

A grandes rasgos, las características más importantes del termógrafo utilizado son las siguientes:

- ◆ Alta velocidad de visualización.
- ◆ Resolución espacial.
- ◆ Exactitud en la medición de temperatura.
- ◆ Imagen desplegada uniformemente.
- ◆ Amplia capacidad de paquetería
- ◆ Almacena mediciones e imágenes de alta resolución
- ◆ Acceso a espacios estrechos.
- ◆ Menor degradación de imagen por humedad atmosférica, ya que el equipo es de onda larga.
- ◆ Su capacidad de almacenamiento y análisis posterior de la información se ven favorecidos por su compatibilidad con diferente software.
- ◆ Emplea enfriamiento eléctrico que hace posible la movilidad total necesaria para inspecciones en instalaciones grandes y elimina la necesidad de emplear nitrógeno líquido como medio de enfriamiento.

El tipo de software que puede utilizarse como herramienta complementaria en los estudios termográficos serán descritos en el capítulo IV al igual que las características del termógrafo y su utilidad de manera más detallada.

1.6 THERMAGRAM 95 PARA WINDOWS

1.6.1 Características y/o ventajas del software utilizado durante el análisis de la información termográfica.

ThermaGRAM 95 para Windows es un programa que facilita la captura y análisis de imágenes térmicas. Las imágenes pueden ser cargadas a partir de archivos guardados o vistas "en vivo" conectando una cámara o cualquier otra fuente de vídeo como puede ser una videograbadora a una tarjeta GRAM instalada en una computadora personal. Las imágenes "en vivo" pueden ser instantáneamente congeladas utilizando la tarjeta GRAM y posteriormente almacenadas en disquete. Un comando de almacenamiento incrementable permite almacenar fácilmente una secuencia de imágenes con una serie de nombres de archivos relacionados. Esta secuencia de archivos puede ser entonces cargada automáticamente en orden dentro de una ventana de imagen para realizar un análisis utilizando una serie de herramientas predeterminadas.

Las imágenes pueden ser desplegadas utilizando una amplia gama de paletas de pseudo color y el rango de temperatura de la paleta puede ser cambiada manualmente u optimizado. El programa brinda una extensa gama de herramientas las cuales pueden ser aplicadas a imágenes estáticas cargadas de algún disquete, imágenes congeladas utilizando la tarjeta GRAM, así como imágenes "en vivo" en donde los resultados que se producen son actualizados y desplegados continuamente en tiempo real.

ThermaGRAM actúa como servidor permitiendo que objetos, tales como las herramientas e imágenes, puedan ser incorporados en otras aplicaciones como procesadores de textos u hojas de cálculo.

Es posible también incorporar imagen "en vivo" dentro de documentos utilizando la opción de congelar para seleccionar la imagen que se desea capturar para el reporte.

Definiendo plantillas de reportes e incorporándoles imágenes de la manera mencionada anteriormente, facilita la generación de reportes.

1.6.2 Características de las tarjetas digitalizadoras

Las tarjetas GRAM incorporan un convertidor analógico a digital de alta precisión para mediciones exactas de temperatura en tiempo real. Con electrónica digital de lazos de fase cerrada asegura una sincronización de vídeo libre de vibraciones en la señal de las videograbadoras. Las tarjetas GRAM utilizan memorias de doble puerto que permiten el acceso simultáneo del total de los datos de la señal que están llegando sin provocar distorsión en los datos.

La técnica de pseudo-color es utilizada en imágenes "en vivo" y estáticas ya que soporta múltiples paletas independientes e isotermas controladas separadamente para cada ventana. La tarjeta GRAM mejorada permite substraer imágenes "en vivo" y también las promedia.

Las tarjetas GRAM permiten desplegar la información contenida en el intervalo de referencia vertical (VIR) para brindar acceso en tiempo real a la información. La ganancia programable y los niveles de blanco y negro aseguran una medición de temperatura adecuada en tiempo real en imágenes provenientes de una entrada de señal de vídeo.

1.6.3 Lista parcial de características funcionales

<ul style="list-style-type: none">• Fácil de aprender y de utilizar.• Servidor OLE2 (edición "en sitio").• Escalabilidad de imágenes en ventanas.• Puerto de entrada digital para vídeo• Infrarrojo.• Dos señales IR o de vídeo adicionales pueden ser desplegadas simultáneamente (utilizando hardware adicional).• Despliegado de imágenes visuales en tiempo real utilizando tarjetas de vídeo con congelación simultánea de imágenes IR y visuales.• Medición puntual de temperatura múltiple.• Generación de reportes utilizando cualquier procesador de texto Windows.• Perfiles de temperatura por línea.• Histogramas.• Etiquetación de imágenes con selección de tipo de letra.• Amplificación de áreas definidas.• Zoom Térmico-Estático y dinámico.• Múltiples paletas de colores.	<ul style="list-style-type: none">• Vaciado de datos en ASCII.• Herramientas Diferenciadoras para desplegar diferencias de temp. entre puntos.• Capacidad para definir áreas y arrojar lecturas de temperatura en las mismas.• Soporta los siguientes formatos de imagen: Inframetrics ThermaGRAM para Dos. Inframetrics Modelos Serie 700 TIFF escala de gris de 8 bits Imágenes de otras cámaras IR.• Tecnología "Arrastrar y dejar caer".• Las mediciones de temp. en las imágenes se actualizan y despliegan continuamente en tiempo real.• Alineamiento de imágenes patentado PosiTrak.• Grabación y apertura autoincrementable de imágenes.• Ayuda sensitiva de contexto del más avanzado desarrollo.• Múltiples comandos de deshacer/repertir.
---	--

CAPITULO II

CONSIDERACIONES SOBRE AHORRO DE ENERGIA

<i>2.1 IMPORTANCIA DE LA ENERGIA EN MEXICO</i>	<i>43</i>
--	-----------

<i>2.2 TECNICAS DE CONSERVACION DE ENERGIA TERMICA</i>	<i>46</i>
2.2.1 Racionalización de la combustión	46
2.2.1.1 Reducción del exceso de aire	46
2.2.2 Conservación de energía en la generación y uso de vapor	46
2.2.2.1 Reducción de la presión del vapor generado	46
2.2.2.2 Recuperación de energía por presiones altas en el vapor generado	47
2.2.2.3 Reducción de purgas	47
2.2.2.4 Recuperación del calor de las purgas	48
2.2.2.5 Recuperación de condensados	48
2.2.3 Reducción de pérdidas de calor	49
2.2.3.1 Aislamiento térmico	49
2.2.3.2 Hermeticidad de equipos de combustión	49
2.2.3.3 Limpieza de las superficies de transferencia de calor	49
2.2.4 Recuperación de calor residual	50

<i>2.3 RECUPERADORES DE ENERGIA</i>	<i>51</i>
2.3.1 Precalentador de aire	51
2.3.2 Economizador	52
2.3.3 Efectos del ahorro de energía con un precalentador de aire	54
2.3.4 Efectos del ahorro de energía con un economizador	54

CAPITULO II CONSIDERACIONES SOBRE AHORRO DE ENERGIA

2.1 IMPORTANCIA DE LA ENERGIA EN MEXICO

El crecimiento del consumo de energía en México, radicó en factores tales como el crecimiento industrial, el crecimiento demográfico y la disponibilidad de energéticos nacionales.

A partir de 1970, la industria en México, ha producido bienes con una alta intensidad energética, como es el caso de la Siderurgia, Cemento, Petroquímica, Celulosa, Papel y Vidrio. Parte del aumento en la intensidad energética radica en el uso ineficiente de combustible y electricidad, y en la aplicación de tecnologías con alto consumo de energía.

Desde el descubrimiento de pozos petrolíferos y hasta nuestros días la principal fuente de energía ha sido y será, para los próximos años, el petróleo y sus derivados, y a la par del desarrollo de dicha fuente ha surgido la necesidad del ahorro de energía, representando un papel importante en la economía del país, aunque debido al impacto ambiental que ha tenido en los últimos años se a tratado de diversificar las fuentes de energía.

Además de los recursos fósiles, (carbón e hidrocarburos) que son fuentes de energía no renovables, existen diversas fuentes de energía alternas como son: los esquistos y arenas bituminosas, hidráulicos, nuclear, geotermia, solar, energía del viento, y generador magnetohidrodinámico (MHD).

México posee una amplia variedad de recursos energéticos en la que los hidrocarburos predominan. La producción de energía primaria está constituida por: el carbón, el petróleo crudo, los condensados, el gas natural asociado y no asociado, la generación de electricidad por la vía nuclear, geotérmica e hidroeléctrica y la biomasa (leña y bagazo de caña).

Los indicadores energéticos relevantes contenidos en el Balance Nacional de Energía de 1994 son los siguientes:

Medida con base en el consumo nacional de energía y el Producto Interno Bruto (PIB) a precios de 1980, la **intensidad energética** en 1994 aumentó en 0.1% respecto al año de 1993, registrando 242.625.5 kilocalorías por nuevo peso producido. **El consumo de energía por habitante** aumentó en 1.7% al pasar de 15.5 a 15.8 millones de kilocalorías entre 1993 y 1994.

La producción nacional de energía primaria totalizó 2103.9 petacalorías, cifra inferior en 0.4% con respecto al año anterior. En términos generales, el decremento se debió a la menor producción de petróleo crudo, condensados, nucleenergía, geoenergía hidroenergía y bagazo de caña. De esta forma, las fuentes primarias de energía que registraron un crecimiento significativo en su producción fueron el carbón, el gas no asociado y el gas asociado, mientras que el crecimiento de la leña no fue relevante.

En términos de estructura, los hidrocarburos se mantuvieron como la principal fuente en la producción de energía primaria, participando con el 90.7% , cifra superior en 0.4 puntos porcentuales comparada con la de 1993. Respecto a las otras fuentes primarias, la biomasa participó con el 3.7%, la electricidad con el 3.6% y el carbón con el 2.0%.

El 91.9% de la oferta interna bruta de energía primaria fue destinado a centros de transformación, el 6.7% fue directamente a consumidores finales y el 1.4% restante se distribuyó entre el consumo propio del sector energético, las pérdidas y la diferencia estadística.

Las exportaciones de energía disminuyeron en 5.9%, observándose una participación de 92.6% para el petróleo crudo, mientras que los productos refinados participaron con el 7.2% y la electricidad con el 0.2% restante.

El incremento de 10.4% observado en las importaciones de energía provino de las mayores adquisiciones de electricidad, las cuales aumentaron 25.3%, el gas natural en 24.2%, los productos petrolíferos en 9.0% y el carbón y coque en 8.5%

El consumo nacional de energía se incrementó en 3.6 por ciento durante 1994.

Del total, el 29.9% fue consumido por el propio sector energético y el 70.1% se destinó a consumo final.

En 1994, el consumo final de energía creció en 3.7% respecto al año anterior. Igualmente el consumo energético aumentó en 3.7%, mientras que el consumo no energético lo hizo en 3.8%.

La estructura del consumo final muestra que el 36.9 por ciento correspondió al sector transporte, el 31.5% a la industria, el 20.4% al sector residencial, comercial y público y el 2.1% al sector agropecuario. El consumo no energético participó con el 9.1 por ciento.

Por energético, destacó el consumo de gasolina con el 26.7% del consumo final total, seguido del gas natural con 17.5%, el diesel con 12.1%, el gas licuado con 9.8%, la electricidad con 9.5%, el combustóleo con 7.0%, la leña con 5.9%, los productos no energéticos con 5.0% y el restante 6.5% provino de las kerosinas, el bagazo de caña y el coque.

2.2 TECNICAS DE CONSERVACION DE ENERGIA TERMICA

Las técnicas de conservación de energía térmica se han agrupado según sus características en los grupos siguientes:

- Racionalización de la combustión.
- Conservación de energía en la generación y uso de vapor.
- Reducción de pérdidas de energía térmica.
- Recuperación y utilización de energía térmica residual.

2.2.1 Racionalización de la combustión

2.2.1.1 Reducción del exceso de aire

Para obtener una combustión completa se requiere una mezcla aire-combustible óptima, y para lograrlo es necesario utilizar aire en exceso, cuya magnitud depende de las características del combustible y del tipo de quemador (mezclador); cualquier cantidad por encima de la relación adecuada, ocasionará pérdidas de calor en los gases de combustión.

Cuando la relación de aire es menor a 1, resultará una combustión incompleta, lo que significa que habrá pérdidas de energía debido a la presencia de combustible no quemado en los gases de combustión residuales, creándose además una condición insegura en la operación del equipo.

Cuando la relación de aire es mayor a 1, el resultado se traduce en un incremento en el calor que se pierde en los gases de combustión debido al aumento de éstos.

2.2.2 Conservación de energía en la generación y uso de vapor

2.2.2.1 Reducción de la presión del vapor generado

Algunas calderas que son operadas a una presión más alta que la requerida en los equipos de proceso, ofrecen un potencial para ahorrar energía mediante la reducción de la presión de operación.

Así, con presiones y por consiguiente temperaturas más bajas de operación en las calderas (vapor saturado) se pueden obtener los siguientes ahorros:

- Menor temperatura de los gases en la chimenea debido a mejor transferencia de calor.
- Menos pérdidas de calor por radiación y convección a través de la cubierta de la caldera.
- Menos pérdidas de calor desde las tuberías de vapor.
- Menores fugas de vapor por la menor presión.

Al implementar una reducción en la presión de operación de un sistema de suministro de vapor, se pueden presentar algunos inconvenientes como la afectación de la circulación del agua en la caldera, ya que las líneas de vapor pueden ser insuficientes para transportar el vapor a más baja presión o puede ser necesario tener que redimensionar las válvulas de seguridad.

Antes de implementar esta medida es necesario verificar al menos estos tres puntos.

2.2.2.2 Recuperación de energía por presiones altas en el vapor generado

En algunas plantas no es práctico generar el vapor a la presión requerida por los procesos; en estos casos, se encuentra generalmente instalada una válvula reductora de presión del vapor hasta el nivel requerido. Este gradiente de presión puede ser utilizado como un potencial para hacer trabajo a través de una turbina de contrapresión; es decir, con estas turbinas se puede obtener vapor generado mientras se acondiciona éste a los requerimientos de proceso.

2.2.2.3 Reducción de purgas

Con el agua caliente que es extraída con las purgas en un generador de vapor se pierde energía, es por ello que éstas deben ser reducidas hasta un mínimo.

Para que esta medida sea implementada exitosamente, es recomendable seguir las sugerencias que a continuación se indican:

Primero, debemos asegurarnos de que la purga intermitente sea solamente usada para lo que fue diseñada (remover lodos) y no para eliminar los sólidos ligeros a través de ellas.

Segundo, observar la cercanía de varios de los parámetros de calidad del agua a los mostrados en la siguiente tabla:

Agua de alimentación	Suavidad	menos de 1 ppm
Agua de alimentación	Oxígeno	menos de 20 ppm
Agua de caldera	Dureza	menos de 1 ppm
Agua de caldera	pH	9.5 - 11.2
Agua de caldera	Sílice	menos de 3500 ppm
Agua de caldera	Sulfatos	30 - 60 ppm
Agua de caldera	Alcalinidad	máx. de 800 ppm
Agua de caldera	Resivos	20 - 100 ppm
Condensado	pH	7.5 - 8.5
Condensado	Sílice	menos de 20 ppm

Tabla 2.2

Si la alcalinidad es cercana a su valor máximo mientras que STD es menor que su límite, entonces se debe cambiar el proceso de tratamiento del agua y la purga puede reducirse, para ello es recomendable consultar a un experto.

Tercero, verificar la calidad del agua en la caldera usando las pruebas químicas estándar; estas pruebas deberán incluir concentración de fosfatos y sulfatos, al igual que el nivel STD, alcalinidad, sólidos suspendidos y sílice.

2.2.2.4 Recuperación del calor de las purgas

Las calderas con purgas altas (arriba del 5%) son candidatos para la recuperación de esta energía residual: entre más alta sea la presión de operación y la producción de vapor se podrán obtener mayores ahorros.

2.2.2.5 Recuperación de condensados

Para el caso en donde el vapor es usado en forma indirecta, el condensado es agua pura y puede y debe ser recuperado como agua de alimentación para calderas; de lo contrario, si el vapor proviene del contacto directo con objetos o materiales calentados por el vapor, sólo se puede recuperar el calor contenido en él mediante un cambiador de calor.

2.2.3 Reducción de pérdidas de calor**2.2.3.1 Aislamiento térmico**

Durante la operación de los equipos de transferencia de calor que se encuentran operando a temperaturas diferentes a la del medio ambiente, se tienen pérdidas o infiltraciones de calor por radiación, conducción y convección.

Cuando un equipo de combustión está en operación, entre más alta sea la temperatura externa de la pared, las pérdidas de calor por radiación serán más altas. Para prevenir esto, las paredes de los equipos deberán aislarse de manera que tenga temperaturas externas bajas.

2.2.3.2 Hermeticidad de equipos de combustión

Es necesario asegurar la hermeticidad de las cámaras de combustión, cerrando las aperturas, sellándolas lo mejor posible o instalando doble puerta y tapar todos los agujeros de la cubierta, para evitar tanto la infiltración de aire o las fugas de gases calientes, según sea la presión interna de la cámara de combustión.

Las fugas de gases de combustión representan una pérdida de energía significativa debido a que son parte del medio de calentamiento generado por el combustible.

2.2.3.3 Limpieza de las superficies de transferencia de calor

El ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor, tanto interno como externo, oponen resistencia al flujo de calor, lo que implica que se pierda más calor con los gases en un equipo de combustión o que el fluido a calentar no alcance la temperatura deseada en un cambiador de calor.

En un equipo de combustión, la temperatura de los gases de combustión indica la existencia de ensuciamiento en alto grado. Si la temperatura de los gases de combustión se incrementa con el tiempo, a la misma carga y con el mismo exceso de aire, el efecto es probablemente debido a ensuciamiento que puede ser interno, externo o ambos.

La causa del ensuciamiento por el lado externo se debe principalmente a una combustión incompleta debido a deficiencia de aire, quemadores en mal estado, mala atomización, etc;

además si se utiliza combustible líquido, es necesaria la limpieza periódica por medio de sopladores de hollín.

El ensuciamiento interno en el caso de calderas se debe a la mala calidad del agua de alimentación.

De cualquier manera, en una planta de proceso, el efecto final del ensuciamiento en los cambiadores de calor, hornos o calderas, siempre se reflejará en un mayor consumo de combustible.

2.2.4 Recuperación de calor residual

La recuperación de calor residual, implica el uso del calor directamente, el cual no tiene ya un valor de utilidad, dado que fue agotado en su propósito primario el cual puede ser: calentamiento, tratamiento térmico o generación de vapor en la planta. También el término se refiere al rehuso del calor después de recuperarlo en equipos diseñados expresos.

Antes de la implementación de un sistema de recuperación de energía en equipos de combustión, es necesario asegurarse de que ya se han implementado las medidas de conservación de energía básicas (mencionadas anteriormente), las cuales no requieren de una gran inversión o que forman parte del programa de mantenimiento preventivo.

En múltiples estudios de diagnósticos energéticos y de impacto ambiental, se ha detectado que los equipos de combustión más comunes en la industria son las calderas, y para ellas se han desarrollado fundamentalmente dos sistemas de recuperación de energía, uno es el sistema de precalentamiento de aire, y el segundo está constituido por un economizador. Estos sistemas de recuperación de energía serán explicados detalladamente en el siguiente punto (2.3)

2.3 RECUPERADORES DE ENERGIA

Para determinar qué sistema es el más conveniente: precalentador ó economizador, es necesario realizar (para cada caso) un análisis cuidadoso desde el punto de vista energético, ecológico y económico.

2.3.1 Precalentador de aire

Un precalentador de aire es un intercambiador de calor que incrementa la eficiencia de un equipo de combustión, transfiriendo la energía térmica residual contenida aún en los gases de desecho hacia el aire de combustión. Como el aire de combustión entra al equipo más caliente, entonces se requiere menos combustible para llevarlo hasta la temperatura de la cámara de combustión.

En la siguiente figura (2.1) se muestra el esquema de un sistema de precalentamiento de aire aplicado a un generador de vapor u horno de proceso.

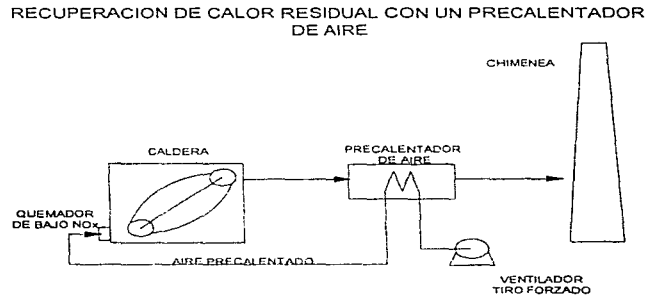


Figura 2.1

El ahorro de energía que se puede obtener por la implementación de un sistema de precalentamiento de aire depende de la proporción de la energía que sea posible recuperar, en relación a la cantidad de energía contenida en los gases de desecho a la salida del equipo de combustión.

Este ahorro puede estimarse por medio de la expresión siguiente.

$$A = \frac{Q_a}{PCI - Q_g + Q_a} \quad (2.1)$$

En la figura (2.2), se presenta de manera gráfica la relación de la tasa de ahorro de combustible con la temperatura de los gases de combustión a la entrada del precalentador de aire y la temperatura del aire precalentado.

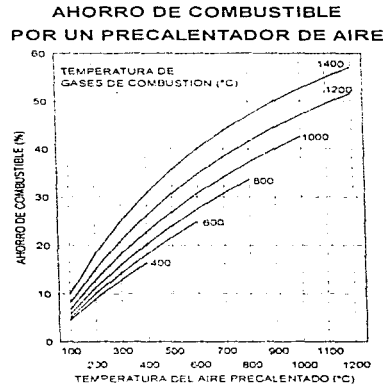
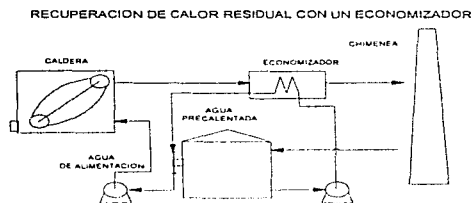


Figura 2.2

2.3.2 Economizador

Un economizador es un intercambiador de calor que incrementa la eficiencia térmica de un equipo de combustión, al adicionar una superficie extra de transferencia de calor en la sección convectiva del equipo.

Un economizador recupera el calor de los gases residuales para precalentar el agua de alimentación a una caldera, o el fluido de proceso a un horno, logrando así una disminución en el consumo de combustible para realizar el servicio de diseño. En la figura 2.3 se presenta un diagrama de un generador de vapor con economizador.



El ahorro de energía obtenido por la instalación de un economizador se puede estimar mediante la expresión (2.2), en la que podemos observar que este ahorro depende de la temperatura que puede alcanzar el agua precalentada en el economizador (ver fig. 2.4)

$$A = \frac{h_2 - h_1}{h_v - h_1} \quad (2.2)$$

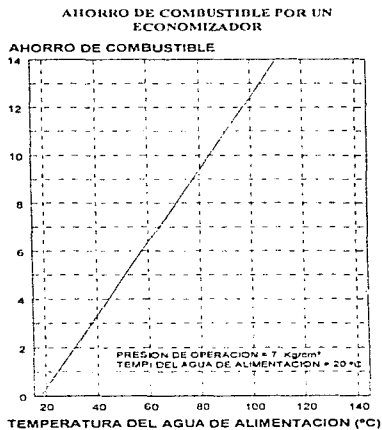


Figura 2.4

2.3.3 Efectos del ahorro de energía con un precalentador de aire

El precalentamiento de aire además de incrementar el aprovechamiento de la energía, también mejora la ignición, estabiliza la flama, reduce en algunos casos el exceso de aire, incrementa la velocidad de combustión, reduce la generación de CO y la emisión de hidrocarburos no quemados, y también incrementa la temperatura de la flama.

La implementación de un precalentador de aire favorece la generación adicional de NOx, al incrementar la temperatura del aire de combustión. En la figura 2.5, se muestra la relación que existe entre el aire precalentado y la concentración de NOx en el gas de desecho.

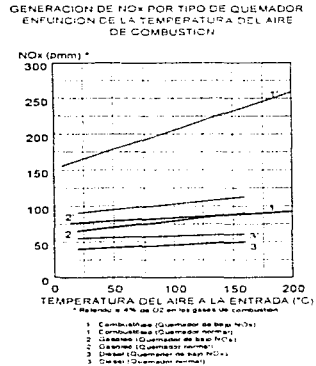


Figura 2.5

2.3.4 Efectos del ahorro de energía con un economizador

El incremento en la eficiencia de una caldera con un economizador es de 2 a 7 puntos porcentuales, lo cual es relativamente bajo con respecto al precalentador de aire. Esto se debe a las pérdidas de energía en el sistema economizador al regresar el agua precalentada al tanque de alimentación y del tanque enviarla a la caldera.

La implementación de un economizador no tiene efecto sobre la concentración de los compuestos contaminantes que se generan.

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS ENERGETICO DE CALDERAS

<i>3.1 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA TERMICA DE UN GENERADOR DE VAPOR</i>	<i>60</i>
3.1.1 Métodos para el cálculo de la eficiencia térmica	61
3.1.1.1 Cálculo de la eficiencia por el método directo o de entradas y salidas	62
3.1.1.2 Cálculo de la eficiencia por el método indirecto o de pérdidas separadas	63
<i>3.2 PERDIDAS POR LOS GASES DE LA CHIMENEA</i>	<i>64</i>
3.2.1 Exceso de aire con que trabaja una caldera	64
3.2.2 Determinación de las pérdidas por los gases de combustión	66
3.2.2.1 Pérdidas por los gases secos de combustión	67
3.2.2.2 Pérdidas por la humedad en el combustible	67
3.2.2.3 Calor perdido por el agua formada en la combustión	67
3.2.2.4 Calor que se pierde con el vapor de agua que entra con el aire de combustión	67
3.2.2.5 Calor que se pierde con el vapor de atomización (solo combustible líquido).	68
<i>3.3 PERDIDAS POR COMBUSTIBLE SIN QUEMAR O COMBUSTIBLE QUEMADO PARCIALMENTE (INQUEMADOS)</i>	<i>68</i>
3.3.1 Inquemados sólidos	68
3.3.2 Inquemados gaseosos.	69
3.3.2.1 Pérdidas por CO	69
3.3.2.2 Pérdidas por H ₂	70
3.3.2.3 Pérdidas por hidrocarburos no quemados	70
3.3.3 Métodos para la determinación de quemados sólidos	70
3.3.3.1 Índices de ennegrecimiento	70
3.3.3.2 Absorción de la luz	71

3.3.3.3 Medida ponderal por gravimetría	71
3.3.3.4 Análisis ponderal por absorción de rayos β	71
3.3.4 Control de inquemados	72

<i>3.4 PERDIDAS POR LAS PAREDES</i>	<i>73</i>
-------------------------------------	-----------

3.4.1 Leyes generales para conducción, radiación y convección	73
3.4.1.1 Conducción	73
3.4.1.2 -Radiación	74
3.4.1.3 Convección	74

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS
ENERGETICO DE CALDERAS

Para determinar el grado del uso de la energía es necesario determinar que cantidad de energía es utilizada en la caldera, como se distribuye esta energía en las corrientes de salida y la eficiencia de su utilización, para así emitir las recomendaciones y medidas de ahorro de energía que apliquen para reducir las pérdidas y por ende incrementar la eficiencia térmica. Es evidente que para lograr nuestro propósito, es necesario realizar las actividades requeridas en una forma ordenada, para lo cual se plantea la siguiente metodología: a) Recopilación de información en campo e inspección física del equipo, b) Análisis y procesamiento de la información, c) Proposición de medidas de ahorro de energía, e) Evaluación técnica y económica.

La metodología propuesta se describe a detalle en los siguientes puntos:

a) Recopilación de información en campo e inspección física

En la información base utilizada para realizar el balance térmico y el cálculo de la eficiencia térmica, recae en gran medida el que los resultados obtenidos sean satisfactorios, es por ello que se debe tener especial cuidado en la recopilación de la información de campo y en la inspección física del equipo, para esto es recomendable utilizar listas de verificación de la información a recopilar y de los puntos a inspeccionar físicamente de la caldera. A continuación se mencionan los parámetros que deben ser recopilados en campo, así como una lista de los puntos que deben ser examinados en la inspección física.

(1) Condiciones ambientales

Presión atmosférica	
Temperatura ambiente (operación)	
Humedad relativa	

(2) Características de la caldera (Información de diseño).

Tipo	
Fabricante	
Capacidad (MCR)	
Presión del vapor	
Temperatura del vapor	
Purgas	
Temperatura del agua de alimentación	
Combustible	
Exceso de aire	
Eficiencia	

(3) Características del combustible utilizado

Tipos	
Poder Calorífico Superior (PCS)	
Poder Calorífico Inferior (PCI)	
Densidad	
Temperatura	
Composición	

(4) Comportamiento esperado a las condiciones de diseño a diferente carga (Información de fabricante)*

Presión del vapor	
Temperatura del vapor	
Temperatura del agua de alimentación	
Purgas	
Temperatura del aire	
Combustible	
Flujo de vapor (Ton/h) / % carga	
% carga	
Exceso de aire	
Temperatura de gases de combustión	
Flujo de gases	
Flujo del aire	
Flujo de combustible	
Eficiencia	

* Si es que esta disponible

(5) Datos de operación

Presión del vapor	
Temperatura del vapor	
Temperatura del agua de alimentación	
Purgas	
Temperatura del aire	
Combustible	
Exceso de aire	
Temperatura de gases de combustión a la salida del precalentador	
Flujo de vapor (Ton/h)	
% Carga	
Flujo de combustible	
Flujo de gases (*)	
Flujo de aire (*)	

*Valores calculados en gabinete a partir de cálculos de combustión.

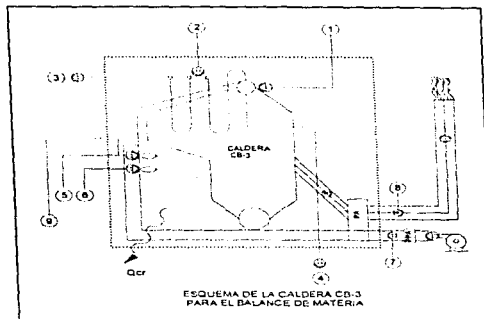
(6) Puntos a examinar en la inspección física

- ◆ Estado de la instrumentación.
- ◆ Estado físico de la cubierta de la caldera, aislamiento térmico y refractario.
- ◆ Fugas de gases.
- ◆ Fugas de vapor.

b) Análisis y procesamiento de la información

Es necesario realizar el balance de materia y energía, tanto para el caso de operación, como para el caso de diseño, a fin de que sea más fácil comparar el caso de operación contra el caso de diseño es recomendable presentar los respectivos balances en forma de tabla y gráficamente, utilizando diagramas de Sankey que son una forma muy ilustrativa de representar el balance térmico.

En la siguiente figura se ilustran esquemáticamente las corrientes mas importantes que fluyen hacia y desde una caldera.



(1) Para el balance de materia

El flujo de cada una de las corrientes se detalla a continuación:

SIMBOLO	No. DE CORRIENTE	DESCRIPCION	FLUJO
Lado del agua			
W_1	1	Agua de alimentación que entra	
W_2	2	Agua de atemperación que entra	
W_3	3	Vapor generado	
W_4	4	Purga que sale	
Lado de gases			
W_5	5	Combustible que entra	
W_6	6	Gas de refinaria que entra	
W_7	7	Aire para combustión que entra	
W_8	8	Gases de combustión que salen	
W_9	9	Vapor de atomización	

(2) Para el balance de energía

CALOR QUE ENTRA

CONCEPTO	SIMBOLO	CANTIDAD	%
Calor liberado por el combustible líquido	Q_{ql}		
Calor liberado por el combustible gas	Q_{qg}		
Calor sensible del combustible y del gas	Q_{sc}		
Calor sensible del aire	Q_{sa}		
Calor suministrado con el vapor de atomización	Q_{v-at}		
Calor que entra con el vapor contenido en el aire	$Q_{v120at2}$		
Calor total suministrado	Q_s		

CALOR QUE SALE

CONCEPTO	SIMBOLO	CANTIDAD	%
CALOR ABSORBIDO			
Calor absorbido por el vapor	Q_{av}		
Calor absorbido por la purga	Q_{ap}		
CALOR PERDIDO			
Calor perdido por gases secos	Q_{gsc}		
Calor perdido por la humedad en el combustible	Q_{pH2O_c}		
Calor perdido por la humedad formada por el hidrogeno en el combustible	Q_{pH2O_h}		
Calor perdido por la humedad en el aire	$Q_{pH2O_{aer}}$		
Calor perdido por el vapor de atomización	Q_{vst}		
Calor perdido por convección y radiación	Q_{pr}		
Calor perdido por CO	Q_{CO}		
Calor total que sale de la caldera	$Q_{total\ Sale}$		
DIFERENCIA			

(3) Eficiencia Térmica

En cuanto a los métodos para determinar la eficiencia térmica, cada uno presenta sus propias características y se deberán utilizar en función de la información disponible y del fin que se pretenda. En el punto 3.1, se desarrolla la metodología para la determinación de la eficiencia térmica de un generador de vapor.

c) Propuestas de medidas de Ahorro de Energía

La selección de medidas de ahorro de energía se efectúa en función de cuatro niveles:

- (1) **Acciones inmediatas:** para agrupar aquellas medidas que no requieren de inversión ni mano de obra nueva, simplemente se trata de llevar a cabo una política de mentalización contra la mala utilización de la energía.
- (2) **Acciones a corto plazo:** mejorando las políticas de mantenimiento, se tratará de aumentar el rendimiento energético de los equipos.
- (3). **Acciones a mediano plazo:** cuando es necesario hacer algunas inversiones pero de poca cuantía. Se trata de aprovechar energía residual.
- (4). **Acciones a largo plazo:** cuando son necesarias grandes inversiones, pues se pretende cambiar los procesos, incluso las materias primas si fuese necesario.

c) Evaluación técnica y económica

Para la selección de las medidas de los dos últimos niveles es necesario hacer un análisis de factibilidad.

3.1 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA TERMICA DE UN GENERADOR DE VAPOR

Una buena parte de la contribución a una adecuada eficiencia está en el diseño de la caldera y la compatibilidad de ésta con su quemado, pero el usuario aún mantiene una considerable influencia sobre la eficiencia que finalmente se obtenga, especialmente si tiene en cuenta dos aspectos fundamentales:

- Llevar a cabo la combustión eficientemente.
- Procurar que la demanda sea lo más estable posible y que la carga de la caldera esté dentro del intervalo de mayor eficiencia (60 al 100%), para que así tenga períodos de funcionamiento prolongados en vez de frecuentes encendidos y paros.

En forma general, definimos como eficiencia a la relación entre trabajo o energía útil y el trabajo o energía suministrado.

$$\text{Eficiencia termica } (\eta) = \frac{\text{Energía util}}{\text{Energía suministrada}} \times 100$$

Siendo la “energía útil”, la energía absorbida por el fluido de trabajo (agua y/o vapor).

La “energía suministrada” corresponde a la energía aportada al generador de vapor.

La eficiencia térmica puede ser calculada en base al PCS (poder calorífico superior) o en base al PCI (poder calorífico inferior).

El poder calorífico de los combustibles es la energía que éstos liberan durante su combustión, por unidad de masa o volumen.

El PCS, es la cantidad de calor que produce una unidad de masa o volumen de combustible durante su combustión. Considerando que la humedad presente en los gases de combustión se encuentra en fase líquida.

El PCI, es la diferencia entre el poder calorífico superior y la energía necesaria para evaporar toda la humedad presente en los gases de combustión.

Dado que el calor liberado por el combustible se calcula como el producto de la cantidad de este por su poder calorífico (superior o inferior); es necesario hacer referencia a cuál de estos valores se utilizó en el cálculo de la eficiencia.

En México es usual referir la eficiencia de las calderas al poder calorífico superior del combustible, considerando como pérdida energética al calor absorbido por el agua producida en la combustión en su cambio de fase de líquido a vapor.

Las eficiencias se relacionan por la siguiente expresión:

$$\eta_{pci} = \eta_{pes} * (PCS/PCI)$$

3.1.1 Métodos para el cálculo de la eficiencia térmica

A partir del balance de energía de una caldera, es posible calcular la eficiencia térmica de ésta de dos maneras: método directo y método indirecto.

Como se mencionó anteriormente, la eficiencia térmica se define como:

$$\eta = (E_u / E_s) * 100 \quad (3.1)$$

Del balance de energía tenemos que:

$$E_u = E_s - E_p \quad (3.2)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (1) tenemos que:

$$\eta = 1 - E_p/E_s \quad (3.3)$$

La ecuación (3.1) corresponde al método directo (entrada y salida de calor) y para determinar la eficiencia térmica por este método, es necesario medir parámetros como son: presión, temperatura y cantidad de vapor generado (agua alimentada), temperatura de agua de alimentación, cantidad de combustible consumido y poder calorífico del combustible.

La ecuación (3.3) corresponde al método indirecto (pérdidas de calor) y los parámetros que deben obtenerse para determinar la eficiencia térmica mediante este método son: temperatura, concentración de oxígeno y de monóxido de carbono de los gases de combustión a la salida de la caldera, poder calorífico y consumo de combustible, así como determinar el calor que se pierde a través de las paredes.

3.1.1.1 Cálculo de la eficiencia por el método directo o de entradas y salidas

Se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia } (\eta) = (E_u / E_s) * 100$$

Desarrollando la fórmula anterior:

$$E_u = Q_{aVSc} + Q_{aatempSC} + Q_{aRE} + Q_{aatempRE} + Q_{aP}$$

$$E_s = Q_{IC} + Q_{Sa} + Q_{Svat} + Q_{Sc} + Q_{SH2O \text{ aire}}$$

A su vez:

$$Q_{aVSc} = W_{VSc} * (h_{VSc} - h_{aa})$$

$$Q_{aatempSC} = W_{atemp} * (h_{VSc} - h_{atemp})$$

$$Q_{aRE} = W_{VRE} * (h_{VRES} - h_{VREE})$$

$$Q_{aatempRE} = W_{atempRE} * (h_{VRES} - h_{atemp})$$

$$Q_{aP} = W_p * (h_p - h_{aa})$$

$$Q_{IC} = W_C * PCS$$

$$Q_{Sa} = W_{aire \text{ seco}} * C_{p_{aire}} * (T_{aire} - T_{amb}) \quad \text{ó} \quad Q_{Sa} = W_{aire \text{ seco}} * (h_{aire} - h_{tr})$$

$$Q_{Svat} = W_{vat} * (h_{vat} - h_{vtr})$$

$$Q_{Sc} = W_c * C_{p_c} * (T_{cc} - T_{amb})$$

$$Q_{SH2O \text{ aire}} = W_{H2O \text{ aire}} * C_{p_{vapor}} * (T_{aire} - T_{amb})$$

Las variables a medir para definir el valor de los parámetros que intervienen en las fórmulas anteriores son:

- Combustible: Flujo, presión y temperatura en caso de combustible.
- Calderas de vapor: Presión del vapor generado, flujo y temperatura de agua de alimentación.
- Como información complementaria, se necesita conocer el poder calorífico del combustible.
- El PCS será determinado por el laboratorio o, en su defecto, se utilizarán los datos suministrados por el proveedor.

Los instrumentos y equipos para la medición de los parámetros indicados anteriormente son:

- Indicador de presión del vapor generado (manómetro de la caldera).
- Medidor de flujo para el combustible.
- Medidor de flujo del agua de alimentación.
- Termómetro para medir la temperatura del agua de alimentación.
- Indicador de presión del gas combustible (sólo si el combustible es gas).
- Indicador de temperatura del gas combustible.

El valor de la eficiencia hallado por ese método puede ser tan preciso como lo sean los instrumentos instalados para medir los diferentes parámetros, pero su valor no da más que una indicación general para mejorar la información y desglosar las diferentes partidas en que se distribuyen las pérdidas.

En la práctica, no siempre resulta fácil determinar la energía útil obtenida.

3.1.1.2 Cálculo de la eficiencia por el método indirecto o de pérdidas separadas

Para calcular la eficiencia por el método de pérdidas separadas, procederemos a conceder el valor de 100 a la energía aportada por el combustible y deducir de él las pérdidas que se producen en el sistema, obteniendo así, la porción de la energía suministrada realmente aprovechable.

La fórmula que describe lo anterior es la siguiente:

$$\text{Eficiencia } (\eta) = 100 - \left(\frac{Q_p}{Q_s} * 100 \right)$$

A su vez:

$$Q_p = Q_{p_{gs}} + Q_{H_2O_c} + Q_{H_2O_H} + Q_{H_2O_{aire}} + Q_{p_{vat}} + Q_{p_{CO}} + Q_{p_{H_2O}} + Q_{p_{H_2O_{cH}}} + Q_{p_{er}}$$

Donde:

$$Q_{p_{gs}} = W_{gs} * (T_g - T_{amb}) * C_{p_{promedio \text{ gases secos}}}$$

$$Q_{H_2O_c} = W_{H_2O_c} * (h_{T_g} - h_{H_2O_c})$$

$$Q_{H_2O_H} = W_{H_2O_H} * (h_{T_g} - h_{H_2O_H})$$

$$Q_{H_2O_{aire}} = W_{H_2O_{aire}} * (h_{T_g} - h_{H_2O_{aire}})$$

$$Q_{p_{vat}} = W_{vat} * (h_{Tg} - h_{vir})$$

$$Q_{p_{CO}} = \text{fracción CO} * W_{gs} * PCS_{CO}$$

$$Q_{p_{H_2q}} = \text{fracción H}_2 * W_{gs} * PCS_{H_2}$$

$$Q_{p_{HCnq}} = \text{fracción HC} * W_{gs} * PCS_{HC}$$

$$Q_{p_{cr}} = \sum 1.163 * C * A_1 * \alpha_{TAi} * (t_i - t_a) \quad \text{con } \alpha_{TAi} = \alpha_{Chi} + \alpha_{Rai}$$

Las anteriores, son las pérdidas de energía más importantes que pueden existir en una caldera. A continuación describiremos cada una de ellas.

3.2 PERDIDAS POR LOS GASES DE LA CHIMENEA

Las pérdidas por los gases de la chimenea hasta cierto punto son inevitables.

La combustión producirá un cierto volumen de CO₂, O₂, SO₂, N₂ y vapor de agua ; por otra parte, interesa operar con el mínimo exceso de aire posible para que esos volúmenes que escaparán por la chimenea con una parte del calor producido en la combustión, sean los mínimos imprescindibles.

Para cuantificar estas pérdidas, será preciso realizar un análisis de gases. Los valores obtenidos, de los porcentajes de O₂ o CO₂ nos permitirán ya sea por gráficos o bien analíticamente, conocer el exceso de aire con el que trabaja la caldera.

Conocido el exceso de aire, la temperatura de los gases en la chimenea y el tipo de combustible empleado, podrá cuantificarse el calor que se extrae con los gases de la chimenea.

3.2.1 Exceso de aire con que trabaja una caldera

La relación entre el aire realmente utilizado y el aire mínimo necesario se denomina **índice o coeficiente de exceso de aire** y suele designarse por "n".

$$n = \frac{\text{Aire real}}{\text{Aire teórico}}$$

Otras veces se expresa en %.

En la reacción de combustión, el oxígeno del aire se mezcla con el combustible, si la reacción de combustión fuese la ideal, sólo se necesitaría la cantidad de **aire teórico** para oxidar dicho combustible, con lo cual todo el oxígeno se combinaría con el carbono del combustible dando CO_2 y, en los gases que salen por la chimenea no habría oxígeno.

Si la mezcla se hiciese con un determinado exceso de aire sobre el teórico, parte del oxígeno no reaccionará con el combustible y saldrá por la chimenea, lógicamente también sale CO_2 pero ahora, como hemos introducido más aire, el volumen de gases que sale por la chimenea es mayor y la proporción del volumen de CO_2 formado, frente al total de gases, será menor que cuando sólo se usaba el aire teórico.

Si la mezcla se produce con déficit de aire, una parte del combustible no se quemará o se quemará parcialmente. La reacción del oxígeno y el carbono del combustible no se realizará totalmente; además de CO_2 aparecerá CO entre los gases de la combustión y, si el combustible es combustóleo o gasóleo, estos gases tendrán forma de humos oscuros consecuencia de las partículas sólidas o líquidas no quemadas.

Para cada uno de los combustibles más comunes, existen gráficos y tablas que muestran el % de CO_2 sobre el volumen total de gases de combustión según el índice de exceso de aire "n" con el que se realice la combustión.

Por lo tanto, si se toma una muestra de los gases de combustión de una caldera y se analiza su contenido en CO_2 , una vez determinado éste usando uno de los gráficos o tablas antes mencionados, puede determinarse el índice de exceso de aire con el que se realiza la combustión.

Conocido el % de CO_2 en el volumen total de los gases de combustión y la temperatura de estos gases, resulta inmediato conocer el porcentaje de pérdidas de calor que representan los gases de escape por chimenea, y haciendo la diferencia a 100 se conocerá la eficiencia con la que se desarrolla la combustión.

En general, el exceso de aire con que se está trabajando se determina con ayuda de:

- La composición del combustible.
- Un análisis de la composición de los gases, fiable y representativo.

Con estos datos se pueden aplicar las fórmulas siguientes:

$$\%CO_2 = \frac{\text{volumen de } CO_2 \text{ en gases}}{\text{volumen total de gases}} \times 100 = \frac{\frac{C}{12} \times 22.415 \times 100}{\text{volumen total de gases}}$$

$$\%O_2 = \frac{\text{volumen de } O_2 \text{ en gases}}{\text{volumen total de gases}} \times 100 = \frac{(n-1) \times 22.415 \times 100 \times \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{H}{4}\right)}{\text{volumen total de gases}}$$

Si se dividen las dos expresiones entre sí y se despeja **n** resulta:

$$n = 1 + \frac{\frac{C}{12} \times \%O_2}{\left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{H}{4}\right) \times \%CO_2}$$

Los valores de % de CO_2 y de exceso de aire para los combustibles más usuales son los siguientes:

Cuadro. 3.1.

Combustible	% CO_2	Exceso de aire
Combustóleo	≥ 13.5	= 1.15
Gasóleo	= 14.11	= 1.10
Gas natural	≥ 10.34	= 1.05
Gas manufacturado	= 11.06	= 1.05

3.2.2 Determinación de las pérdidas por los gases de combustión

Para el cálculo de las pérdidas se necesita disponer de los siguientes datos:

- Composición elemental del combustible: C%, H%, S%, etc., incluyendo H_2O y cenizas.
- Flujo del combustible.
- Composición de los gases de combustión $\%O_2$, $\%CO_2$, $\%SO_2$ y % de inquemados.
- Flujo de gases.
- Temperatura de gases.

3.2.2.1 Pérdidas por los gases secos de combustión

De manera más explícita, para la evaluación de las pérdidas por los gases secos de combustión, se requiere:

- El análisis de los gases de combustión, con el que se puede determinar el exceso de aire.
- El flujo másico de los gases de escape.
- La temperatura de los gases de salida.
- El exceso del aire de combustión, en caso de tener el análisis respectivo de los gases.

Con los datos anteriores y el calor específico de los gases se pueden evaluar las pérdidas por gases secos en [W] como:

$$Q_{P_{GS}} = W_{gs} * (T_g - T_{amb.}) * C_{P_{promedio\ gases\ secos}}$$

3.2.2.2 Pérdidas por la humedad en el combustible

Se requiere de los datos:

- Flujo del agua en el combustible [=] $W_{H_2O_c}$ [kg/s]
- Entalpía del vapor a la temperatura de salida de los gases y a la presión atmosférica [=] h_{T_g} [J/kg]
- Entalpía de líquido saturado a la temperatura de referencia (ambiente) [=] h_{lir} [J/kg]

Se calcula con la ecuación:

$$Q_{H_2O_c} = W_{H_2O_c} * (h_{T_g} - h_{lir}) \quad [W]$$

3.2.2.3 Calor perdido por el agua formada en la combustión

Se calcula con la ecuación:

$$Q_{P_{H_2O_H}} = W_{H_2O_H} * (h_{T_g} - h_{lir}) \quad [W]$$

3.2.2.4 Calor que se pierde con el vapor de agua que entra con el aire de combustión

Para calcular este concepto se requieren los siguientes datos:

- Temperatura de los gases a la salida de la chimenea (T_g), °C.
- Entalpía del vapor del agua a la temperatura a la salida de los gases y a la presión atmosférica (h_{T_g}).

- Entalpía del vapor de agua saturado a la temperatura ambiente y presión atmosférica (h_{vtr}).
- Flujo de agua en el aire, [kg/s]

El calculo se hace con la siguiente ecuación:

$$Q_{P_{H_2O \text{ aire}}} = W_{H_2O \text{ aire}} * (h_{Tg} - h_{vtr}) \quad [W]$$

3.2.2.5 Calor que se pierde con el vapor de atomización (solo combustible líquido).

$$Q_{P_{vat}} = W_{vat} * (h_{Tg} - h_{vtr}) \quad [W]$$

3.3 PERDIDAS POR COMBUSTIBLE SIN QUEMAR O COMBUSTIBLE QUEMADO PARCIALMENTE (INQUEMADOS)

Los inquemados pueden ser de dos tipos:

3.3.1 Inquemados sólidos

Sólo se producen con combustibles líquidos o sólidos.

Visualmente se aprecian por la aparición de humo negro en la chimenea.

En los combustibles líquidos, la aparición de inquemados sólidos puede deberse a dos factores principalmente:

- Un mal funcionamiento del quemador, bien sea porque no se consigue una distribución uniforme del aire y el combustible, no atomiza lo suficiente o no se alcanza la temperatura para que el combustible líquido vaporice y queme bien. En estos casos, las gotas de combustible son demasiado grandes, no se queman bien, dando lugar a partículas de carbono e hidrocarburos fraccionados.
- Aire de combustión insuficiente.

La aparición de inquemados sólidos produce dos efectos igualmente perjudiciales:

- 1º. Representa una pérdida de potencia calorífica del combustible.

2º. El hollín formado, se irá depositando en la superficie de intercambio de la caldera dificultando la transmisión de calor de los gases al agua, lo que significará un aumento de temperatura de los humos en chimenea, o sea, un aumento en las pérdidas.

Uno de los síntomas de que los tubos de humo están sucios es el incremento de temperatura que con el tiempo van teniendo los gases de chimenea en una caldera.

3.3.2 Inquemados gaseosos.

Los quemados gaseosos pueden ser CO, H₂ e hidrocarburos ligeros. Normalmente tienen su lugar por insuficiencia de aire de combustión, representan una pérdida de potencia calorífica del combustible.

Habitualmente la aparición de CO, va acompañada de una concentración equivalente de hidrógeno no quemado.

Conforme a la normatividad vigente para emisiones, las concentraciones de CO no deben exceder de 200 ppm (0.02%).

Cuando el combustible empleado es un gas, su combustión incompleta produce valores importantes de CO. Por eso es el mejor indicador de combustión incompleta cuando se trabaja con este combustible.

Una vez obtenida la concentración de CO, puede conocerse su efecto sobre la eficiencia de la combustión, bien mediante gráficos o bien mediante cálculo analítico. Pueden emplearse las siguientes expresiones para calcular las pérdidas por quemados:

3.3.2.1 Pérdidas por CO

Datos necesarios:

- Fracción del carbono, [m³_{CO}/m³_{gs}]
- Flujo de los gases de combustión en base seca, [m³_{gs}/s]
- Poder calorífico del CO, [J/m³_{CO}]

Con estos datos y con la siguiente relación se calculan las pérdidas en base seca.

$$Q_{pCO} = \frac{PPM_{CO}}{1 \times 10^6} \cdot W_{gs} \cdot PC_{CO}$$

Donde Q_{pCO} = Calor perdido por CO en los gases secos, [W]

3.3.2.2 Pérdidas por H₂

Con la siguiente ecuación se calculan las pérdidas por H₂ en los gases secos, [W]

$$Q_{P_{H_2}} = \frac{PPM_{H_2}}{1 \times 10^6} \cdot W_{gs} \cdot PCS_{H_2}$$

3.3.2.3 Pérdidas por hidrocarburos no quemados

$$Q_{P_{HC_{no}}} = \frac{PPM_{HC}}{1 \times 10^6} \cdot W_{gs} \cdot PCS_{HC}$$

3.3.3 Métodos para la determinación de inquemados sólidos

3.3.3.1 Índices de ennegrecimiento

Hay que distinguir dos índices:

- Ringelmann
- Bacharach

Estos dos índices son meramente orientativos sobre la producción de inquemados sólidos en una combustión.

- El índice de Ringelmann sirve para la determinación de la opacidad del penacho de una chimenea.

Consiste en la comparación visual del color del penacho con una serie de cartulinas con color variado desde el blanco al negro absoluto.

Las cartulinas son 6, con porcentajes del 0, 20, 40, 60, 80 y 100% de la superficie ennegrecida.

- El índice de Bacharach se basa en el ennegrecimiento de un papel de filtro al paso, a su través, de una corriente de gases de combustión, extraída mediante una bomba manual. El color del filtro se compara con una escala de intensidades de color que varía desde el 0 (blanco) hasta el 9 (negro).

El uso de estos índices es comunmente aplicado a criterios de contaminación atmosférica.

3.3.3.2 Absorción de la luz

Este método, llamado también opacimétrico, es cualitativo y se basa en la absorción de la luz emitida por una fuente luminosa al pasar a través de una corriente gaseosa con partículas sólidas en suspensión. Existe un haz de luz de referencia para el cual el índice de absorción es 0.

Para absorción total el índice es de 100%.

Los aparatos basados en este método son monitores para medición continua, pudiendo acoplárseles registradores.

3.3.3.3 Medida ponderal por gravimetría

Se basa en la determinación por diferencia de pesadas en una balanza, de la cantidad de partículas recogidas en un filtro al aspirar mediante una bomba de vacío un volumen de gases determinado. Por su naturaleza es discontinuo.

La toma de gases debe ser isocinética, es decir, aspirarse a la misma velocidad que llevan los gases en el conducto de humos.

Su precisión es del orden del 20%.

3.3.3.4 Análisis ponderal por absorción de rayos β

En este método de medida, los gases de combustión se aspiran y pasan por un filtro de banda continua de gran poder de retención y que se mueve paso a paso. El aumento de peso por unidad de superficie se mide por absorción de rayos β .

Se mide la actividad de las fuentes de emisión, antes y después de la formación del depósito, por desplazamiento alterno de la banda.

La "pesada" del filtro virgen se efectúa durante un tiempo T_0 , y el conteo correspondiente " N_0 ", se memoriza. La "pesada" del filtro cargado de polvo consiste en medir el tiempo $T - T_0$ necesario para descontar " N_0 ". La diferencia $T - T_0$ es directamente proporcional a la cantidad depositada y sabiendo el volumen de gases que ha pasado se obtiene la concentración en mg/Nm^3 .

Este método de medida es continuo y tiene una precisión de un 5%.

3.3.4 Control de inquemados

La cantidad de inquemados que se formen al quemar un combustible líquido depende de :

- La cantidad de exceso de aire
- El grado de atomización del combustible
- La calidad de la mezcla aire-combustible
- La cantidad de cenizas en el combustible

3.4 PERDIDAS POR LAS PAREDES

Las pérdidas de calor através de las paredes se pueden estudiar y evaluar dividiéndose en los tres procesos en los que se lleva a cabo:

- Pérdidas por conducción.
- Pérdidas por convección.
- Pérdidas por radiación.

3.4.1 Leyes generales para conducción, radiación y convección

Para que exista una transmisión de calor neta entre dos puntos sin intervención de trabajo exterior, se requiere que exista una diferencia de temperatura entre ellos, dirigiéndose el calor desde el punto más caliente al más frío. La transmisión se produce según tres mecanismos diferentes, que normalmente aparecen simultáneamente: La conducción, la convección y la radiación. En el primer capítulo se definieron estos conceptos, ahora se describe el mecanismo.

3.4.1.1 Conducción

El calor que se transmite por conducción por unidad de superficie y por unidad de tiempo a través de una pared plana viene dado por la expresión:

$$q = K \cdot \frac{T_1 - T_2}{e} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

Si se requiere la pérdida de calor en J/kg de combustible la ecuación anterior se debe multiplicar por el área de transferencia de calor (A) en metros cuadrados y dividir por el flujo de combustible W_c en kilogramos por segundo; por lo tanto la ecuación queda como:

$$P_{\text{cond}} = A * K * (t_1 - t_2) / W_c \quad (\text{J/kg combustible})$$

3.4.1.2 -Radiación

En principio, la cantidad de calor transmitida por radiación depende de la forma geométrica de la superficie, del material y de sus características radiantes tales como calor específico, grado de rugosidad, etc.

El calor irradiado por un cuerpo por unidad de superficie y por unidad de tiempo viene dado por la expresión:

$$q = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4 \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

En J/kg de combustible, la ecuación queda como :

$$P_{\text{rad}} = A \cdot \sigma \cdot T^4 / W_c$$

3.4.1.3 Convección

Para calcular el calor transmitido por Convección se aplica la fórmula:

$$q = h_m \cdot (T_s - T_m) = \frac{T_s - T_m}{R} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

En unidades de J/ kg de combustible:

$$P_{\text{conv}} = A \cdot h_m \cdot (T_s - T_m) / W_c \quad (\text{J/kg combustible})$$

El valor de h_m depende de muchos factores y, en general, no es fácil de determinar teóricamente, por lo que se obtiene a partir de experimentos y correlaciones.

Varía con:

Las propiedades físicas del fluido (conductividad térmica, densidad, calor específico).

- Dimensiones del equipo.
- Velocidad del fluido.
- Existencia de cambio de fase.
- Incremento de temperaturas.

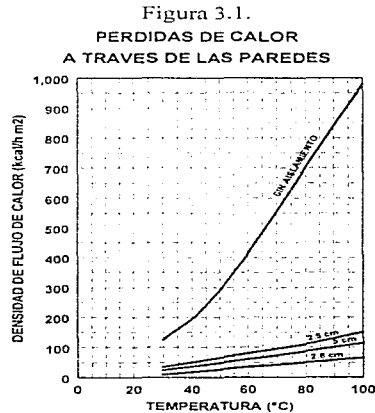
El cálculo de las pérdidas totales por la pared se pueden estimar mediante la sumatoria de las pérdidas para cada área considerada.

Existen otros métodos que pueden simplificar el cálculo de las pérdidas de calor por las paredes. En seguida se mencionan algunos de ellos.

a) Método para determinar las pérdidas cuando se conoce la distribución de temperaturas de la pared exterior.

Pueden cuantificarse las pérdidas por cálculo o con la ayuda de gráficos. En cualquier caso, convendrá disponer de un termómetro (con sonda adecuada) para la medición de la temperatura superficial media del envolvente de la caldera.

Si se conoce el espesor de aislamiento puede aplicarse la gráfica siguiente:



b) El procedimiento analítico consiste en la utilización de la expresión:

$$Q = \sum_{i=1}^n 1.163 * C * A_i * \alpha_{T_{A_i}} * (t_i - t_a) \quad [W]$$

$$\text{CON: } \alpha_{T_{A_i}} = \alpha_{CA_i} + \alpha_{RA_i}$$

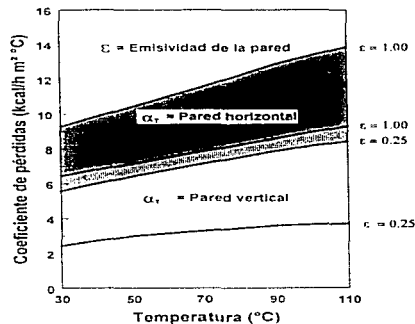
El valor de estos coeficientes ($\alpha_{T_{A_i}}$) puede obtenerse aplicando las fórmulas que se exponen más adelante en el cuadro 3.2, o más sencillamente pueden tomarse directamente del gráfico correspondiente a la figura 3.2.

Cuadro 3.2. Valores de los coeficientes de transmisión de calor.

Coefficiente de transmisión	Fórmula
Convección natural. α_{CA_i}	
Pared horizontal (techo)	$2.8 (t_i - t_a)^{0.25}$
Pared horizontal (piso).	$1.5 (t_i - t_a)^{0.25}$
Pared vertical (laterales)	$2.2 (t_i - t_a)^{0.25}$
Pared cilíndrica	$1.13 [(t_i - t_a)/d_c]^{0.25}$
Convección Forzada α_{CA_i}	
En cualquier caso	$4.88 + 3.6 V$
Radiación α_{RA_i}	$4.96 \times 10^{-8} * \epsilon * [(t_i + 273)^4 - (t_a + 273)^4] / (t_i - t_a)$

Fuentes: Jugens and Sack, *El aislamiento térmico en la industria (Vitrofilis)*; Mac Adams y ASTM parte 17

Figura 3.2
COEFICIENTE DE PERDIDAS DE CALOR
PAREDES PLANAS



Fuente: Elaboración propia a partir de ASTM parte 17 y Mac Adams

Cuadro 3.3. Emisividad de diferentes superficies

SUPERFICIE	EMISIVIDAD
Acerino oxidable	0.28
Aluminio pulido	0.09
Aluminio oxidado	0.22
Chapa acero	0.55
Chapa acero oxidado	0.65
Fibra mineral	0.70
Asbesto cemento	0.90
Aceros galvanizado	0.30
Pintura negra	0.87
Pintura al aceite	0.94
Pintura de aluminio	0.52
Yeso	0.95

c) Método basado en la realización del balance de calor.

En este método, las pérdidas por las paredes no se calculan directamente sino que se obtienen como diferencia entre el calor entrante y el saliente al realizar el balance de calor. El valor obtenido con este procedimiento tiene la misma precisión que el correspondiente al de los datos utilizados para realizar el balance, y en él se incorporan todas las diferencias de cierre de balance.

d) Método empírico (gráfico).

Para generadores grandes existen correlaciones que dan directamente el porcentaje de pérdidas en función de la capacidad del generador y de la carga a la que se trabaja. Además, existen gráficas que dan el porcentaje de pérdidas por radiación y convección en función de la carga neta de la caldera (en millones de BTU's/hora) netos que sale de la caldera. (ASME).

e) Finalmente existe un método denominado **termografía** que nos permite conocer las pérdidas de calor a través de las paredes a partir de la medición de lastemperaturas de las mismas. Este método en particular es el que nos ocupa en el desarrollo del presente trabajo, en los capítulos siguientes se presenta de manera detallada el uso de esta metodología.

Para ello, se efectúa una observación termográfica de las paredes del generador con un aparato similar a una cámara de video que recibe la emisión de rayos infrarrojos que parten de las paredes del generador y cuyo contenido energético depende de la temperatura.

CAPITULO IV

EMPLEO DE TERMOGRAFIA PARA MEDICION DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE

En este capítulo se profundizará en conceptos y descripción de la termografía, así como del termógrafo utilizado en la parte práctica de esta tesis (Modelo 760 de Inframetrics), ya que la termografía es la tecnología que está siendo utilizada en este trabajo para conocer las pérdidas de calor a través de las paredes de la caldera en estudio. Para conocer estas pérdidas, con el termógrafo 760 se obtuvieron termografías que nos indican la temperatura superficial, analizadas a su vez, con el programa TermaGram 95.

Para la realización de este estudio fueron necesarias algunas visitas a la Refinería "General Lázaro Cárdenas", ubicada en Minatitlán, Veracruz, ya que en ésta se encuentra la caldera seleccionada.

Específicamente, las termografías fueron tomadas a la caldera **CB-3** de la termo-3 de la refinería antes mencionada.

Para tomar las termografías, fue necesaria una visita preliminar a la termo-3, con el propósito de determinar la facilidad de acceso a las diferentes áreas de donde se tomarían dichas termografías.

En la segunda visita se realizó la inspección termográfica de las partes que pudieran presentar fugas (exteriores) y se grabaron diversas termografías de las partes más dañadas de la caldera (mirillas en mal estado, aislante dañado en pequeñas partes de las paredes, quemadores, gases a la salida de la chimenea, estructuras de soporte, etc.).

Estas termografías serán presentadas en el siguiente capítulo, junto con la información de diseño y operación de la caldera CB-3, para realizar un análisis de las pérdidas de calor que se están teniendo en las paredes de dicha caldera, aplicando algunas de las ecuaciones y procedimientos mencionados en el capítulo III de la presente tesis.

4.1 APLICACION DE LA TERMOGRAFIA EN LOS PROGRAMAS DE CONSERVACION DE ENERGIA

La termografía infrarroja junto con información de las plantas se pueden utilizar para evaluar la magnitud de las pérdidas de energía en áreas en las que se sospecha que

CAPITULO IV

EMPLEO DE TERMOGRAFIA PARA MEDICION DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE

<i>4.1 APLICACION DE LA TERMOGRAFIA EN LOS PROGRAMAS DE CONSERVACION DE ENERGIA</i>	<i>78</i>
---	-----------

<i>4.2 TEORIA BASICA DE INFRARROJO PARA RADIOMETROS DE ADQUISICION DE IMAGENES TERMICAS</i>	<i>82</i>
---	-----------

4.2.1 Radiómetros de adquisición de imágenes térmicas	82
4.2.2 El desempeño del sistema	85
4.2.3 Sensitividad térmica	86
4.2.4 Velocidad de rastreo	87

<i>4.3 REVISION DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS 700 DE INFRAMETRICS</i>	<i>88</i>
---	-----------

4.3.1 Características Estándar en todos los Modelos	88
4.3.1.1 Generales	88
4.3.1.2 Modos de Operación	89
4.3.1.3 Características Especiales	89
4.3.1.4 Características Adicionales para los Modelos 760	89
4.3.1.5 Opcionales	89
4.3.2 Características /Función /Ventajas	91
4.3.3 Revisión del Diseño del Sistema	96
4.3.3.1 Concepto del Rastreo	96
4.3.3.2 Conceptos Generales del Sistema	96
4.3.3.3 Grabación de Imágenes Congeladas y Análisis Posterior	98
4.3.3.4 Grabación de Datos e Imágenes en Tiempo Real y Reproducción para Análisis	98
4.3.3.5 Efectos Atmosféricos	99

4.3.3.6 Calibración	99
4.3.4 Los modelos de la serie 700. - Un completo sistema de medición infrarroja	99
4.3.5 Opciones de accesorios para el procesamiento de imágenes	101
4.3.5.1 Procesamiento de imagen de los modelos 700	101
4.3.5.1.1 D*STAR	101
4.3.5.1.2 ThermaGram para Windows	102
4.3.5.1.3 TherMonitor	102

existe el problema, así como en aquellas en las que no se tiene la idea de que existan pérdidas de consideración.

En muchos casos una inspección infrarroja enfocada hacia la conservación de energía podría incluso descubrir problemas relacionados con la falta de mantenimiento que no han sido detectados por largos periodos de tiempo.

Sorpresivamente, en algunas plantas no se llevan reportes de inspección en los diferentes equipos y accesorios, por lo que los problemas que retransmiten son dejados a la memoria del personal que realiza la inspección.

Una inspección infrarroja bien estructurada no solo provee detalles adecuados de pérdidas de energía, sino que también llega a ser un medio importante para llevar registros permanentes del estado de los equipos críticos junto con imágenes visuales de los mismos, mediante el empleo de los programas disponibles actualmente para la generación de reportes y análisis detallado de información.

Con la disponibilidad actual de computadoras y los programas adecuados para reunir las aplicaciones, termografía y otros datos relevantes, la información final puede ser expresada en pérdidas absolutas de energía en unidades térmicas.

Estas técnicas de inspección permiten el análisis de pérdidas de energía "en sitio", permitiendo estructurar un programa adecuado de mantenimiento, además de ponderar la importancia de su significado a la administración de energía al conocer la cantidad de energía perdida.

Una explicación detallada de todos los usos costeables para inspecciones infrarrojas en refinertas y plantas petroquímicas sería demasiado extensa; sin embargo, a continuación se mencionan algunos equipos de proceso y accesorios, en los cuales la inspección mediante termografía infrarroja ha probado ser costeable para la detección de patrones de pérdidas térmicas y detección temprana de fallas.

01. Desintegradores catalíticos.
02. Reactores.
03. Líneas de gas de combustión.
04. Válvulas deslizables.
05. Válvulas de alivio.
06. Calderas de operación continua.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

07. Paredes de hornos.
08. Inspección en líneas de tubos de hornos y calentadores.
09. Intercambiadores de calor.
10. Líneas de vapor aisladas térmicamente.
11. Residuos de carbón en recipientes.
12. Pérdidas de calor en calentadores con vapor.
13. Rodamiento de motores.
14. Rodamiento de bombas.
15. Líneas de quemadores.
16. Escobillas y muelles en motores de alta potencia.
17. Trampas de vapor.
18. Hornos rotatorios
19. Incineradores.
20. Sedimentación en tanques.
21. Nivel de líquido en tanques.
22. Distribución desigual de cabezales de distribución.
23. Flujo taponado o restringido en líneas de producto.
24. Enfriadores.
25. Compresores de aire.
26. Turbinas de vapor
27. Distribución térmica en torres de enfriamiento.
28. Aislamiento de edificios
29. Chimeneas de calentadores y calderas.
30. Areas frías en líneas de productos calentados con vapor.
31. Localización de fuegos incipientes en granos de carbón, etc.
32. Determinación de los porcentajes de deterioro del refractario interno de los recipientes.
33. Desperdicio de calor en calentadores.

Como resultado se puede decir que una refinería con capacidad de procesamiento de 100,000 BBL por día se puede inspeccionar en menos de 10 días laborales cubriendo las áreas mencionadas a continuación⁽¹⁾.

1. Inspección de todas las líneas de vapor aisladas en busca de aislamiento inadecuado y fugas de vapor.
2. Inspección y registro de trampas de vapor.
3. Inspección de válvulas de alivio para constatar su buen funcionamiento.
4. Inspección de los desintegradores catalíticos, reactores y hornos para detectar el deterioro del refractario y presentar un perfil térmico externo de cada recipiente.
5. Inspección de las chimeneas de calentadores y calderas para identificar sobrecalentamiento.
6. Inspección de tubos en hornos para detectar carbonización.
7. Inspección completa de la distribución eléctrica y sistemas de transmisión emitiendo un reporte final acerca de los puntos problemáticos que podrían causar una interrupción en el suministro de energía.

¹ Si se toma en cuenta que sistemas con velocidad de captura de 60Hz pueden realizar la inspección en camionetas acondicionadas especialmente para dicho fin, y que en algunos sistemas, se puede hacer uso de la técnica de umbral, que da una indicación visual rápida de zonas con temperaturas mayores a un intervalo seleccionado, el tiempo de inspección se puede reducir substancialmente.

4.2 TEORIA BASICA DE INFRARROJO PARA RADIOMETROS DE ADQUISICION DE IMAGENES TERMICAS

Termografía es el proceso de generar un termograma utilizando un Sistema de Adquisición de Imágenes IR (SAIRR). Un termograma es un mapa o registro bidimensional de una imagen, la cual despliega la temperatura de la escena de acuerdo a como es captado por el Sistema de Adquisición de Imágenes IR. Un radiómetro de imágenes térmicas es un equipo que produce termogramas y mide cuantitativamente la radiación térmica dentro de una longitud de onda determinada.

Estos termogramas pueden ser desplegados en B y N o color. Los termogramas a color delinear en forma muy clara las variaciones de temperatura, pero con el inconveniente de que se pierde un poco de detalle espacial. Los termogramas en B y N delinear con mucho detalle las variaciones espaciales, pero no se observan con mucho detalle las variaciones de temperatura. Los Radiómetros de Adquisición de Imágenes IR modernos despliegan tanto imágenes a Color como en ByN así como lecturas de temperaturas absolutas.

4.2.1 Radiómetros de adquisición de imágenes térmicas

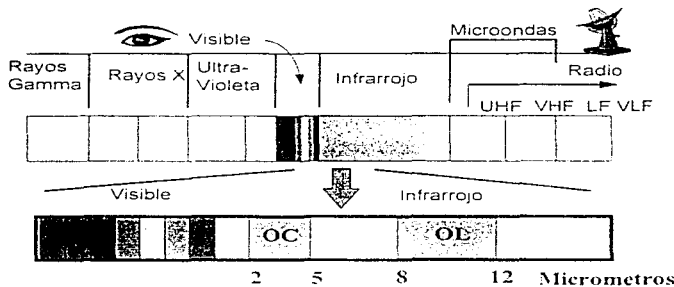
Los Radiómetros de Adquisición de Imágenes Térmicas no solo despliegan la imagen de los patrones de radiación de calor de las superficies, si no que están diseñados también para producir información de la temperatura de éstas.

Esto es un gran paso debido a que ninguno de éstos instrumentos mide la temperatura directamente, sino que la debe inferir a partir de la energía radiante medida. La gran ventaja de los radiómetros de adquisición de imágenes térmicas sobre los termómetros de no-contacto es que éstos permiten la rápida evaluación de alguna situación, vía patrones térmicos, y le muestra al operador exactamente lo que está siendo medido. Los radiómetros tienen también un tiempo de respuesta mucho más rápido (nanosegundos vs. microsegundos) que los termómetros de no-contacto. Un radiómetro de adquisición de imágenes IR realiza alrededor de 1 millón de mediciones por segundo. El reconocimiento de patrones térmicos por parte del operador facilita el análisis, ya sea en tiempo real o en post-procesado del área correcta en el momento adecuado. Mediante grabación en video y

procesamiento de datos por computadora, se pueden manejar y almacenar grandes cantidades de información, además de poder tener acceso a ella en cualquier momento. La mayor desventaja de los SAIR, comparados con los termómetros de no-contacto, es que su costo es regularmente de 20 a 30 veces más alto.

Actualmente se dispone de muchos tipos de instrumentos de medición de temperatura de no-contacto, y casi todos se basan en el mismo fenómeno físico:

- Todos los objetos del universo radian energía.
- La cantidad de energía radiada se incrementa conforme se incrementa la temperatura.
- La energía radiada es distribuida sobre una banda de longitudes de onda del espectro electromagnético.



El Espectro Electromagnético comprende desde las ondas de radio de baja frecuencia, microondas, espectro infrarrojo, luz visible y Rayos X. La distribución de la radiación para la temperatura de un objeto está dada por la función de Planck. El máximo de ésta curva se mueve hacia longitudes de onda más cortas conforme se incrementa la temperatura de los objetos (fig.4.1). La distribución de Planck se modula por la eficiencia del objeto actuando como radiador perfecto, también conocido como **cuerpo negro**. Los objetos reales tienen factores de emisividad menores a 1 que pueden variar dependiendo de la longitud de onda.

Los objetos a temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$) o cercanos a ella tienen el máximo de su distribución espectral de energía a la mitad de la región IR (cerca de los 10 micrómetros). Una cantidad suficiente de energía es radiada para permitir la detección a gran distancia utilizando un instrumento sensible. La consistencia de la relación entre la temperatura de los objetos y la energía que éstos radian permite a un instrumento bien calibrado hacer mediciones de temperatura muy exactas, sin contacto.

Los Radiómetros de Adquisición de Imágenes de alto desempeño difieren de las cámaras de televisión convencionales en muchos aspectos. Una clase de sistemas operan

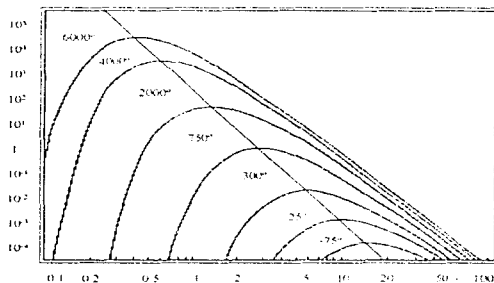


Figura 4.1
Longitud de Onda (en micrómetros)
vs.
Emitancia Espectral Radiante (en $\text{watts}/\text{cm}^2\text{micrómetros}$)

algunos detectores (a veces uno) individuales de señales que son rastreadas mecánicamente a lo largo de la pantalla con mayor eficiencia que sobre la superficie fotosensible de una cámara de TV común. Estos detectores deben ser enfriados a temperaturas criogénicas. Otra clase de sistemas (el vidicon piroeléctrico), es similar a una cámara de TV, el cual emplea una superficie térmicamente sensitiva, de gran tamaño, que no utiliza enfriamiento. Si embargo, debido a la naturaleza del efecto piroeléctrico estos sistemas son difíciles de cuantificar. La barrera Schottky es también una superficie amplia que evita los rastreos mecánicos, aún no ha sido desarrollada en forma viable para utilizarse de manera confiable

en radiómetros de Adquisición de Imágenes Térmicas, por lo cual la discusión se limitará a sistemas mecánicos de rastreo de imágenes.

Para desempeñar mediciones adecuadas de temperatura, los radiómetros de adquisición de imágenes térmicas incorporan una fuente de cuerpo negro de referencia, la cual es "vista" periódicamente por el detector para una adecuada calibración. Estos equipos utilizan lentes y ventanas que transmiten longitudes de onda IR de energía electromagnética; materiales como el Germanio, el Sulfuro de Zinc y el Silicón son típicos. Los filtros ópticos pueden modificar la respuesta espectral de los radiómetros para optimizar las mediciones (o la transmisión a través) de materiales específicos como pueden ser gases, plásticos y flamas. Actualmente se dispone de filtros Pasa-Altos, Pasa-Bajos, Pasa-Banda, Rechaza-Bandas y de Atenuación.

Casi todos los sistemas utilizan circuitos de conversión del rastreo para generar salidas de señal compatibles con TV. Por otra parte, los scanners empleados en los Radiómetros de Adquisición de Imágenes Térmicas pueden pasar desapercibidos al operador debido a que son los circuitos electrónicos quienes realizan la recalibración durante el barrido de conversión (de longitudes de onda) a imagen de TV.

4.2.2 El desempeño del sistema

El desempeño de un sistema de Adquisición de Imágenes Térmicas es medido por la forma en que despliega la cantidad total de información útil por unidad de tiempo. Esto incluye la combinación de la sensibilidad térmica o nivel de ruido aleatorio equivalente, la velocidad de rastreo y la resolución de la imagen o número de puntos independientes de medición en la imagen. Otras consideraciones incluyen el Rango Dinámico del Sistema, la Sensitividad de Banda Espectral, Calibración y Exactitud de las Mediciones. Parámetros como peso, consumo de energía, pantalla y fácil manejo siguen a los mencionados al principio.

Un sistema de adquisición de imágenes para visión nocturna es especificado por medio de un parámetro conocido como MRTD (Mínima Diferencia de Temperatura Detectable). Este parámetro se mide determinando el mínimo contraste térmico necesario

por un observador para identificar una serie de barras verticales utilizando el sistema que se encuentra bajo prueba. Las barras se aproximan y se hacen más pequeñas probando las resolución de la imagen del sistema. El contraste térmico (la diferencia de temperatura entre las barras y el fondo) es pequeño, con lo cual se prueba la sensibilidad térmica del sistema. El ojo del observador realiza una integración temporal, ofreciendo un mejoramiento de la sensibilidad que va en función de la velocidad de rastreo del sistema. Una baja MRDT califica a un sistema con un alto desempeño, que tiene gran eficiencia al permitir localizar e identificar blancos pequeños y de bajo contraste térmico.

Un Radiómetro de Adquisición de Imágenes Térmicas es un sistema que además de mostrar imágenes, realiza mediciones; además, la sensibilidad Térmica, Velocidad de Rastreo y Resolución Espacial- son las especificaciones que combinadas reemplazan la MRDT, y que describen el desempeño de los sistemas de visión nocturna. La **Sensibilidad Térmica** es la Diferencia de Temperatura Equivalente a Ruido (NETD) por la cual se define el nivel de ruido equivalente del sistema. La **velocidad de rastreo** es la razón de actualización de los cuadros de la imagen por parte del scanner. La **Resolución Espacial** es aquella que está especificada por medio de una curva de la Función de Respuesta Estrecha (SRF).

La combinación de los tres parámetros anteriores, nos indican el desempeño global de un sistema. Algunas veces es posible lograr mejoras en algunos de estos parámetros de manera individual.

4.2.3 Sensibilidad térmica

La energía térmica es emitida por los objetos en forma de fotones, de manera similar a la luz visible; el tiempo entre esas emisiones es aleatorio. Por otra parte, cuando se realizan muestreos muy pequeños, la emisión aleatoria de fotones es visible como una variación en intensidad o ruido térmico. Este ruido en imágenes térmicas se ve traducido de manera similar a la interferencia en un programa de T.V. En ambos casos el efecto se produce por el ruido aleatorio de los fotones ya sea de la escena o de el elemento sensitivo de la cámara.

Un sistema de adquisición de imágenes térmicas se caracteriza por una diferencia de temperatura equivalente a ruido; el promedio de múltiples puntos de la imagen reduce el nivel del ruido en un factor equivalente a la raíz cuadrada del número de muestreos promediados. Los instrumentos bien diseñados tendrán la capacidad de realizar este promedio para reducir el ruido. El ruido solamente es significativo cuando se opera en los intervalos más sensitivos y cuando se rastrean objetivos con bajo contraste térmico.

4.2.4 Velocidad de rastreo

La razón a la cual una imagen térmica completa es actualizada, por algún sistema de rastreo mecánico en particular, se conoce como la Velocidad de Rastreo del Sistema. La razón a la cual las imágenes de TV son actualizadas en un monitor es la razón por cuadro y está definida por estándares de la industria de TV.

Velocidades bajas de rastreo ofrecen bajo ruido acústico y costos bajos como ventajas, pero las imágenes son severamente distorsionadas cuando el scanner o la escena son movidos. Además, las bajas velocidades de rastreo (por debajo de 50 kHz) o los sistemas no compatibles con TV causan un molesto parpadeo en la pantalla. Los sistemas de extremadamente baja velocidad de rastreo (Rastreo Lento) ofrecen alta sensibilidad térmica y espacial pero son muy difíciles de enfocar y apuntar.

4.3 REVISION DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS 700 DE INFRAMETRICS

Estos Modelos reúnen una excepcional combinación de alto desempeño, funcionalidad y portabilidad para los usuarios de aplicaciones especializadas y áreas tales como investigación y desarrollo, análisis de objetivos predeterminados, pruebas no destructivas y mantenimiento predictivo en plantas.

Los Modelos de la Serie 700 optimizan su desempeño global al combinar el sistema de rastreo con otros elementos de alta tecnología, como son un microenfriador de ciclo cerrado calificado por la NASA para misiones espaciales, sistemas ópticos diseñados por computadora, almacenamiento digital de imágenes integrado, pantalla a color de Cristal Líquido también integrada y procesamiento por computadora.

Estos sistemas son completamente compatibles con equipos de televisión y sistemas de procesamiento de imágenes de uso común, asegurando el soporte a aplicaciones térmicas presentes y futuras.

Las características estándares en los modelos incluyen una pantalla de cristal líquido a color de fácil lectura (la cual puede ser convenientemente retraída dentro del sistema cuando no se utiliza) y un teclado con luz de fondo y teclas de gran tamaño. Algunos modelos ofrecen una interfase serial de comunicación para control remoto la cual también puede ser utilizada con un teclado remoto, además de ser sistemas portátiles (su peso es de alrededor 8.9 kg).

4.3.1 Características Estándar en todos los Modelos

4.3.1.1 Generales

- Microenfriador eléctrico de ciclo Stirling con modo de ahorro de energía.
- Zoom electro-óptico
- Imagen con alta resolución espacial
- Sistema de rastreo guiado por un galvanómetro de alta velocidad
- Lentes intercambiables
- Sensibilidad de onda larga (8-12 μm)

4.3.1.2 Modos de Operación

- Hasta 256 tonalidades de color
- Adquisición de datos
- Medición de emitancia
- Barrido por línea rápido
- Imagen
- Doble isoterma
- Medición por punto
- Polaridad inversa

4.3.1.3 Características Especiales

- Ajuste automático de nivel de temperatura central.
- Codificación automática de parámetros.
- Luz de fondo en el teclado.
- Pantalla de cristal líquido a color.
- Unidad de disquete con capacidad de almacenar 25 imágenes (NTSC) (20 imágenes en PAL).
- Capacidad para cambiar emisividad, temperatura de fondo y factores de transmisión óptica en imágenes grabadas.
- Escala de gris calibrada en las imágenes.
- Análisis en imágenes almacenadas en disco.
- Congelación de imagen.
- Temperaturas limitadas por isotermas.
- Compatible con ThermaGRAM[®].
- Formato de archivo de imagen TIFF.
- Software de operación actualizable.

4.3.1.4 Características Adicionales para los Modelos 760

- Análisis de temperatura en áreas variables.
- Puerto para salida de video digital.
- Medición de temperatura extensible a 1500 °C.
- Promediación de imágenes en tiempo real.
- Salida de línea de datos a través de puerto serial.
- Barrido por línea con integración variable de tiempo.
- Transferencia de datos de calibración vía puerto RS-232.
- Interfase serial de E/S RS-232.

4.3.1.5 Opcionales

- Lente de ángulo amplio 0.25X.
- Lente de ángulo amplio 0.5X.

- Lente telescópico 3X.
- Lente telescópico 10X.
- Lente telescópico 30X.
- Puntas de medición de temperatura en componentes ópticos (solo 760).
- Software de calibración (solo 760).
- Medición de temperatura extensible a 1500° C (opcional en 740, estándar en 760).
- Filtro de supresión de flama para altas temperaturas.
- Paquete portátil.
- Motor para enfoque remoto.
- Tablero de control remoto (sólo 760).
- Escudo de calor para el scanner.
- Filtros de aplicación especial.
- Carro de dos ruedas.
- Detector de 3-12 μm (sólo 760).
- Detector de 3-5 μm (sólo 760).
- Sistema de procesado de imágenes ThermaGRAM[®].
- Software para monitoreo TherMonitor[®].
- Almacenamiento digital de imágenes en tiempo real D*STAR.

4.3.2 Características /Función /Ventajas

	CARACTERISTICAS	FUNCION	VENTAJA
Adquisición de Imágenes	Utiliza normas Televisivas para producir los cuadros (60 Hz - NTSC) (50 Hz - PAL)	Utiliza el sistema de galvanómetro para combinar alta velocidad de muestreo con bajo consumo de energía.	Permite un imagen con la misma frecuencia de muestreo que las de TV, libre de parpadeos y capaz de mostrar escenas dinámicas sin distorsión.
	Óptica diseñada por computadora	Permite que la energía infrarroja recibida por el scanner sea enfocada directamente sobre el detector.	Provee una imagen clara y de alta resolución que permite la medición de temperatura en objetos pequeños.
	Sensibilidad de onda larga (LW, 8-12 μm)	Provee sensibilidad al instrumento para energía infrarroja generada a temperaturas ambiente.	Permite el uso de detectores pequeños para producir una imagen de alta resolución con buena sensibilidad; evita la degradación en la imagen debida a efectos atmosféricos y falsos puntos calientes por reflexiones solares.
	Sensibilidades de banda amplia (BB, 3-12 μm) u onda corta (SW, 3-5 μm) opcionales (sólo en 760)	Permite al Modelo 760 producir imágenes de longitudes de onda diferentes a onda larga.	Permite al usuario optimizar su equipo en aplicaciones específicas.
	Zoom electro-óptico variable continuamente de 4:1.	Varía la amplitud de los espejos rastreadores para cambiar el campo de visión.	Permite acercamientos en objetivos pequeños para mejor identificación de anomalías o medición en áreas pequeñas.
Medición	Filtro de densidad neutra (estándar en 760, opcional en 740)	Reduce la cantidad de radiación infrarroja incidente sobre el detector cuando se rastrean objetivos por arriba de 400° C	Permite mediciones de temperatura en intervalo extendido (20 - 1500 °C);
	Carrusel posicionador para 5 filtros (estándar en 760, para 1 solo filtro opcional en 740)	Sujeta y posiciona los filtros espectrales pasabandas de 1"	Permite al usuario cambiar las características de respuesta espectral de los sistemas para aplicaciones especiales o para inspecciones en objetivos con altas temperaturas.

CARACTERISTICAS	FUNCION	VENTAJA
Sondas de medición de temperatura en componentes ópticos (solo en 760)	Mide y cuenta radiométricamente los diferenciales de temp. entre lo sistemas ópticos externos y el scanner.	Mejora las mediciones de temperatura en situaciones en las que la óptica pudiera estar a diferente temperatura que el scanner.
Drive para disquete de 3.5", 1.44Mb, alta densidad integrado.	Permite almacenar, acceder y analizar digitalmente imágenes y datos de los parámetros de rastreo.	Permite almacenar información digital precisa en disquete para su posterior acceso y análisis; mejora la exactitud en las mediciones durante el post procesado de la imagen ya que permite cambiar valores de parámetros como emisividad, temp. de fondo y transmisión óptica en imágenes accedidas eliminando accesorios fotográficos y videograbadoras en muchas aplicaciones.
Sistema Automático para Recobrar Parámetros (APRS)	Acomoda los parámetros de operación en un área especial de la señal de video llamada VIR.	Provee al procesador de imágenes ThermaGRAM [®] de todos los datos necesarios para reconstruir automáticamente el escenario de la medición a partir de un video tape liberando al usuario de la necesidad de registrar todos los parámetros de la inspección.
Convertidor analógico a digital de 8 bits.	Convierte la señal analógica proveniente del detector en un formato digital para el procesado.	Divide el intervalo de temperatura determinado en una escala de 256 niveles discretos, mejorando la medición.
Salida digital de video (estándar en 760, no disponible en 740)	Proporciona una salida de video digital con reloj de pixel y señales de sincronía horizontal y vertical.	Permite al usuario acceso a la información digital de video "cruda" para su uso en aplicaciones avanzadas, tales como almacenamiento digital en tiempo real D*STAR.

CARACTERISTICAS	FUNCION	VENTAJAS
Seis modos de medición (estandar en 760, área y barrido por línea no están disponibles en el 740)	Punto, área, isoterma doble, barrido por línea, paletas de color y de saturación de colores.	Provee de herramientas que optimizan la medición en cualquier aplicación.
Otras Funciones		
Intercambio de imágenes	Intercambio entre una imagen en vivo y una imagen congelada.	Permite al usuario hacer comparaciones instantáneas en campo, es decir una imagen actual, con una tomada con anterioridad.
Gabinete metálico	Ofrece alta resistencia a interferencias por RF, ESD y electromagnéticas.	Permite al equipo operar en diferentes condiciones ambientales.
Aislamiento y acoplamiento acústicos.	Reduce los niveles de sonido generados por el scanner.	Permite su uso discreto y confortable en cualquier condición.
Teclado tipo membrana con luz de fondo.	Permite un manejo fácil de las funciones de control.	Provee un acceso fácil a las funciones de uso más frecuente, facilita la lectura en cualquier condición de luz y provee resistencia al polvo, la suciedad y la salpicadura de líquidos.
Pantalla de cristal líquido a color de 10 cm en diagonal.	Despliega la imagen generada por el equipo.	Primer instrumento en su tipo, portátil y de uso industrial que permite tener imágenes a color como en B/N en campo, que pueden ser vistas por más de una persona y que evita la fatiga de estar viendo a través de un visor óptico.
Paletas de 256 colores	Provee imágenes utilizando gamas de 256 colores.	Provee imágenes que proyectan contraste térmico con buena resolución.
Paleta de saturación	Identifica objetos en la imagen que se encuentren fuera del intervalo de temperatura predeterminado.	Provee inmediata identificación de puntos calientes mientras se puede observar una imagen de alta calidad en B/N.

	CARACTERISTICAS	FUNCION	VENTAJAS
	Diseño modular del componente.	Separan las partes funcionales del sistema en dos módulos.	Brinda máxima flexibilidad para todo tipo de aplicaciones, permitiendo utilizar el scanner en lugares de difícil acceso mientras la unidad de control y la pantalla permanecen con el operador.
	Formato de archivos TIFF	Las imágenes y el resto de la información son almacenadas en un formato de uso común.	Permite la fácil transferencia de imágenes hacia software de aplicaciones comunes para generación de reportes o procesado de imágenes.
	Pantallas de ayuda	Provee ayuda en la función que está siendo utilizada.	Promueve un uso amistoso para operadores ocasionales.
Portabilidad	Chaleco portátil	Permite el acarreo del sistema para operaciones portátiles.	Distribuye homogéneamente el peso del equipo para el confort del operario.
	Carro de dos ruedas para transportación del equipo. (opcional)	Transporta el equipo para dar mayor libertad de movimiento al operador.	Libera al operador de la necesidad de cargar ningún equipo, ya que el carro es capaz de transportar el sistema, la videograbadora, las baterías y los lentes adicionales.
	Diseño mecánico robusto	El sistema puede soportar golpes de hasta 40G y vibraciones de hasta 2G.	Incrementa la durabilidad del equipo y da confianza de uso en condiciones adversas.
	Modo de ahorro de energía para el microenfriador	Permite al microenfriador seguir funcionando mientras que la parte electrónica se encuentra apagada.	Alarga la vida de la batería y permite al usuario un rápido tiempo de respuesta después de una breve transportación de un área a la otra.

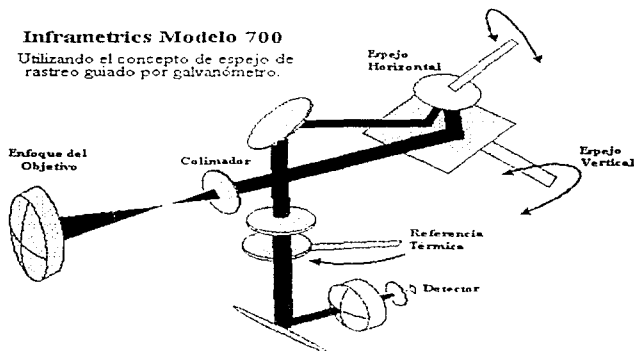
Alimentación de Energía	CARACTERISTICAS	FUNCION	VENTAJAS
	Fuente de alimentación regulada	Convierte la alimentación de CA en CD.	Provee de suficiente alimentación eléctrica para que funcionen todos los componentes del sistema.
	Bajo consumo de energía	Brinda mayor duración de la batería.	Se requiere una menor cantidad de baterías para una jornada de trabajo.
	Circuito interruptor	Corta la alimentación a los circuitos electrónicos en caso de sobrecarga.	Es más conveniente resetear el equipo que reemplazar fusibles de difícil acceso.
	Selección automática de línea de alimentación (120V/220-240V)	Se ajusta automáticamente al voltaje proveniente de la fuente de alimentación.	Brinda flexibilidad al sistema de acuerdo a las normas de energía en diferentes países.

4.3.3 Revisión del Diseño del Sistema

El diseño global de los Radiómetros de la Serie 700 de Inframetrics tienen un alto desempeño; la siguiente información brindará un breve panorama de la tecnología de los Modelos de la Serie 700.

4.3.3.1 Concepto del Rastreo

El diseño de rastreo incorpora un mecanismo dual de galvanómetros resonantes que producen imágenes más rápido; esta característica única asegura el registro adecuado de eventos dinámicos a través del uso de equipo de grabación de video estándar.



4.3.3.2 Conceptos Generales del Sistema

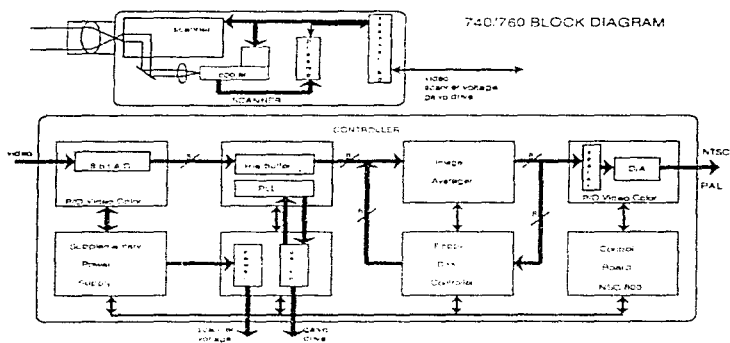
Los modelos de la Serie 700 son sistemas altamente versátiles que combinan ultra-alta resolución de imagen con mediciones precisas de temperatura. A pesar del poder de sus componentes electrónicos, controlados por microprocesador, las unidades son ligeras, se alimentan por baterías y pueden tener una variada aplicación en campo.

El modelo básico 700 incluye un scanner portátil, una unidad de control con drive para disquete y pantalla de cristal líquido de 10 cm. La unidad de control del modelo 760, integra además, un conector tipo RGB, una salida de video digital y un puerto de

comunicación serial que equipa a la unidad para control remoto cuando se utiliza con un teclado opcional de control remoto. Este puerto también puede ser utilizado para operación a control remoto preprogramada desde cualquier computadora.

Los modelos de la serie 700 incluyen un módulo microenfriador-detector de ciclo cerrado único en su tipo que elimina la necesidad de enfriar utilizando nitrógeno líquido. El microenfriador llevará al detector a la temperatura de operación en menos de cinco minutos, requiriendo únicamente de una alimentación de 3 Watts de potencia.

Un modo de espera del enfriador reduce el consumo de potencia del sistema en más de un 80%, manteniendo el enfriador a la temperatura de operación. Esto extiende la duración de la carga de batería y permite que el scanner se encuentre en condiciones de operación rápidamente después de transportarse de un lugar a otro durante una inspección.



El microenfriador de ciclo cerrado permite a los modelos de la serie 700 operar en la región de onda larga del espectro infrarrojo (8-12mm) lo cual es altamente deseable para aplicaciones en exteriores, o para hacer mediciones sensitivas en objetivos a temperatura ambiente.

El modelo 760 (opcional en 740) incluye también un promediador de imágenes en tiempo real como función estándar. Esta característica mejora la relación señal a ruido en un factor de cuatro y aumenta tanto la sensibilidad térmica como la nitidez de la imagen. La función de congelamiento de imagen es estándar en todos los modelos de la Serie 700 y permite al usuario congelar una imagen en campo y usar cualquiera de los modos de medición en la misma.

4.3.3.3 Grabación de Imágenes Congeladas y Análisis Posterior

El drive para disquete puede grabar hasta 25 imágenes en formato NTSC, (20 imágenes en formato PAL) en un disco de 3.5" de alta densidad. Después de que una imagen es llamada del disquete, cualquiera de los modos de medición pueden ser aplicados para análisis. Esto incluye la habilidad para cambiar la emisividad, temperatura de fondo y los valores de transmisión óptica. Además, éstos discos con imágenes capturadas pueden ser utilizados directamente por los sistemas de procesado de imágenes térmicas, como lo son TherMonitor[®] y ThermaGRAM[®].

4.3.3.4 Grabación de Datos e Imágenes en Tiempo Real y Reproducción para Análisis

El Modelo 760 permite almacenar imágenes dinámicas digitales en tiempo real utilizando el sistema D*STAR, que es un sistema configurado especialmente para computadoras personales.

Todos los modelos 700 permiten almacenar la información empleando un sistema de codificación llamado APRS (Sistema Automático de Recuperación de Parámetros), el cual codifica todos los parámetros seleccionados en el sistema incluyendo fecha y hora y los acomoda dentro de la señal de video. Este video de tipo estándar es reproducido directamente en el procesador de la imagen para llevar a cabo el análisis, dejando libre el equipo para continuar utilizándolo en otras aplicaciones. La combinación de éstas características asegura al operador que está siendo colectada únicamente información no

saturada y, que además todos los parámetros importantes de la medición, están siendo debidamente almacenados durante el proceso de colección de datos. También con el sistema ThermaGRAM[®] cualquier imagen de video puede ser digitalizada e insertada

4.3.3.5 Efectos Atmosféricos

Existen dos bandas en la atmósfera en las cuales se transmite de manera efectiva, la energía infrarroja: la banda de 3-5mm y otra entre los 8-12mm; la banda de 3-5mm tiene una región de absorción muy significativa a los 4.2mm. Cuando la adquisición de las imágenes se realiza en exteriores o en un día húmedo, el sistema recibe significativamente menos energía en el detector cuando se utilizan sistemas de 3-5mm debido a la mencionada banda de absorción. La región de 8-12mm se encuentra libre de cualquier banda de absorción y por esto es relativamente inmune a la humedad. Todos los sistemas Inframetrics utilizan detectores de 8-12 μm (3-12 μm y 3-5 μm son opcionales para aplicaciones especiales).

4.3.3.6 Calibración

Repetibilidad

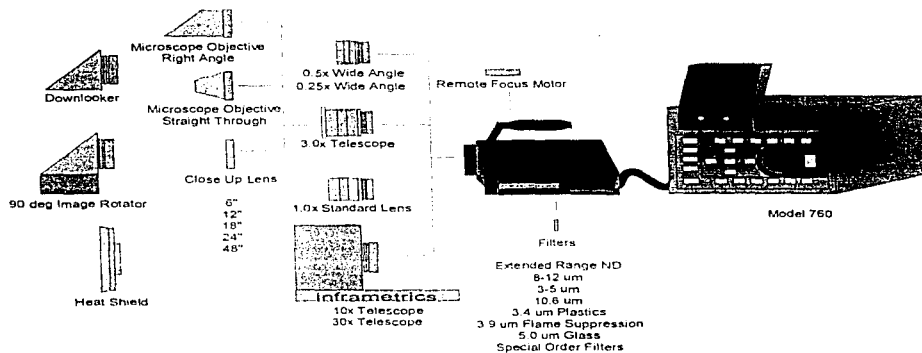
La repetitividad de las mediciones en los equipos de la serie 700 tienen una precisión de aproximadamente $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $\pm 0.5\%$. Esto es válido dentro del intervalo de temperatura ambiente de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3.4 Los modelos de la serie 700. - Un completo sistema de medición infrarroja

Se cuenta con una gran variedad de accesorios para la serie 700 y se pueden agrupar dentro de tres categorías: Ópticas, Portabilidad y Procesamiento de imagen.

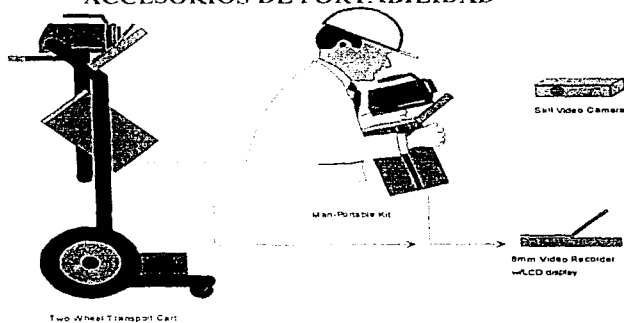
A continuación se muestran esquemáticamente los accesorios de la parte óptica del modelo 760.

ACCESORIOS OPTICOS



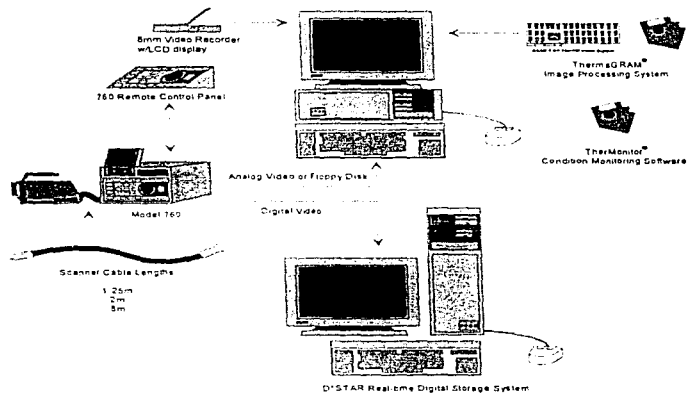
De igual manera, se muestran a continuación los accesorios de portabilidad y transportabilidad.

ACCESORIOS DE PORTABILIDAD



4.3.5 Opciones de accesorios para el procesamiento de imágenes

Hay varias opciones disponibles para los datos de imagen grabados en campo. En el siguiente dibujo se muestran los accesorios necesarios para el procesamiento de imagen.



4.3.5.1 Procesamiento de imagen de los modelos 700

Cualquier imagen grabada en disco puede ser procesada por los modelos 700. Esto se debe a que la tabla de calibración y los parámetros de medida están guardados en cada imagen. Si se requiere más potencia de procesamiento, existen tres diferentes sistemas de procesamiento de imagen: El D*STAR, el ThermaGram, y el TherMonitor.

4.3.5.1.1 D*STAR

Permite al usuario tener imágenes transitorias que pueden ser grabadas para revisar y analizar. El almacenamiento de datos incluye: los valores térmicos para cada elemento filmado sobre campo de video, fecha y hora y la información de configuración del radiómetro. Esto es válido aún si la configuración ha sido cambiada durante la grabación. Se pueden almacenar hasta 10 minutos de datos continuos a una razón de 60 imágenes por segundo.

4.3.5.1.2 ThermaGram para Windows

El ThermaGRAM consiste en una tarjeta digitalizadora de desplegado, que se instala en una ranura de expansión ISA estándar de cualquier PC y un Software de Windows para controlar las funciones y la computadora.

El ThermaGRAM puede utilizar video estándar como entrada (ya sea en vivo o cinta de video), video digital 8 o imágenes grabadas en PCMCIA imageBank™.

Cuando se usa cinta de video, el ThermaGRAM ajusta automáticamente el nivel de negro, la ganancia y la linealidad de la señal de video que llega; utiliza una codificación VIR (Sistema Automático de Recuperación de Parámetros) para identificar apropiadamente todos los parámetros.

Así, una imagen en vivo se presenta en la pantalla en ByN, color, o ByN y color simultáneamente.

El ThermaGRAM usa las convenciones de la interfase estándares del usuario de Windows y establece nuevos lineamientos para facilidad y transferencia de datos a sus otras aplicaciones de Windows. Usando la tecnología del OLE (ligado e integración de objetos), todos los datos, incluyendo imágenes térmicas y visuales, se pueden transferir automáticamente a un procesador de palabras u hoja de cálculo.

4.3.5.1.3 TherMonitor

El TherMonitor es esencialmente un ThermaGRAM pero sin la tarjeta de digitalización, para aquellos usuarios que deseen depender exclusivamente de su tarjeta de memoria como fuente de información. Todas las características de análisis y la transferencia de datos del OLE se mantienen. Además, emplea el Data Manager que es usado para desarrollar seguimientos a bases de datos de imágenes, combinando información de diferentes modalidades de pruebas (ultrasonido, análisis de aceite, etc.) y análisis de tendencias térmicas realizados con anterioridad.

CAPITULO V

*ANALISIS DE LAS TERMOGRAFIAS UTILIZANDO EL PROGRAMA DE
COMPUTO THERMAGRAM 95*

<i>5.1 DESCRIPCION DEL REPORTE</i>	<i>103</i>
<i>5.2 LA IMAGEN TERMOGRAFICA</i>	<i>103</i>
<i>5.3 JUEGO DE HERRAMIENTAS PARA ANALISIS</i>	<i>104</i>

CAPITULO V

ANALISIS DE LAS TERMOGRAFIAS UTILIZANDO EL PROGRAMA DE COMPUTO THERMAGRAM 95

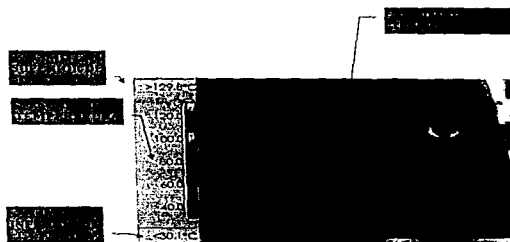
5.1 DESCRIPCION DEL REPORTE

El reporte termográfico consta de una presentación de las imágenes termográficas (mostrado al final del presente capítulo), y en muchos casos, su correspondiente imagen visual del recorrido realizado en las instalaciones de la Refinería "Gral. Lázaro Cárdenas" en Minatitlán, Veracruz.

Además de las imágenes, se aplicó un análisis sobre éstas; las herramientas que forman parte del análisis son descritas a continuación:

5.2 LA IMAGEN TERMOGRAFICA

Las imágenes termográficas que han sido captadas y cuantificadas por el equipo de termografía son presentadas en paletas de pseudocolores, la cuantificación dependerá de la cantidad de energía que cada parte de la imagen estaba emitiendo a la hora de ser captada, la coloración será distribuida por la computadora a lo largo de la escala de temperatura determinada al momento de la inspección. De acuerdo a la imagen del ejemplo 1, el color negro será atribuible a todas las temperaturas por debajo del límite inferior de la escala (en este caso, < 30.1 °C), el color blanco se le atribuirá a cualquier parte de la imagen que contenga temperatura por arriba del límite superior (> 129 °C). Las partes de la imagen que se encuentren dentro de esos puntos extremos (de la escala de 100°C), serán coloreadas con la gama de pseudocolores seleccionada.

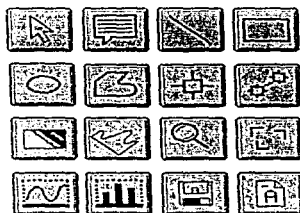


Ejemplo 1

Las imágenes mostradas en el reporte, son las correspondientes a las partes que mostraron mayor emisión de energía por paredes de la caldera CB-3 de la Refinería "Gral. Lázaro Cárdenas" en Minatitlán, Veracruz.

De estas imágenes se realizará un análisis utilizando las herramientas que se mencionan a continuación.

5.3 JUEGO DE HERRAMIENTAS PARA ANALISIS



Una vez que tenemos una imagen presente en la pantalla principal del programa ThermaGRAM, podemos aplicar a la misma una gran cantidad de herramientas de análisis. Para activar cualquiera de las herramientas, es necesario dar un clic con el botón izquierdo del mouse sobre la misma, esto es suficiente para que la herramienta pueda ser colocada en alguna parte de la imagen y realizar su función una sola vez. Para que la herramienta quede activada para usarse más de una vez, es necesario oprimir el botón SHIFT + el botón

izquierdo del mouse. Para desactivar cualquiera de las funciones, solo se necesita escoger cualquiera otra.

A continuación, describiremos la funciones de las principales herramientas:

PUNTERO O SELECTOR



Esta herramienta es utilizada para reposicionar y cambiar la forma de algunas herramientas de análisis así como para editar elementos de pantalla y/o activar otras herramientas.

ETIQUETAS



Para colocar una etiqueta en alguna imagen:

1. Seleccionar la herramienta; la forma del apuntador cambiará cuando la etiqueta esté activada.
2. Colocar el apuntador en el lugar hacia el cual se desea que la etiqueta apunte.
3. Presionar el botón izquierdo del mouse y arrastrarlo hacia el lugar de la imagen en el que se desea que la etiqueta aparezca.

El texto de la etiqueta es por default **Label #** y aparecerá en el lugar en el que se encuentre el apuntador a la hora que se libera el botón del mouse. Dicho texto se puede cambiar y/o editar activando nuevamente el comando **Edit Label** del menú **Edit**.

LINEAS



Estos iconos activan comandos comunes al ambiente Windows, que son utilizados ya sea para trazar líneas, polígonos, elipses, círculos, etc. Estas herramientas se utilizan con la finalidad de hacer señalamientos particulares sobre la imagen termográfica o para completar

o definir el contorno de la geometría del objeto al cual pertenece la imagen. Para activarlas dichas herramientas basta con hacer clic sobre el icono correspondiente.

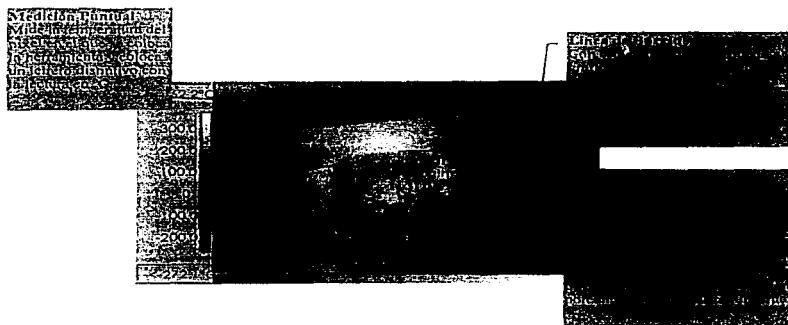
MEDICION PUNTUAL



Para colocar la herramienta de medición puntual de temperatura en la imagen a analizar, es necesario:

1. Activar dicha herramienta colocando el puntero sobre la misma y dando un clic.
2. Colocar el puntero sobre el lugar de la imagen en el cual se desea hacer la medición y dar un clic.

- **Medición Puntual:** La lectura de la temperatura del punto señalado mostrará un letrero que identifica la medición y la temperatura en °C (también se pueden obtener las temperatura en °F, K, luminancia o en unidades propias del instrumento); es posible hacer tantas mediciones como se desee.
- **Línea de Barrido:** Al trazar una línea de la longitud deseada entre dos puntos extremos y de perfil variable, se obtiene una tabla de valores de temp. vs. posición a lo largo de todo el recorrido, si la imagen se encuentra debidamente escalada, obtenemos también la longitud de la línea en metros o en píxeles.



Area: Con el área podemos graficar la distribución de temperatura dentro del área inscrita por el usuario, ésta puede ser de cualquier forma deseada, y puede incluso ocupar toda el área de la imagen.

DIFERENCIADOR



La herramienta diferenciador es utilizada para desplegar la diferencia en temperatura entre dos mediciones puntuales, líneas o regiones.

Para desplegar una diferencia de temperatura:

1. Recoger la herramienta diferenciador del juego de herramientas, colocando el puntero sobre la misma y dando un clic con el botón izquierdo del mouse. El puntero cambiará cuando se encuentre sobre la imagen mostrando en la parte inferior el icono del diferenciador. Cuando el puntero está cerca de alguna herramienta de análisis sobre la imagen cambia nuevamente mostrando el símbolo + que indica que esa herramienta es factible para diferenciar con alguna otra.
2. Mover el puntero hacia la herramienta de análisis, la cual se desea diferenciar con respecto a otra, cuando aparece el símbolo + presionar el botón izquierdo del mouse y mantenerlo presionado, arrastrar el mouse hasta colocar el puntero en la otra herramienta de análisis, aparecerá el símbolo - en la herramienta.
3. Soltar el botón para que aparezca desplegada la diferencia de temperatura entre las herramientas seleccionadas.

Para Editar las propiedades de una herramienta diferenciadora, con el apuntador dar dos clics sobre la herramienta que se desea modificar, aparecerá entonces la ventana de diálogo **Edit Differencer**, en la cual se podrán modificar el color, el texto, los puntos a los cuales está conectada la herramienta, y la información que despliega la etiqueta de la misma.

ISOTERMA



La herramienta isoterma se utiliza para colorear de un mismo tono todas las regiones de una imagen que se encuentren dentro de una banda de temperatura especificada por el usuario.

Para desplegar una isoterma en una imagen:

1. Recoger la herramienta dando un clic con el puntero posicionado sobre la misma. El puntero cambiará cuando la herramienta sea colocada sobre la paleta de colores de temperatura en el extremo izquierdo de la imagen.
2. Colocar el puntero en la parte de la escala que se desee definir como el límite superior de la isoterma, presionar y mantener así el botón izquierdo del mouse. El puntero cambiará mostrando ahora que se está definiendo la isoterma, si el mouse se desplaza por arriba de la posición inicial el puntero cambiará mostrando una flecha hacia arriba.
3. Arrastrar el puntero hacia el punto que se desea definir como el límite inferior de la isoterma.
4. Soltar el botón y la isoterma quedará definida.

Las regiones que tengan temperaturas entre los límites superior e inferior de la isoterma definida quedarán coloreadas con el color con el aparezca por default en la herramienta de isoterma (este color puede ser cambiado utilizando la ventana de diálogo **Edit Isotherm** que se describe a continuación).

Para editar las propiedades de la isoterma, con la herramienta puntero del juego de htas. seleccionar la isoterma que se desee modificar dándole dos clics, aparecerá entonces la ventana de diálogo **Edit Isotherm**, en la cual se podrán modificar los límites superior e inferior de la isoterma y el color de la misma.

PERFIL-EN IMAGEN



Esta herramienta sirve para analizar el perfil de temperatura a lo largo de una línea trazada sobre la imagen y desplegar el perfil a lo largo de la imagen misma.

Para aplicar un perfil-en imagen:

1. Recoger la herramienta perfil-en imagen del juego de htas. colocando el puntero sobre la misma y dando un clic con el mouse.
2. Mover el puntero hacia el punto que se desee iniciar el perfil de temperatura.
3. Oprimir el botón izquierdo del mouse y mantenerlo oprimido mientras se arrastra el apuntador hacia el punto que se desee sea el extremo opuesto de la gráfica. Si al mismo tiempo se oprime el botón SHIFT, la línea trazada estará limitada a ángulos de 0, 30, 45, 60 o 90°.
4. Soltar el botón del mouse para que la línea quede completada y despliegue el perfil-en imagen.

El perfil-en imagen graficará la temperatura en cada punto a lo largo de la línea y las temperaturas máxima, mínima y promedio aparecerán señaladas en azul, verde y rojo respectivamente. El perfil tiene también dos cursores móviles con lectura, uno vertical y otro horizontal, el primer cursor puede ser movido a lo largo de la línea del perfil y despliega una lectura de temperatura en cualquier punto a lo largo de la línea. Cuando se coloca un perfil sobre la imagen, el cursor se encuentra inicialmente en el medio de la línea del perfil. Para mover este cursor y obtener lecturas de nuevas posiciones a lo largo de la línea del perfil, utilizar las teclas \rightarrow o \leftarrow . Para mover el segundo cursor, que se encuentra paralelo a la línea del perfil, utilizar las teclas \uparrow o \downarrow . Para incrementar el tamaño de la gráfica en imagen, se utilizan las teclas **Page Up** o **Page Down**.

Para editar las propiedades del perfil-en imagen, es necesario dar dos clics con el puntero en el perfil de interés para activar la ventana de diálogo **Edit On-Screen Profile**, en la cual

podrán ser modificadas las coordenadas de inicio y fin de la línea del perfil, los atributos de color, tamaño, lecturas, las herramientas que se desean ver, editar la etiqueta del perfil, calibrar temperatura, etc.

AMPLIFICACION



Esta herramienta sirve para producir una amplificación de la imagen.

Para aplicar la amplificación:

1. Recoger la herramienta del juego de herramientas colocando el puntero sobre la misma y dando un clic. El puntero cambiará mostrando ahora una lupa cuando se coloca sobre la imagen termográfica.
2. Para amplificar la imagen en un factor de dos, dar un clic con el botón izquierdo del mouse en la parte que se desee sea el centro de la imagen amplificada. Para amplificar una región específica de la imagen, mover el puntero hacia la esquina superior derecha del área que se desea señalar para amplificar, presionar el botón izquierdo del mouse y mantenerlo oprimido, a continuación arrastrarlo hasta que el área de interés quede inscrita dentro del rectángulo que aparecerá, una vez que toda la región deseada está inscrita dentro del rectángulo, soltar el botón.

Para reducir la amplificación en una imagen previamente amplificada por un factor de dos:

Oprimir la tecla SHIFT mientras se da un clic con el botón izquierdo del mouse y la herramienta de amplificación activada.

Utilizar la opción **View Whole** en el menú **Image** para regresar a una imagen no amplificada.

HERRAMIENTA PosiTrak®



La herramienta PosiTrak es una función desarrollada y patentada para proveer dos funciones relacionadas pero distintas entre sí.

- **Alineamiento de Imágenes:** La herramienta PosiTrak puede ser utilizada para tomar las mismas mediciones térmicas de una serie de imágenes del mismo objeto aun si las imágenes han sido tomadas desde diferentes posiciones, o utilizando un ángulo diferente de la cámara. Se colocan las herramientas (de medición puntual, perfiles, etc) y se establecen tres puntos de referencia en la imagen. Entonces alineando las nuevas imágenes correspondientes contra esos tres puntos de referencia las herramientas de análisis son movidas hacia las posiciones correctas de las nuevas imágenes.
- **Calibración de Distancia¹:** La herramienta PosiTrak puede ser utilizada también como un simple método de escalamiento de imágenes utilizando parámetros como la distancia entre la cámara y el objetivo y el ángulo de visión utilizando algún objeto de tamaño conocido dentro del campo de visión.

Utilizando POSITRAK y Calibrar Distancia para escalar la imagen y crear un sistema de medición.

Cuando se desea escalar una imagen, y se escoge alguna unidad de medición del mundo real (ver **Units** en el menú **Options**) ThermoGRAM para Windows tiene que traducir las mediciones de píxeles a distancias. A continuación, dos formas de establecer esta relación y crear un escalamiento en las imágenes:

1. Utilizando la opción **Calibrate Dist** en el menú **Image**. Esta opción establece un sistema coordenado con su origen en la esquina superior izquierda de la imagen, ejes en las

¹ La herramienta PosiTrak no estará disponible si se han seleccionado píxeles como unidad de medición de distancia (utilizando **Units** en el menú **Options**), debido a que las posiciones y mediciones estarán dadas entonces absolutamente en términos de píxeles mas que en unidades reales de medición.

direcciones vertical y horizontal y una escala calculada a partir del campo de visión de la cámara y la distancia.

2. Utilizando la herramienta PosiTrak, lo cual brinda una aproximación mas flexible y que a continuación se describe.

A. Verificar que en la opción **Units** del menú **Options** esté marcado **System-meters** en el cuadro **Distance**.

B. Activar la herramienta PosiTrak.

C. Escoger la opción **Calibrate Dist** del menú **Image** e introducir los parámetros que se piden en el cuadro de diálogo. (Distancia al objeto, ángulo de visión vertical y horizontal). dar OK.

D. Ahora es posible trazar una línea y ver la distancia que hay entre dos puntos extremos, así como conocer el área inscrita dentro de alguna región definida utilizando las opciones de rectángulo, elipse o polígono.

PERFIL DE TEMPERATURA



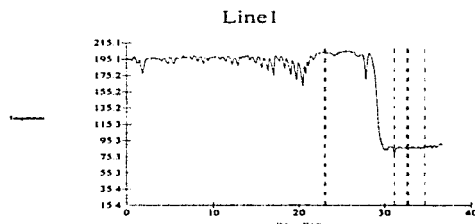
Sirve para desplegar una gráfica dentro de una ventana mostrando el perfil de temperatura a lo largo de alguna línea trazada en la imagen.

Para desplegar un perfil de temperatura:

1. Seleccionar la herramienta línea colocando el puntero sobre la misma y dando un clic con el botón izquierdo del mouse.
2. Con la herramienta activada, colocar el puntero en la parte de la imagen que será considerada el inicio de la línea, dar un clic. colocar el puntero en el lugar que se desee sea el extremo opuesto de la línea, dar dos clics.
3. Con la línea activada escoger la herramienta perfil de temperatura, automáticamente se genera una nueva ventana con la gráfica de distancia contra temperatura a lo largo de la línea trazada.*

Para editar las propiedades de la gráfica, dar dos clics sobre la línea activada, aparecerá la ventana de diálogo **Edit Line**, en donde se podrán modificar algunas características y la forma en que se utilizan los datos para generar la gráfica, así como el tipo de gráfica, color de la herramienta, edición del texto de la misma y algunos otros atributos de la herramienta.

- **Perfil de Temperatura:** Se obtiene a partir de la línea de barrido, el programa grafica los puntos que son tocados en la imagen por la línea en una gráfica de temperatura contra distancia.



HISTOGRAMA



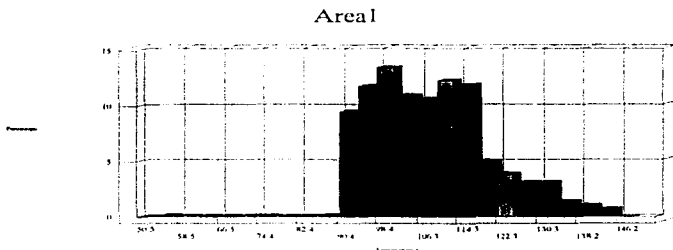
Esta herramienta sirve para desplegar un histograma de distribución de temperaturas en el interior de alguna región previamente inscrita.

Para desplegar un histograma de temperatura:

1. Definir una región utilizando cualquiera de las herramienta indicadas para este propósito.
2. Activar la región dando un clic sobre la misma con el puntero.
3. Una vez activada, seleccionar la herramienta Histograma. Automáticamente se generará una ventana que contenga una gráfica con la distribución en porcentaje de las temperatura dentro del área seleccionada.*

Para editar las propiedades del histograma, dar dos clics sobre la región activada, aparecerá la ventana de dialogo **Edit Region**, en donde se podrán modificar algunas características y la forma en que se utilizan los datos para generar el histograma así como el tipo de gráfica, color de la herramienta edición del texto de la misma y algunos otros atributos de la herramienta.

- **Histograma de Temperaturas:** Es una gráfica de barras, de porcentaje contra rango pequeños de temperatura que nos da una idea muy clara de la distribución de la temperatura dentro del área inscrita por el usuario.



* Cuando se generan las ventanas que contienen ya sea la gráfica de perfil o el histograma, usualmente ocupan todo el espacio de la pantalla, para volver a la imagen, en el menú **Window** seleccionar cualquiera de las opciones **Tile Vertical** o **Tile Horizontal**, o la opción **I**, en la parte inferior del menú.

GUARDAR EN UN ARCHIVO ASCII



Esta herramienta sirve para guardar la información deseada en un archivo en formato ASCII de la siguiente manera:

1. Seleccionar la herramienta que contiene la información que se desea guardar en ASCII.

2. Seleccionar la herramienta Guardar en ASCII, aparecerá la ventana de dialogo **Save Tool in ASCII Format** en donde se deberá especificar el nombre y la ruta del archivo hacia el cual se desea guardar la información, la ventana propondrá un nombre.

De acuerdo a la herramienta seleccionada, será la cantidad de información que se guardará en ASCII, la etiqueta contendrá únicamente el texto de la hta, la medición puntual incluirá además la medición de temperatura. la línea además incluirá la longitud de la misma y las temperaturas mínima, máxima y promedio si se desea, las regiones incluirán el área de la mismas en la unidades seleccionadas y así sucesivamente dependiendo de la información que usualmente contenga cada herramienta.

COPIAR EN ASCII



Esta herramienta sirve para copiar la información contenida en la herramienta activada hacia el portapapeles de Windows en formato ASCII.

Para copiar en ASCII:

1. Seleccionar la herramienta de la cual se desee copiar su información en ASCII, activándola con el mouse.
 2. Recoger la herramienta Copiar en ASCII del juego de htas. para copiar los datos hacia el portapapeles.
- Vaciar o pegar la información en donde se desee, ya sea una hoja de calculo, documento o archivo cualquiera.

REPORTE TERMOGRAFICO



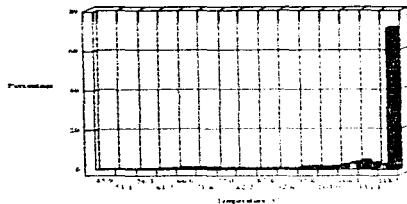
PEMEX
CORPORACION PETROLERA MEXICANA

REFINERIA GRAL. LAZARO
CARDENAS
MINATITLAN, VER.

FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
09:16
RGLC. 01
Caldera CB-3 Lado Oriente.
Nivel de domo inferior de lodos.

Area1



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE
TEMPERATURAS EN EL AREA 1

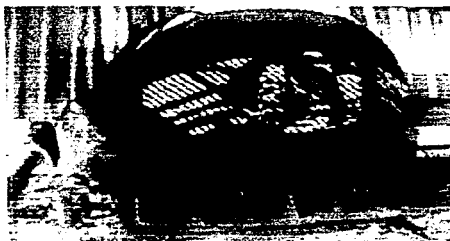


IMAGEN VISUAL

>123.7°C

120.0
110.0
100.0
90.0
80.0
70.0
60.0
50.0

<45.9°C

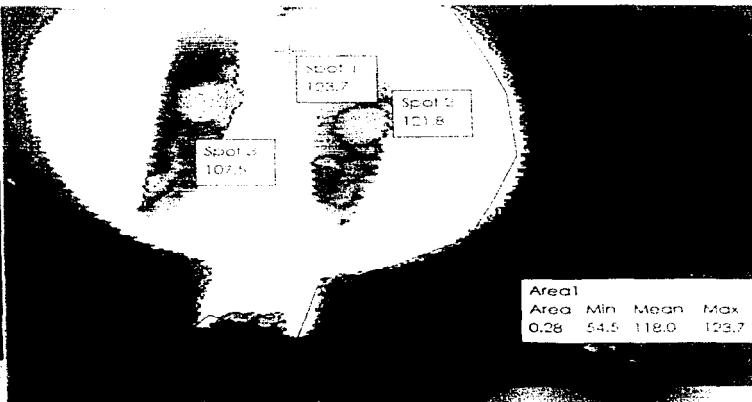


IMAGEN TERMOGRAFICA

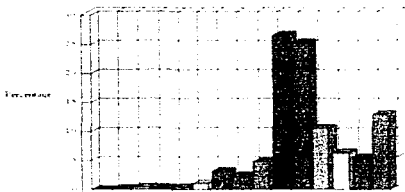
REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
09:25
RGLC. 02
Pared del lado Oriente. Segundo
Nivel. (Mirilla).

Area 1



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS
EN EL AREA 1



IMAGEN VISUAL

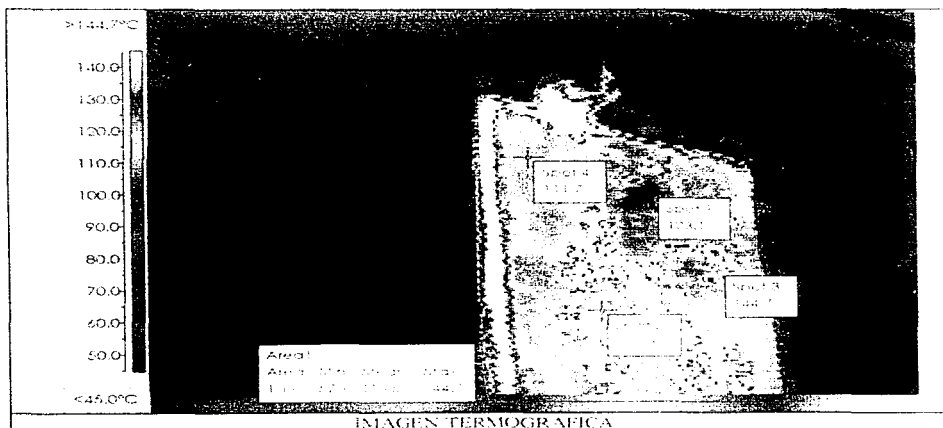


IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
09:25
RGLC. 03
Pared lado Oriente Segundo Nivel
(Mitrilla)

Area 1



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURAS EN EL AREA 1

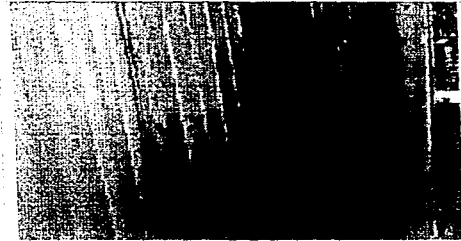


IMAGEN VISUAL

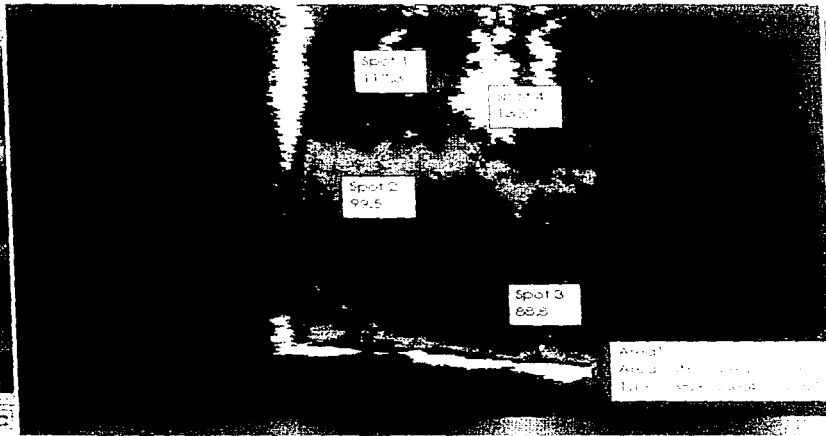
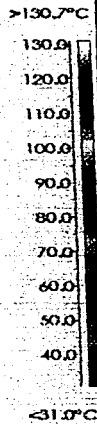


IMAGEN TERMOGRAFICA

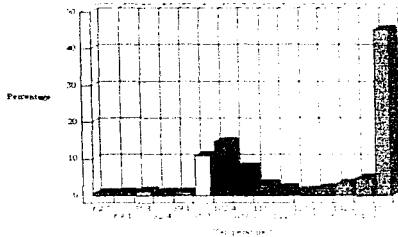
REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
09:19
RGLC, 04
Pared lado Poniente Tercer Nivel
(Mirillas)

Area 1



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL AREA 1

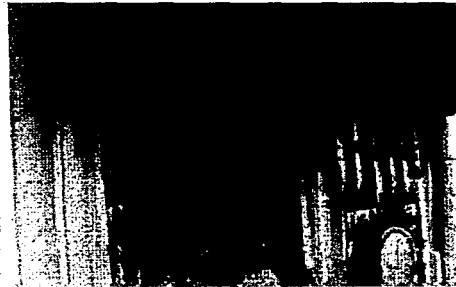


IMAGEN VISUAL



IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995
09:50
RGLA 05
Minilla (tercer Nivel lado
Pomente)

Area 1

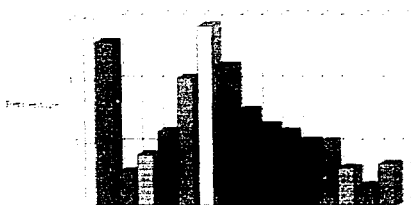


IMAGEN VISUAL

>172.5°C
170.0
165.0
160.0
155.0
150.0
145.0
140.0
135.0
130.0
125.0
<122.5°C

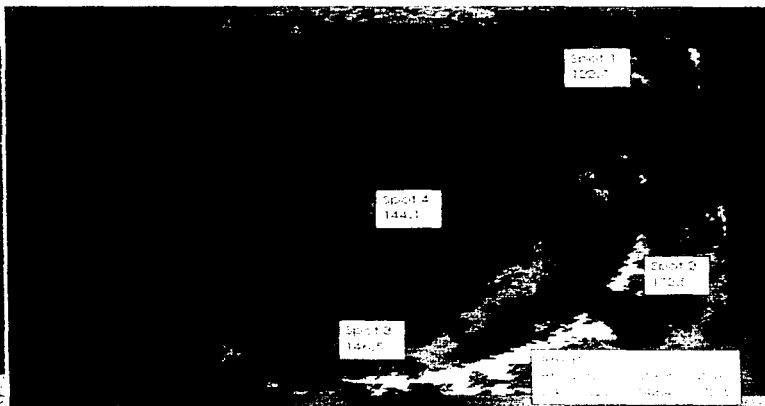


IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO

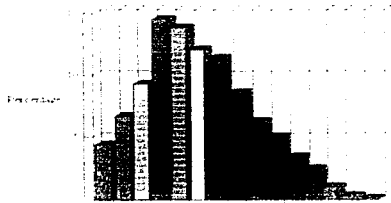


PEMEX
REFINERIA GRAL. LAZARO CARDENAS
MENATITLAN, VER.

FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995
11:20
RGLC-06
Toma Abierta de la caldera lado
Poniente.

Area I



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN
EL AREA I



IMAGEN VISUAL

>138.1°C

130.0
120.0
110.0
100.0
90.0
80.0
70.0
60.0
50.0
40.0

<38.4°C



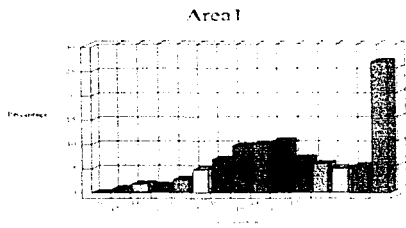
IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
 HORA:
 TERMOGRAFIA:
 EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
 11:30
 RGLC 07
 Toma abierta de caldera lado
 Oriente.



HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL AREA I

IMAGEN VISUAL

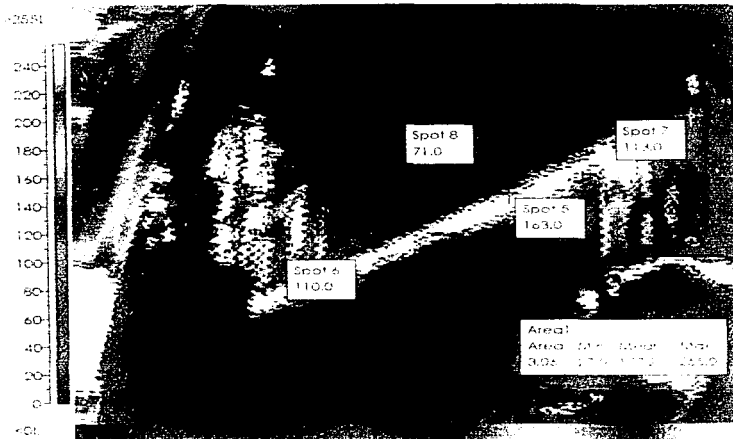


IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO



FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
11:40
RGLC. 08
Caldera, toma abierta lado Norte.
Nivel Superior.

Area I

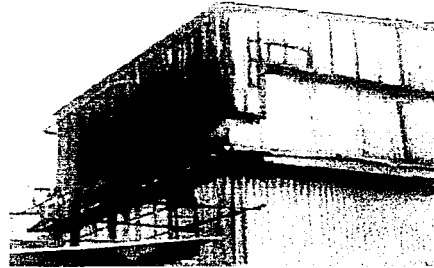
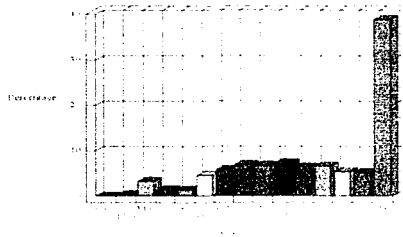
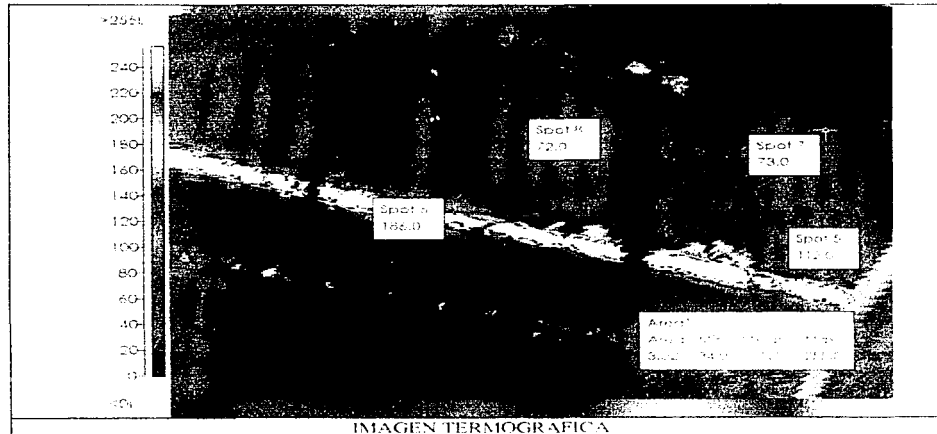


IMAGEN VISUAL



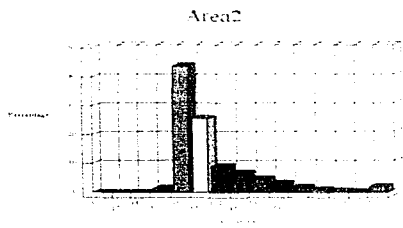
REPORTE TERMOGRAFICO



PEMEX
REFINERIA GRAL. LAZARO
CARDENAS
MINATITLAN, VER.

FECHA:
 HORA:
 TERMOGRAFIA:
 EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
 12:05
 RGLC. 09
 Tercer Nivel. Pared lado Oriente

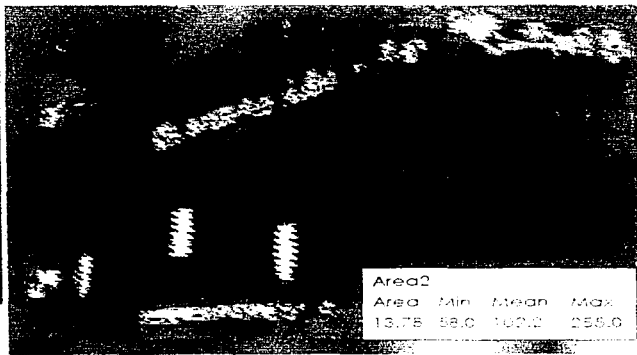
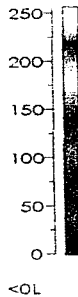


HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE
 TEMPERATURAS EN EL AREA 1



IMAGEN VISUAL

>255L



Area2			
Area	Min	Mean	Max
13.75	88.0	100.0	259.0

IMAGEN TERMOGRAFICA

REPORTE TERMOGRAFICO

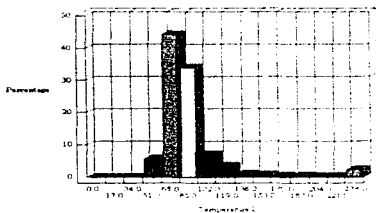


**REFINERIA GRAL. LAZARO
CARDENAS
MINATITLAN, V.F.R.**

FECHA:
HORA:
TERMOGRAFIA:
EQUIPO:

23 DE NOVIEMBRE DE 1995.
12:15
RGLC. 10
Pared lado Oriente

Area2



**HISTOGRAMA DE DISTRIBUCION DE
TEMPERATURAS EN EL AREA 2**



IMAGEN VISUAL



IMAGEN TERMOGRAFICA

CAPITULO VI

ANALISIS DE UN CASO PRACTICO

<i>6.1 INFORMACION DE CAMPO</i>	<i>118</i>
6.1.1 Características de la caldera	118
6.1.2 Características del combustible	118
6.1.2.1 Combustóleo	118
6.1.2.2 Gas de refinería	119
6.1.3 Condiciones ambientales	119
6.1.4 Comportamiento esperado a las condiciones de diseño (información de fabricante)	120
6.1.5 Condiciones de operación	120
<i>6.2 DIAGNOSTICO ENERGETICO</i>	<i>121</i>
6.2.1 Balance de materia y energía	121
<i>6.3 RESULTADOS DEL CALCULO DE LA EFICIENCIA</i>	<i>124</i>
6.3.1 Método directo	124
6.3.2 Método indirecto	124
<i>6.4 RESULTADOS DEL DIAGNOSTICO ENERGETICO, A LAS CONDICIONES DE OPERACION Y SU COMPARACION CON LAS CONDICIONES DE DISEÑO</i>	<i>125</i>
6.4.1 Comparación de las eficiencias reportadas por el fabricante con las obtenidas en la evaluación propia (método ASME) a las condiciones de diseño	127
6.4.2 Comparación de la eficiencia calculada a las condiciones de operación contra la eficiencia a las condiciones de diseño	128

<i>6.5 ANALISIS DE ENERGIA QUE SE PIERDE POR RADIACION Y CONVECCION ATRAVES DE LAS PAREDES, UTILIZANDO LA TERMOGRAFIA</i>	<i>128</i>
6.5.1 Valor de datos constantes	129
6.5.2 Desglose de pérdidas por imagen	129
6.5.3 Cálculo de pérdidas por radiación y convección utilizando los resultados de las termografías	129
<i>6.6 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR POR RADIACION Y CONVECCION MEDIANTE EL METODO GRAFICO</i>	<i>130</i>
6.6.1 Resultados de las pérdidas de calor por paredes por el método gráfico	130
<i>6.7 RECOMENDACIONES</i>	<i>133</i>
6.7.1 Medidas de ahorro de energía de nula o mínima inversión (acciones inmediatas o a corto plazo)	133
6.7.2 Medidas de ahorro de energía con inversión de capital (acciones a mediano o largo plazo)	134

CAPITULO VI ANALISIS DE UN CASO PRACTICO

El análisis del caso práctico, corresponde a la caldera CB-3 de la refinería "General Lázaro Cárdenas" de Minatitlán, Veracruz (figura 6.1).

Este equipo cumple con el servicio de generar vapor de alta presión para energía eléctrica y vapor de media que por extracción va a los cabezales para otros usos.

Primeramente, se realizó un balance energético a dicha caldera con los datos recopilados en campo. A partir del balance, se realizó el cálculo de la eficiencia de la caldera por el método directo y por el método de pérdidas (para el caso de diseño y para el caso de operación).

El método de pérdidas nos permite conocer la eficiencia del equipo restando a 100% el porcentaje de pérdidas encontradas por los conceptos mencionados en el capítulo 3 que incluye el porcentaje de pérdidas por convección y radiación.

Además se aplicaron al caso práctico los métodos mencionados en el capítulo 3 para determinar el porcentaje de pérdidas de calor (gráficas y termografía), con la finalidad de tener distintas referencias y poder comparar los resultados de los diferentes métodos para llegar a una mejor conclusión.

CALDERA DE TUBOS DE AGUA CB-3

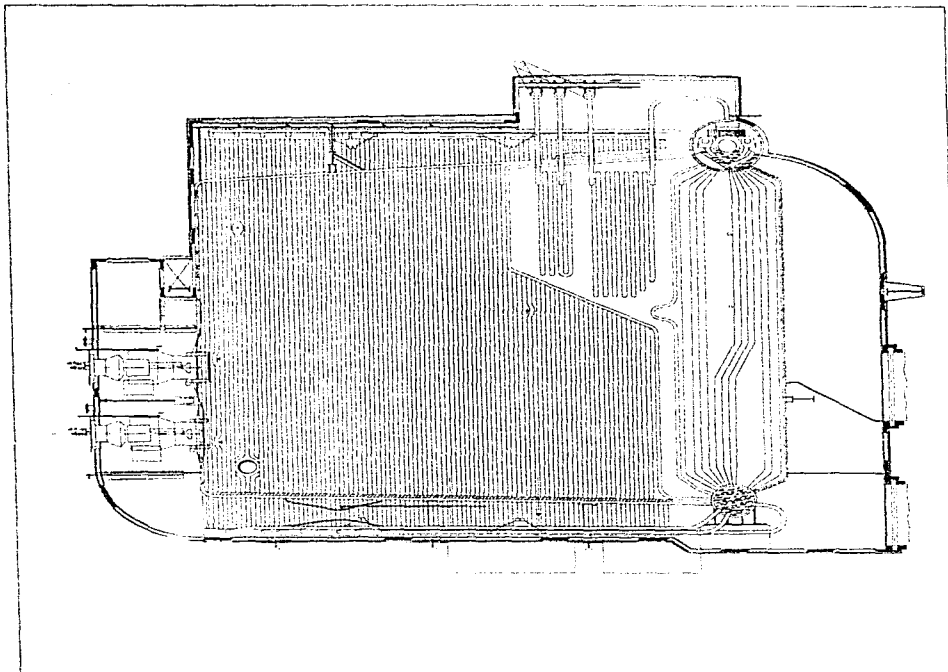


FIGURA 6.1

6.1 INFORMACION DE CAMPO

A continuación se presenta la información recopilada en campo, que se utilizó para la elaboración del balance energético y el cálculo de la eficiencia de la caldera.

6.1.1 Características de la caldera

Clave:

CB-3

Fabricante:

Babcock & Wilcox.

Tipo: Tubos de agua con dos domos y calentador de aire tipo regenerativo.

Capacidad (MCR)	55.55 kg/s	200,000 kg/h	440,000 lb/h
Presión del vapor	5940 kPa	60.5 kg/cm ²	860 psig
Temperatura del vapor	482°C	755°K	900 °F
Purgas	10%	10%	10%
Temperatura del agua de alimentación	104°C	377°K	220 °F
Combustibles	Combustóleo		Gas de refinería
Exceso de aire	5 %		5 %
Eficiencia (base PCS)	87.25 %		83.32 %

Referencia: B & W, MOC-12435

6.1.2 Características del combustible

Para su operación la caldera consume combustóleo y gas de refinería, cuyas características son las siguientes:

6.1.2.1 Combustóleo

Poder Calorífico Superior (PCS): 42.439 MJ/kg 10135.9 kcal/kg 18244.6 Btu/lb

Poder Calorífico Inferior (PCI): 40.191 MJ/kg 9599.1 kcal/kg 17278.3 Btu/lb

Densidad relativa: 0.982 kg/litro

Temperatura: 120 °C

Composición:

Componentes	% peso
Carbono	83.70
Hidrógeno	10.30
Oxígeno	0.30
Nitrógeno	0.60
Azufre	4.15
Agua	0.95

6.1.2.2 Gas de refinería

Poder Calorífico Superior (PCS): 59.958 MJ/m³, 14321 kcal/m³, 1609.1 Btu/ft³

Poder Calorífico Inferior (PCI): 54.845 MJ/m³, 13100 kcal/m³, 1472 Btu/ft³

Peso Molecular: 26.91

Densidad: 1.137 kg/m³

Temperatura: 28 °C

Composición:

Componentes	% mol
H ₂	28.0
CH ₄	19.60
C ₂ H ₆	11.0
C ₃ H ₈	31.90
nC ₄ H ₁₀	3.10
iC ₄ H ₁₀	3.50
H ₂ S	0.20
nC ₅ H ₁₂	1.00
iC ₅ H ₁₂	1.00
C ₆ H ₁₄	0.30
C ₄ H ₈	0.40

m³ a condiciones ISO, P= 101.3 kPa y T=15.5°C

6.1.3 Condiciones ambientales

Presión atmosférica	101 Pa	1 atm
Temperatura ambiente (operación)	23 °C	296 K
Humedad relativa	75 %	75 %

6.1.4 Comportamiento esperado a las condiciones de diseño (información de fabricante)

Presión del vapor	5,964 kPa			
Temperatura del vapor	482 °C			
Temperatura del agua de alimentación	104 °C			
Purgas	10 %			
Temperatura del aire	52 °C			
Combustible	COMBUSTOLEO		GAS DE REFINERÍA	
Flujo de vapor (t/h)	205	121	206	122
% Carga	100	60	100	60
Exceso de aire	5%	5%	5%	5%
Temperatura de gases de combustión	186°C	166°C	180°C	148°C
Flujo de gases	59.26 m ³ /s	34.74 m ³ /s	59.71 m ³ /s	34.68 m ³ /s
Flujo del aire	55.40 m ³ /s	32.47 m ³ /s	55.04 m ³ /s	31.96 m ³ /s
Flujo de combustible	4.76 kg/s	2.79 kg/s	3.38 m ³ /s	1.96 m ³ /s
Eficiencia (base PCS)	87.25%	88.14%	83.32%	84.23%

6.1.5 Condiciones de operación

% Carga	88	
Presión del vapor	5985 kPa	
Temperatura del vapor	480 °C	
Temperatura del agua de alimentación	105 °C	
Temperatura del aire	52 °C	
Purgas	8 %	
Combustible	COMBUSTOLEO	GAS DE REFINERÍA
Exceso de aire	15%	15%
Temperatura de gases de combustión a la salida del precalentador	183°C	183°C
Flujo de vapor (t/h)	140.8	35.2
Flujo de combustible	2.94 kg/s	0.71 m ³ /s
Flujo de gases (*)	39.92 m ³ /s	14.13 m ³ /s
Flujo de aire (*)	37.56 m ³ /s	12.64 m ³ /s

(*) Valores calculados

6.2 DIAGNOSTICO ENERGETICO

Los resultados del balance de materia y energía utilizados para el cálculo de la eficiencia de la caldera CB-3, con base en la información recopilada en campo de las condiciones de operación y las características de diseño, son los siguientes:

6.2.1 Balance de materia y energía

En la figura 6.2, se ilustran esquemáticamente las corrientes más importantes que fluyen hacia y desde la caldera CB-3.

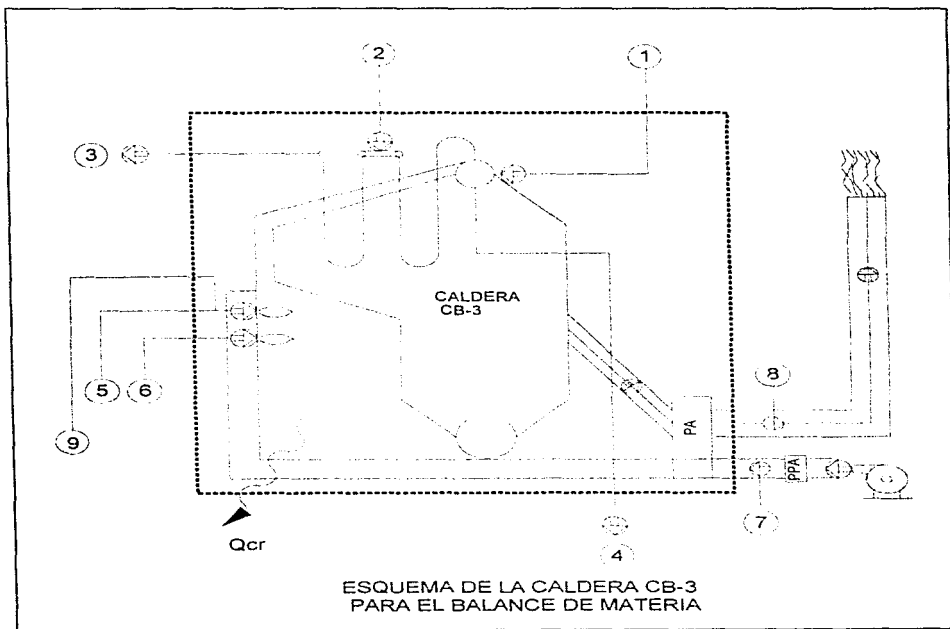


FIGURA 6.2

Balance de materia:

Lado del agua y vapor: $W_1 + W_2 = W_3 + W_4$

Lado de gases: $W_5 + W_6 + W_7 + W_9 = W_8 + W_9$

El flujo de cada una de las corrientes en el caso de operación se detalla a continuación:

SIMBOLO	No. DE CORRIENTE	DESCRIPCION	FLUJO (lb/h)	FLUJO (kg/s)
Lado del agua				
W_1	1	Agua de alimentación que entra	386,501.22	48.69
W_2	2	Agua de atemperación que entra	33,577.74	4.23
W_3	3	Vapor generado	388,962.00	49.00
W_4	4	Purga que sale	31,116.96	3.92
Lado de gases				
W_5	5	Combustóleo que entra	23,337.72	2.94
W_6	6	Gas de refinería que entra	5,635.98	0.71
W_7	7	Aire para combustión que entra	384,913.62	48.49
W_8	8	Gases de combustión que salen	413,887.32	52.14
W_9	9	Vapor de atomización	6,985.44	0.88

Balance de energía:

$$Q_S = Q_A + Q_P$$

$$Q_{icl} + Q_{iclg} + Q_{sc} + Q_{sa} + Q_{svat} + Q_{SH2Oaire} = Q_{av} + Q_{ap} + Q_{pgs} + Q_{pH2O} + Q_{pvat} + Q_{per} + Q_{pinq}$$

Utilizando la metodología propuesta por ASME en "Steam Generating Units" PTC-4.1, el balance de energía se desarrolla considerando la figura 6.2, de la siguiente manera :

Calor que entra

CONCEPTO	SIMBOLO	keal/h	kW	%
Calor liberado por el combustible líquido	Q_{icl}	107.377×10^6	124.856.9	73.28
Calor liberado por el combustible gas	Q_{icg}	36.494×10^6	42.434.9	24.91
Calor sensible del combustible	Q_{sc}	502.481×10^3	584.3	0.34
Calor sensible del aire	Q_{sa}	1.661×10^6	1,931.4	1.13
Calor suministrado con el vap. de atomización	Q_{svat}	451.960×10^3	525.5	0.31
Calor que entra con el vapor contenido en el aire	$Q_{SH2Oaire}$	42.635×10^3	49.6	0.03
Calor total suministrado	Q_S	146.529×10^6	170.382.6	100.00

Calor que sale

CONCEPTO	SIMBOLO	keal/h	kW	%
Calor absorbido				
Calor absorbido por el vapor	Q_{av}	123.679×10^6	143.812.8	84.40
Calor absorbido por la purga	Q_{ap}	2.642×10^6	3,072.1	1.80
Calor perdido				
Calor perdido por gases secos	Q_{pgs}	8.428×10^6	9,800.0	5.75
Calor perdido por la humedad en el combustible	Q_{pH2Ocs}	64.197×10^3	74.6	0.04
Calor perdido por la humedad formada por el hidrogeno en el combustible	Q_{pH2Ocs}	9.933×10^6	11,550.0	6.78
Calor perdido por la humedad en el aire	Q_{pH2Oa}	163.907×10^3	190.6	0.11
Calor perdido por el vapor de atomización	Q_{pvat}	169.584×10^3	197.2	0.12
Calor perdido por convección y radiación	Q_{per}	1.122×10^6	1,304.6	0.77
Calor perdido por CO	Q_{pco}	171.194×10^3	199.1	0.12
Calor total que sale de la caldera	$Q_{total\ Sale}$	146.375×10^6	170.203.0	99.89
Diferencia		154.649×10^3	179.6	0.11

6.3 RESULTADOS DEL CALCULO DE LA EFICIENCIA

Se presentan en las siguientes tablas los resultados del cálculo de la eficiencia para las condiciones de operación, utilizando la metodología propuesta por ASME utilizando el método simplificado tanto por el método directo como por el método indirecto.

La metodología propuesta por ASME toma en cuenta, para el cálculo de la eficiencia térmica, todos los términos indicados en el balance de energía del punto anterior.

Sin embargo, algunos términos inciden en forma mínima en el resultado del cálculo de la eficiencia, es por esto que en la práctica se simplifica el cálculo despreciando la entrada y salida de éstos términos (este método se conoce como simplificado).

6.3.1 Método directo

CONCEPTO	SIMBOLO	kcal/h	kW
Calor absorbido	Q_a	126.322×10^6	146,886.05
Calor total suministrado	Q_s	146.529×10^6	170,383.36
Calor liberado por el combustible	Q_{lc}	143.871×10^6	167,292.00
Calor suministrado por otros	Q_{SO}	2.658×10^6	3,091.35
Eficiencia	η_{ASME}	86.21 %	86.21 %
Eficiencia	$\eta_{\text{método simplificado}}$	87.80 %	87.80 %

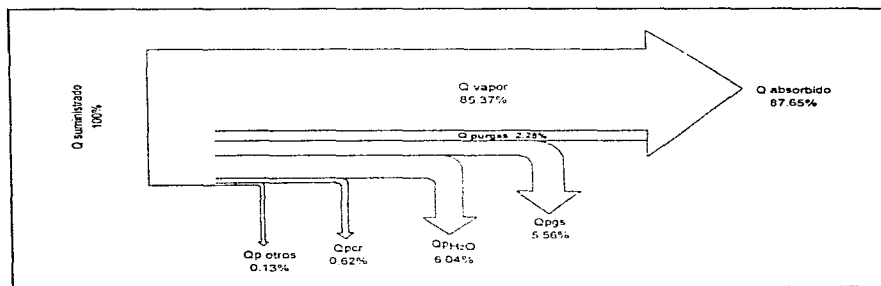
6.3.2 Método indirecto

CONCEPTO	SIMBOLO	kcal/h	kW
Calor perdido	Q_p	20.053×10^6	23,317.44
Calor total suministrado	Q_s	146.529×10^6	170,383.35
Calor liberado por el combustible	Q_{lc}	143.871×10^6	167,292.00
Calor suministrado por otros	Q_{SO}	2.658×10^6	3,091.35
Eficiencia por método ASME	η_{ASME}	86.31 %	86.31 %
Eficiencia por método simplificado	$\eta_{\text{método simplificado}}$	86.46 %	86.46 %

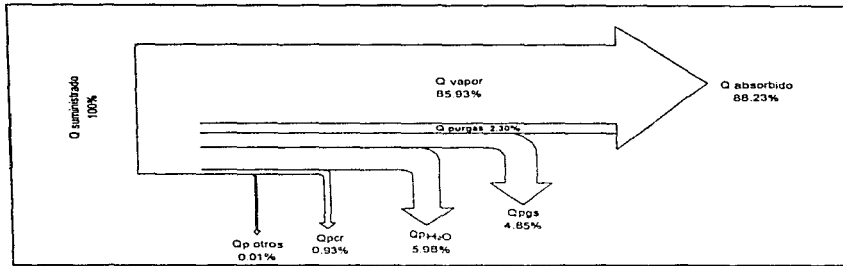
6.4 RESULTADOS DEL DIAGNOSTICO ENERGETICO, A LAS CONDICIONES DE OPERACION Y SU COMPARACION CON LAS CONDICIONES DE DISEÑO

Se aplicó la metodología desarrollada a los datos de diseño reportados por el fabricante en sus tablas de comportamiento de la caldera, obteniendo la eficiencia térmica que se indica en la tabla 6.4.1, que como se puede observar es muy cercana al valor indicado por el fabricante, encontrándose una mayor diferencia (1.67%) para el caso de operación con gas (lo cual puede ser porque existan diferencias en las características del combustible utilizado, PCS y composición).

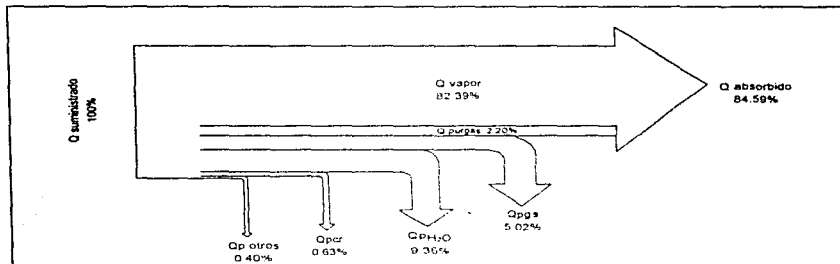
A continuación, se representan en los diagramas de Sankey (1, 2, 3 y 4) los balances energéticos a las condiciones de diseño. Los diagramas Sankey, representan los porcentajes de calor absorbido por el vapor, las pérdidas por gases secos, pérdidas por humedad, y pérdidas por convección y radiación. La diferencia entre el calor suministrado y las anteriores pérdidas, corresponde al calor perdido por otros, donde parte de este porcentaje puede corresponder a otras pérdidas por radiación y convección (porcentaje correspondiente al calculado aplicando la termografía).



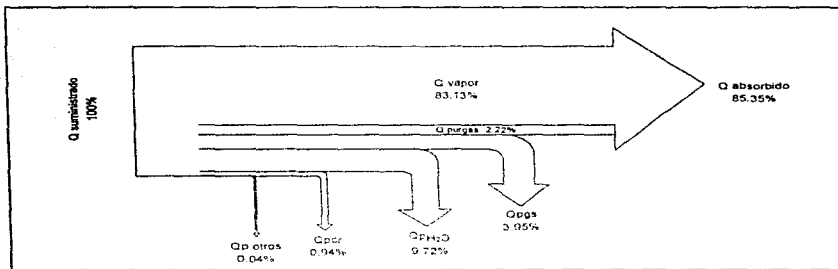
SANKEY 1
COMBUSTOLEO 100%



SANKEY 2
COMBUSTOLEO 60%



SANKEY 3
GAS DE REFINERIA 100%



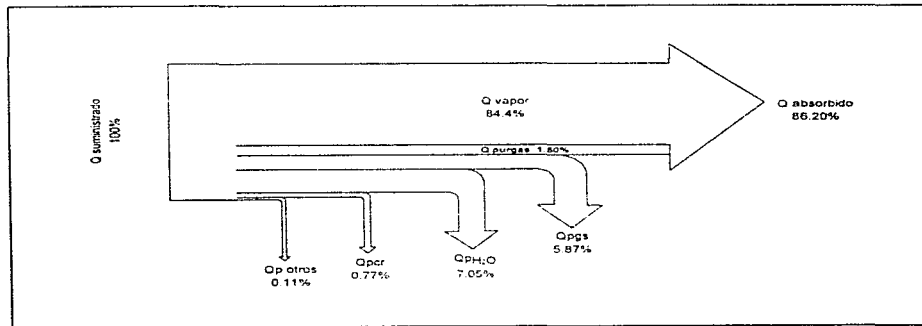
SANKEY 4
GAS DE REFINERIA 60%

6.4.1 Comparación de las eficiencias reportadas por el fabricante con las obtenidas en la evaluación propia (método ASME) a las condiciones de diseño

Combustible	Combustóleo		Gas residual	
	60%	100%	60%	100%
Carga	60%	100%	60%	100%
η por fabricante	88.14%	87.25%	84.23%	83.32%
η por M.D	88.23%	87.65%	85.36%	84.59%
η por M.I	88.24%	87.78%	85.40%	84.99%

En la tabla 6.4.2 se comparan los valores de eficiencia térmica calculados para el caso de operación contra los valores de eficiencia térmica de diseño (87.65%), correspondientes a una carga del 100% y operación con combustóleo, ya que para el caso de estudio, se tiene una operación de la caldera a una carga del 88% y se utiliza un 80% de combustóleo y un 20% de gas de refinería.

En el diagrama de Sankey 5, se representa el balance de energía de la caldera CB-3 a las condiciones de operación.



SANKEY 5
CONDICIONES DE OPERACION

6.4.2 Comparación de la eficiencia calculada a las condiciones de operación contra la eficiencia a las condiciones de diseño

CONDICIONES	DISEÑO	OPERACIÓN
Método directo	87.65%	86.21%
Método indirecto	87.78%	86.31%

De lo anterior podemos decir que la eficiencia a las condiciones de operación corresponde a una eficiencia típica de calderas de capacidad similar con sistema de precalentamiento de aire. la diferencia con la eficiencia a condiciones de diseño se debe a que la primera está basada en los coeficientes de ensuciamiento actuales. mientras que la segunda representa la condición de superficie limpia. A pesar de esto, al final del capítulo se darán las recomendaciones necesarias para mejorar la eficiencia de la caldera.

6.5 ANALISIS DE ENERGIA QUE SE PIERDE POR RADIACION Y CONVECCION ATRAVES DE LAS PAREDES, UTILIZANDO LA TERMOGRAFIA

Para poder cuantificar en forma aproximada la emisión de energía de un área determinada se utiliza la ecuación:

$$Q = \sum 1.163 * C * A_i * \alpha_{TAi} * (t_i - t_a)$$

donde $\alpha_{TAi} = \alpha_{CAi} + \alpha_{RAi}$ es el coeficiente global de transmisión de calor del área A_i

Este análisis es aplicado a los objetivos que son representativos de las condiciones promedio que se observaron durante la inspección.

Es importante considerar que el área total para el cálculo es aproximada de acuerdo a las partes seleccionadas en cada imagen termográfica y la temperatura que se toma es el promedio de todas las temperaturas observadas en cada área seleccionada.

Por lo tanto los resultados son únicamente aproximaciones y no resultados definitivos.

6.5.1 Valor de datos constantes

Emitancia	0.9
Temperatura ambiente	23 °C
Coefficiente de mayoración	1.05
Area total de paredes	623.6 m ²
Area total de techo	138 m ²
Area total de piso	138 m ²
Temperatura promedio del techo	70 °C
Temperatura promedio del piso	50 °C
Temperatura promedio de paredes	60 °C
Area total considerada como una excepción por el calor radiante	60.7 m ²
Temperatura promedio del área considerada como excepción por el calor radiante	85.87 °C

6.5.2 Desglose de pérdidas por imagen

IMAGEN	ÁREA (m ²)	TEMPERATURA (°C)	α_{CAi}	α_{RAi}	α_{TAi}	ENERGIA (kcal/h)	ENERGIA (W)
RGLC 01	0.28	118	6.87	7.38	14.25	398.00	462.88
RGLC 02	1.11	116.5	6.84	7.33	14.17	1544.17	1795.86
RGLC 03	1.19	103.4	6.59	6.89	13.48	1354.20	1574.92
RGLC 04	2.47	135.0	7.16	7.99	15.15	4400.70	5117.96
RGLC 05	0.42	143.4	7.29	8.31	15.6	828.30	963.32
RGLC 06	4.65	74.3	5.89	5.99	11.88	2975.60	3460.63
RGLC 07	3.06	177.2	7.75	9.68	17.43	8635.60	10043.20
RGLC 08	3.02	191.1	7.92	10.29	18.21	9706.80	11288.95
RGLC 09	13.78	102.2	6.56	6.85	13.41	15367.20	17871.96
RGLC 10	10.13	94.1	6.39	6.59	12.98	9816.20	11416.23

6.5.3 Cálculo de pérdidas por radiación y convección utilizando los resultados de las termografías

Sumando la energía representada en cada imagen, resulta un total de 55,026.59 kcal/h = 63.99 kW, lo cual representa un 0.036% de pérdidas en las excepciones captadas por las termografías.

Considerando que no todas las imágenes fueron grabadas y que en la inspección termográfica de toda la caldera se observó que la mayoría de las mirillas y/o entradas hombre presentaban el mismo problema, así como las vigas, se calcula a continuación la energía perdida por estas áreas.

Existen aproximadamente 15 mirillas y/o entradas hombre, por lo que tenemos un área total de 3.75 m^2 a una temperatura promedio de 85°C . lo que indica una pérdida por radiación y convección de $3.046.68 \text{ kcal/h} = 3.543 \text{ kW}$.

De igual manera para las vigas (empalmes) se tiene un área total de 9.87 m^2 a una temperatura promedio de 100°C . de lo que resultan $42.453.04 \text{ kcal/h} = 49.37 \text{ kW}$ perdidos por radiación y convección.

La suma de ambas pérdidas es igual a $45.499.72 \text{ kcal/h} = 52.92\text{kW}$, lo que representa un 0.03%

En total, se tiene una pérdida de 0.066% por radiación y convección en las áreas consideradas como excepciones, además de las pérdidas mencionadas en el balance.

6.6 CALCULO DE PERDIDAS DE CALOR POR RADIACION Y CONVECCION MEDIANTE EL METODO GRAFICO

En la figura 6.3. se muestra el gráfico que permite el cálculo de las pérdidas de calor por las paredes (convección y radiación) en función de la capacidad del generador y de la carga a la que trabaja.

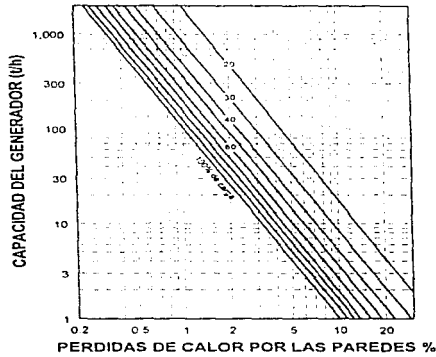
La gráfica 6.4 permite el cálculo de las pérdidas por radiación y convección en función de los millones de BTU's/h netos que salen de la caldera (ASME). Estas pérdidas son obtenidas para un diferencial de 50°F entre las temperaturas de superficie y ambiental, para una velocidad del viento de 100 pies/min sobre la superficie. Las condiciones presentes en Minatitlán en el día de la inspección, están a una diferencia de temperatura de 67°F y una velocidad de 5 pies/s. Para corregir los porcentajes obtenidos se utiliza la gráfica 6.5.

A una diferencia de 50°F y 100 pies/min se obtiene una transmisión de $125 \text{ BTU}/\text{ft}^2/\text{hr}$, y para una diferencia de 67°F y 5 pies/seg setiene una transmisión de $237 \text{ BTU}/\text{ft}^2/\text{hr}$; por lo que el factor de corrección se calcula como: $237/125 = 1.89$

6.6.1 Resultados de las pérdidas de calor por paredes por el método gráfico

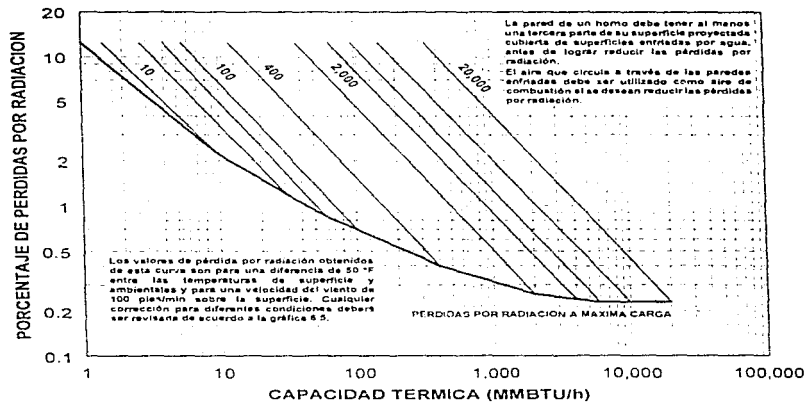
CARGA	% Q_{net} (ASME)	% Q_{net} (ASME corregido)	% Q_{net} (alemán)
100 %	0.37	0.69	0.7
60 %	0.54	1.02	1.05
88% (operación)	0.44	0.83	0.85

VALORES GUIA
DE LAS PERDIDAS DE CALOR POR LAS PAREDES
DE LOS GENERADORES DE VAPOR



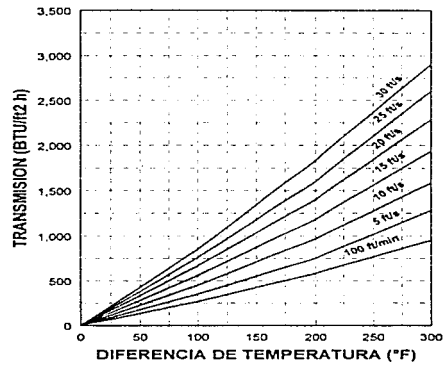
Gráfica 6.3

GRAFICA DE PERDIDAS POR RADIACION
ADAPTADA DE LA ABMA



Gráfica 6.4

TRANSMISION DE SUPERFICIE
PARA VARIAS VELOCIDADES DE AIRE



Gráfica 6.5

6.7 RECOMENDACIONES

Con base en la inspección física de la caldera CB-3 y al análisis energético de la misma se dan las siguientes recomendaciones tendientes a reducir las pérdidas energéticas, agrupadas en función de tiempo de ejecución y de la inversión necesaria para su aplicación.

6.7.1 Medidas de ahorro de energía de nula o mínima inversión (acciones inmediatas o a corto plazo)

Las medidas contempladas dentro de esta clasificación, se refieren a aquellas medidas de ahorro de energía que son posibles de detectar a través de la inspección visual del equipo y del análisis de registros de operación y mantenimiento rutinarios, y que implican modificaciones operacionales y/o mantenimiento con inversiones muy bajas o nulas.

Dentro de este grupo, se recomiendan las siguientes:

1. Reparar zonas sin aislamiento de las paredes de la caldera.
2. Colocar refractario y aislamiento en las puertas de explosión que carecen de él o que se encuentre en mal estado.
3. Reparar las zonas dañadas del refractario de las paredes para eliminar áreas y puntos calientes.
4. Revisar instrumentación en general (principalmente medidores de flujo, temperatura, presión, etc).
5. Ajustar el exceso de aire a 5%, que corresponde al de diseño (actual 15%).
6. Analizar las pérdidas de energía debido al trabajo en exceso del ventilador de tiro forzado, por el exceso de fugas de aire en el precalentador (Ljungstrom).
7. Controlar las fugas de aire en el precalentador (revisión de sellos).

6.7.2 Medidas de ahorro de energía con inversión de capital (acciones a mediano o largo plazo)

Las medidas de ahorro de energía contempladas dentro de esta clasificación son aquellas que requieren de un análisis técnico-económico para su implantación. En el caso de estudio, las siguientes medidas de ahorro de energía con inversión de capital fueron definidas con base en el diagnóstico energético de la caldera y en las desviaciones energéticas detectadas con respecto a las condiciones de diseño que ya han sido explicadas. En el siguiente capítulo se presenta el análisis de factibilidad técnico-económico correspondiente (donde se detalla el beneficio que aporta el aplicar las medidas con inversión).

1. Instalación de analizadores continuos de oxígeno y CO para reducir el exceso de aire de 15 a 5%.
2. Sustitución del sistema de precalentamiento.¹

¹ La sustitución del sistema de precalentamiento se propone ya que en este balance se realizó una corrección de la temperatura de gases de 144°C a 183°C para el cierre de esté; con la temperatura original se hizo el cálculo de fugas en el precalentador lo cual se explica detalladamente en el anexo 2.

CAPITULO VII

ANALISIS TECNICO-ECONOMICO DE FACTIBILIDAD

<i>7.1 PARAMETROS CONSIDERADOS EN EL ASPECTO ECONOMICO</i>	<i>135</i>
7.1.1 Estimado de inversión	135
7.1.2 Costos de operación	135
7.1.3 Costo de mantenimiento	135
7.1.4 Ingresos	136
7.1.5 Horizonte de análisis	136
7.1.6 Relación Beneficio/Costo	136
7.1.7 Valor Presente (VP)	136
7.1.8 Tasa Interna de Retorno (TIR)	136
7.1.9 Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)	137
7.1.10 Porcentaje Anual de recuperación de la Inversión o Retorno de la Inversión (ROI)	137

<i>7.2 MEDIDA 1: INSTALACION DE UN ANALIZADOR CONTINUO DE OXIGENO Y UN ANALIZADOR DE CO (PARA LA REDUCCION DEL EXCESO DE AIRE DE OPERACION A 5%)</i>	<i>138</i>
7.2.1 Antecedentes	138
7.2.2 Beneficios	139
7.2.3 Evaluación Económica de la medida 1	141
7.2.3.1 Estado Proforma de Costos Anuales (US DLS)	141
7.2.3.2 Estado Proforma de Resultados (US DLS)	141
7.2.3.3 Estado Proforma de Flujos de Efectivo (US DLS)	142
7.2.4 Análisis económico de resultados de la medida 1	143

<i>7.3 MEDIDA 2: SUSTITUCION DEL TIPO DE PRECALENTADOR DE AIRE</i>	<i>144</i>
7.3.1 Antecedentes	144
7.3.2 Beneficios	144
7.3.3 Evaluación Económica de la medida 2	145
7.3.3.1 Estado Proforma de Costos Anuales (US. DLS)	145
7.3.3.2 Estado Proforma de Resultados (US DLS)	145
7.3.3.3 Estado Proforma de Flujos de Efectivo (US DLS)	146
7.3.4 Análisis de resultados de la medida 2	147

CAPITULO VII

ANALISIS TECNICO-ECONOMICO DE FACTIBILIDAD

El objetivo de este capítulo, es presentar los resultados del estudio de factibilidad técnico-económico de las medidas con inversión de capital.

7.1 PARAMETROS CONSIDERADOS EN EL ASPECTO ECONOMICO

7.1.1 Estimado de inversión

El estimado de inversión está integrado por lo siguiente:

- **Costo de Equipo.**- se estima con base en el predimensionamiento del equipo con correlaciones y estadísticas actualizadas de costeo, o por cotización directa a distribuidores.
- **Costo de materiales.**- considera el costo de todo tipo de materiales que se requieran (tubería, instrumentos, civil, eléctrico, etc).
- **Costo de ingeniería.**- se calcula con base en las horas-hombre necesarias para la realización de la modificación.
- **Costo de construcción.**- incluye la instalación del equipo y materiales necesarios.

7.1.2 Costos de operación

Los costos de operación incluyen los costos de los servicios auxiliares, los gastos financieros (en alternativas con inversiones altas), y depreciación en los que se incurre por realizar la modificación.

7.1.3 Costo de mantenimiento

Son los costos anuales de servicio del nuevo equipo.

7.1.4 Ingresos

Los ingresos provienen del ahorro energético particular de cada medida, considerando los siguientes precios de energía:

FORMA DE ENERGIA	PRECIO INTERNACIONAL
Energía eléctrica	30.375 Dls/MWh
Combustóleo	2.22 Dls/MMBTU
Gas de refinería	2.40 Dls/MMBTU

7.1.5 Horizonte de análisis

El horizonte de análisis considerado para la realización del estudio económico fue de 15 años.

7.1.6 Relación Beneficio/Costo

Para este estudio se define la relación beneficio/costo como el valor presente del flujo de efectivo acumulado en el periodo comprendido por el horizonte de análisis entre el valor presente de los costos.

7.1.7 Valor Presente (VP)

El método del valor presente consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial.

La expresión que define el VP es:

$$VP = -Inv. Inicial + \sum_{t=1}^n \text{Flujo de efectivo}/(1+i)^t$$

7.1.8 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este método calcula la tasa de recuperación que genera el proyecto de inversión.

La tasa que genera el proyecto es la tasa de interés para la cual el total de beneficios descontados es exactamente igual a los costos totales descontados o dicho de otra manera, la tasa con la que la relación beneficio-costo es igual a uno.

La tasa de recuperación generalmente se calcula por medio de un proceso de aproximaciones sucesivas (iterativo), en donde el flujo total de dinero se calcula para varias tasas de descuento hasta que su valor se reduce a cero.

7.1.9 Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

El periodo de recuperación de la inversión, es el tiempo para reducir la inversión a un valor de cero, tomando en cuenta los ingresos de los flujos de efectivo que genera.

7.1.10 Porcentaje Anual de recuperación de la Inversión o Retorno de la Inversión (ROI)

Se define como la ganancia anual promedio entre la inversión total por cien.

7.2 MEDIDA 1: INSTALACION DE UN ANALIZADOR CONTINUO DE OXIGENO Y UN ANALIZADOR DE CO (PARA LA REDUCCION DEL EXCESO DE AIRE DE OPERACION A 5%)

7.2.1 Antecedentes

Una de las medidas más importantes para el ahorro de energía en equipos de combustión, es la reducción del exceso de aire utilizado para realizar una combustión apropiada, dando como resultado un incremento en la eficiencia térmica, además de una reducción en la cantidad de emisiones contaminantes (NO_x , SO_x , CO , CO_2).

En el caso de estudio, la caldera está operando con un exceso de aire de 15%, siendo posible operar con 5% (de acuerdo al fabricante). Un exceso de aire elevado, provoca una reducción de la temperatura de flama, dando como resultado una menor eficiencia en la transferencia de calor. Por otra parte, la reducción del exceso de aire de operación disminuye las pérdidas de energía por gases calientes arrojados a la atmósfera, por esta razón instalar un analizador continuo de oxígeno permite un monitoreo más adecuado del

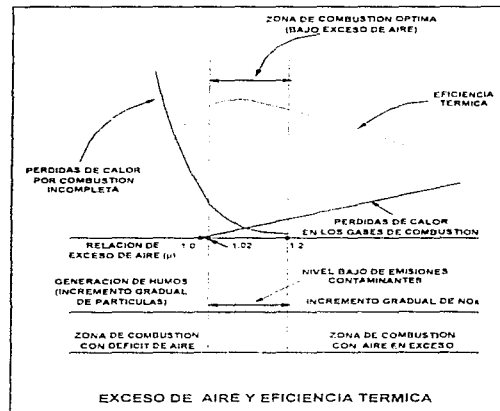


FIGURA 7.1.- Variación de la eficiencia con respecto al exceso de aire

exceso de aire y disminuye su ajuste a lapsos de tiempo más cortos que cuando se depende totalmente de los análisis de laboratorio. Asimismo, un analizador de CO permite conjuntamente con el analizador de oxígeno, mantener una combustión apropiada ya que si se reduce demasiado el exceso de aire, se podrían presentar pérdidas de energía por combustible no quemado debido a una combustión incompleta, presentándose además riesgos en la operación. Estos aspectos del control de la combustión se ejemplifican en la figura 7.1.

7.2.2 Beneficios

En el siguiente cuadro se presenta la variación de la temperatura y las pérdidas de energía por gases calientes arrojados a la atmósfera cuando se reduce el exceso de aire. Lo anterior permite como consecuencia un incremento en la eficiencia térmica y, por lo tanto, un ahorro de combustible con respecto a la operación actual.

Exceso de aire (%)	T(°C)	Q _g (%)	Q _{re} (%)	η (%)
15	183	13.2	0.7	86.1
5	175	11.9	0.7	87.4

El calor perdido en los gases de combustión al variar el exceso de aire y la temperatura, se obtuvo a partir de la siguiente gráfica 7.2 (tomada de la NOM 002-ENER-1995).

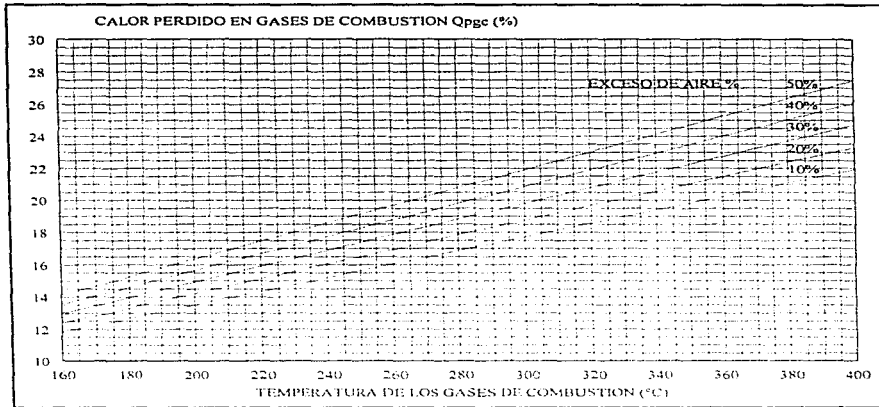
La eficiencia se evalúa con: $\eta = 100 - \%Q_g - \%Q_{re}$.

Una vez conocidas las eficiencias evaluadas a los diferentes excesos de aire se aplica la siguiente relación para calcular el ahorro de energía que se obtiene de aplicar la medida 1.

$$AE = \frac{\eta_5 - \eta_{15}}{\eta_{15}} \times 100$$

El resultado de la relación de ahorro de energía es 1.51 y se multiplica por el calor liberado por el combustible ($Q_l = 169.551 \times 10^9$ kcal/h), para obtener el ahorro total que se tendría en el combustible al disminuir el exceso de aire a 5%.

Para este caso, se considera una base de 8000 h/año, la cual permite un ahorro total de 180,277 Dls/año. Al tomar el precio del combustóleo de 2.22 Dls/MMBTU.



GRAFICA 7.2.- Calor perdido en los gases de combustión (BASE PCS) en calderas que utilizan combustóleo, gasóleo o diesel.

7.2.3 Evaluación Económica de la medida 1

Medida 1: Evaluación de la instalación de un analizador de O₂ y un analizador de CO

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (Dls)	Total Instalado (Dls)
Instalación de un analizador continuo de O ₂ (con celda de óxido de Circonio)	1 Jgo	27,246.00	27,246.00
Instalación de un analizador de CO (Infrarrojo no dispersivo)	1 Jgo	80,250.00	80,250.00
Ingeniería adicional	180 H-H	25.00	4,500.00
Total			111,996.00

7.2.3.1 Estado Proforma de Costos Anuales (US. DLS)

Descripción	Año 1	Año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7
Mantenimiento	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
Suministro de operación	540	540	540	540	540	540	540
Depreciación	11,200	11,200	11,200	11,200	11,200	11,200	11,200
Total de costos anuales	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815

Descripción	Año 8	Año 9	año 10	año 11	año 12	año 13	año 14	año 15
Mantenimiento	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075	1,075
Suministro de operación	540	540	540	540	540	540	540	540
Depreciación	11,200	11,200	11,200					
Total de costos anuales	12,815	12,815	12,815	1,615	1,615	1,615	1,615	1,615

7.2.3.2 Estado Proforma de Resultados (US DLS)

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
Ahorro Neto	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277
Costo Total	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815	12,815
Utilidad Neta	167,462	167,462	167,462	167,462	167,462	167,462	167,462

Descripción	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Ahorro Neto	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277	180,277
Costo Total	12,815	12,815	12,815	1,615	1,615	1,615	1,615	1,615
Utilidad Neta	167,462	167,462	167,462	178,662	178,662	178,662	178,662	178,662

7.2.3.3 Estado Proforma de Flujos de Efectivo (US DLS)

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Inversión Fija	(111,996)				
Capital de Trabajo		0	0	0	0
Utilidad Neta		167,462	167,462	167,462	167,462
Depreciación		11,200	11,200	11,200	11,200
Flujo de Efectivo	(111,996)	178,662	178,662	178,662	178,662
Flujo de Efectivo acumulado	(111,996)	66,666	245,328	423,990	602,652
Flujo de Efectivo Descontado	(111,996)	159,520	142,428	127,168	113,543
Flujo de efectivo acumulado descontado	(111,996)	47,524	189,952	317,120	430,663

Descripción	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Inversión Fija					
Capital de Trabajo	0	0	0	0	0
Utilidad Neta	167,462	167,462	167,462	167,462	167,462
Depreciación	11,200	11,200	11,200	11,200	11,200
Flujo de Efectivo	178,662	178,662	178,662	178,662	178,662
Flujo de Efectivo acumulado	781,314	959,976	1,138,638	1,317,300	1,495,962
Flujo de Efectivo Descontado	101,378	90,516	80,818	72,159	64,427
Flujo de efectivo acumulado descontado	532,041	622,557	703,375	775,534	839,961

Descripción	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Inversión Fija						
Capital de Trabajo	0	0	0	0	0	0
Utilidad Neta	167,462	178,662	178,662	178,662	178,662	178,662
Depreciación	11,200					
Flujo de Efectivo	178,662	178,662	178,662	178,662	178,662	178,662
Flujo de Efectivo acumulado	1,674,624	1,853,286	2,031,948	2,210,610	2,389,972	2,567,934
Flujo de Efectivo Descontado	57,524	51,361	45,858	40,945	36,558	32,641
Flujo de efectivo acumulado descontado	897,485	948,846	994,704	1,035,649	1,072,207	1,104,847

7.2.4 Análisis económico de resultados de la medida 1

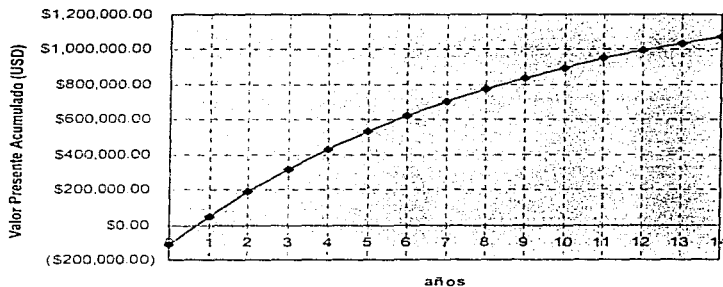
a) PARAMETROS BASICOS

• Inversión	111,996	USD
• Horizonte	15	años
• Ahorro neto anual	178,662	USD
• Tasa de descuento	12	%

b) RESULTADOS PRINCIPALES

• Valor Presente Proyecto	1,104,847	USD
• BENEFICIO/COSTO	9.87	
• TIR	159.52	%
• ROI	72.43	%
• PRI	8.5	meses

Valor presente acumulado vs tiempo



7.3 MEDIDA 2: SUSTITUCION DEL TIPO DE PRECALENTADOR DE AIRE

7.3.1 Antecedentes

En las recomendaciones se propone la sustitución del tipo de precalentador de aire.

En el análisis realizado (anexo 2) se encontró que las fugas de aire que se tienen en el precalentador Ljungstrom, son del orden del 45% del aire práctico para el caso de operación actual. Estas fugas ocasionan que el ventilador de tiro forzado tenga que desarrollar una potencia en exceso de 273.5 kW, que a un costo de la energía eléctrica de 30.375 Dls/MW-h y considerando 8,000 horas de operación anual, equivalen a **66,451 Dls/año**.

Este ahorro potencial representa un 21% del costo de un precalentador de aire de tipo tubos térmicos, lo que quiere decir que en cinco años se recuperaría la inversión por el cambio del tipo de precalentador de aire.

7.3.2 Beneficios

En el punto 7.3.3. se presenta el análisis económico para la sustitución del tipo de precalentador de aire, tomando únicamente como ahorros los correspondientes por evitar las fugas de aire (66,451 USD/año), sin embargo existen otros beneficios adicionales que se tendrían al cambiar el precalentador de aire y que se mencionan a continuación:

- Evitar las fugas de aire, lo que implica que el ventilador de tiro forzado trabaje solo con la potencia requerida (ahorro en energía eléctrica).
- Con el precalentador de aire de tubos térmicos se evitaría el uso del motor que permite el movimiento del precalentador Ljungstrom, lo cual representaría un ahorro de energía eléctrica.
- El precalentador Ljungstrom presenta problemas de corrosión. (material)
- El precalentador de tubos térmicos es más compacto.

7.3.3 Evaluación Económica de la medida 2

Medida 2: Sustitución del tipo de precalentador de aire

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (Dls)	Total Instalado (Dls)
Precalentador de aire del tipo "Tubos Térmicos", de una carga térmica de 14MW	1 Pza	305,000	305,000

7.3.3.1 Estado Proforma de Costos Anuales (US DLS)

Descripción	Año 1	Año 2	año 3	año 4	año 5	año 6	año 7
Mantenimiento	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575
Suministro de operación	762	762	762	762	762	762	762
Depreciación	30,500	30,500	30,500	30,500	30,500	30,500	30,500
Total de costos anuales	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837

Descripción	Año 8	Año 9	año 10	año 11	año 12	año 13	año 14	año 15
Mantenimiento	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575
Suministro de operación	762	762	762	762	762	762	762	762
Depreciación	30,500	30,500	30,500					
Total de costos anuales	35,837	35,837	35,837	5,337	5,337	5,337	5,337	5,337

7.3.3.2 Estado Proforma de Resultados (US DLS)

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
Ahorro Neto	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451
Costo Total	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837	35,837
Utilidad Neta	30,614	30,614	30,614	30,614	30,614	30,614	30,614

Descripción	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Ahorro Neto	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451	66,451
Costo Total	35,837	35,837	35,837	5,337	5,337	5,337	5,337	5,337
Utilidad Neta	30,614	30,614	30,614	61,114	61,114	61,114	61,114	61,114

7.3.3.3 Estado Proforma de Flujos de Efectivo (US DLS)

Descripción	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4
Inversión Fija	(305.000)				
Capital de Trabajo		0	0	0	0
Utilidad Neta		30,614	30,614	30,614	30,614
Depreciación		30,500	30,500	30,500	30,500
Flujo de Efectivo	(305.000)	61,114	61,114	61,114	61,114
Flujo de Efectivo acumulado	(305.000)	243.886	182.772	121.658	60,544
Flujo de Efectivo Descontado	(305.000)	54,566	48,720	43,500	38,839
Flujo de efectivo acumulado descontado	(305.000)	250,434	201,714	158,214	119,375

Descripción	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Inversión Fija					
Capital de Trabajo	0	0	0	0	0
Utilidad Neta	30,614	30,614	30,614	30,614	30,614
Depreciación	30,500	30,500	30,500	30,500	30,500
Flujo de Efectivo	61,114	61,114	61,114	61,114	61,114
Flujo de Efectivo acumulado	570	61,684	122,798	183,912	245,026
Flujo de Efectivo Descontado	34,678	30,962	27,645	24,683	22,038
Flujo de efectivo acumulado descontado	84,697	53,735	26,090	1,407	20,631

Descripción	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
Inversión Fija						
Capital de Trabajo	0	0	0	0	0	0
Utilidad Neta	30,614	61,114	61,114	61,114	61,114	61,114
Depreciación	30,500					
Flujo de Efectivo	61,114	61,114	61,114	61,114	61,114	61,114
Flujo de Efectivo acumulado	306,140	367,254	428,368	489,482	550,596	611,710
Flujo de Efectivo Descontado	19,677	17,569	15,686	14,006	12,505	11,165
Flujo de efectivo acumulado descontado	40,308	57,877	73,563	87,569	100,074	111,239

7.3.4 Análisis de resultados de la medida 2

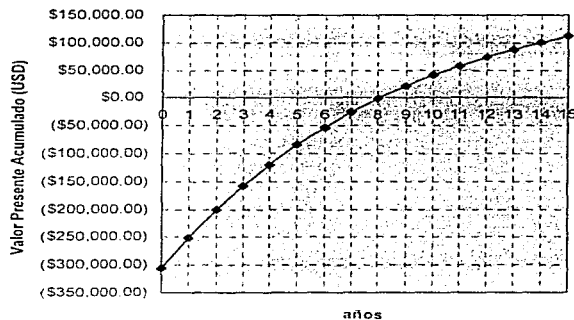
a) PARAMETROS BASICOS

• Inversión	305,000	USD
• Horizonte	15	años
• Ahorro neto anual	61,114	USD
• Tasa de descuento	12	%

b) RESULTADOS PRINCIPALES

• Valor Presente Proyecto	111,239	USD
• BENEFICIO/COSTO	0.36	
• TIR	18.46	%
• ROI	9.1	%
• PRI	8	años

Valor presente acumulado vs tiempo



CONCLUSIONES

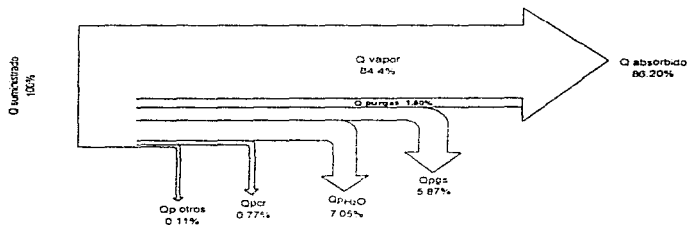
Es mediante el proceso de combustión, como se transforma la mayor parte de la energía primaria para satisfacer los requerimientos energéticos de nuestra sociedad, requerimientos que día con día se incrementan, en contraposición, las reservas de energéticos se ven reducidas, no existiendo en el futuro inmediato un sustituto energético adecuado para los combustibles fósiles.

Por otro lado, entre los problemas más agudos que se presentan hoy en día, está el problema de la contaminación atmosférica, siendo los equipos de combustión como calderas y hornos industriales, una de las fuentes principales de emisión.

Los generadores de vapor, constituyen el equipo de combustión más utilizado en la industria para los procesos de generación de energía eléctrica y calentamiento.

En este contexto, cualquier esfuerzo encaminado a lograr un mejor aprovechamiento de la energía en los generadores de vapor; favorecerá la preservación de los recursos energéticos y la protección al medio ambiente. Es por esta razón, que la presente tesis tiene como uno de sus objetivos el desarrollar una metodología del análisis energético de las calderas, ya que es mediante este análisis como podemos establecer las medidas de ahorro de energía tendientes a lograr el uso óptimo de la energía en dichos equipos.

Como resultado del análisis y procesamiento de la información estadística de operación recopilada en campo, obtenemos el balance térmico de la caldera que nos indica, la energía suministrada al equipo y su destino final, esto es: energía aprovechada y pérdidas de energía en sus diferentes formas. Lo anterior se puede ilustrar gráficamente por medio de un diagrama de Sankey.



CONCLUSIONES

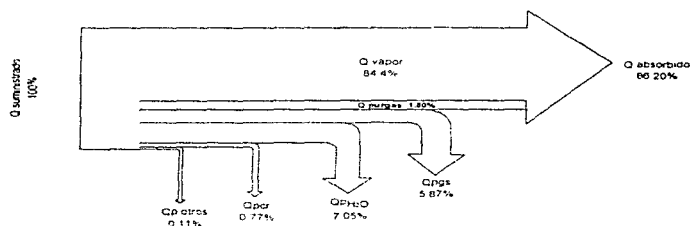
Es mediante el proceso de combustión, como se transforma la mayor parte de la energía primaria para satisfacer los requerimientos energéticos de nuestra sociedad, requerimientos que día con día se incrementan, en contraposición, las reservas de energéticos se ven reducidas, no existiendo en el futuro inmediato un sustituto energético adecuado para los combustibles fósiles.

Por otro lado, entre los problemas más agudos que se presentan hoy en día, está el problema de la contaminación atmosférica, siendo los equipos de combustión como calderas y hornos industriales, una de las fuentes principales de emisión.

Los generadores de vapor, constituyen el equipo de combustión más utilizado en la industria para los procesos de generación de energía eléctrica y calentamiento.

En este contexto, cualquier esfuerzo encaminado a lograr un mejor aprovechamiento de la energía en los generadores de vapor; favorecerá la preservación de los recursos energéticos y la protección al medio ambiente. Es por esta razón, que la presente tesis tiene como uno de sus objetivos el desarrollar una metodología del análisis energético de las calderas, ya que es mediante este análisis como podemos establecer las medidas de ahorro de energía tendientes a lograr el uso óptimo de la energía en dichos equipos.

Como resultado del análisis y procesamiento de la información estadística de operación recopilada en campo, obtenemos el balance térmico de la caldera que nos indica, la energía suministrada al equipo y su destino final, esto es: energía aprovechada y pérdidas de energía en sus diferentes formas. Lo anterior se puede ilustrar gráficamente por medio de un diagrama de Sankey.



Del balance térmico obtenemos la eficiencia térmica de la caldera por cualquiera de los dos métodos existentes, método de entradas y salidas (directo) y método de pérdidas (indirecto). Para calcular la eficiencia por el método directo es necesario conocer los flujos de combustible consumido y de vapor generado (o en su defecto el agua de alimentación y la purga) así como el poder calorífico del combustible, mientras que para calcular la eficiencia por el método indirecto, se requiere estrictamente conocer el flujo de combustible y su poder calorífico, así como la concentración de oxígeno en los gases y la temperatura de los mismos, con estos dos últimos parámetros es posible estimar la eficiencia por medio de gráficos para una composición típica del combustible, con muy buena aproximación.

De estos dos métodos, el más utilizado es el indirecto por su facilidad de aplicación, y aunque generalmente el resultado es cercano a la realidad, recurre a simplificaciones importantes para la determinación de la energía perdida a través de las paredes de los equipos.

En este trabajo se recurrió a la termografía, que es una técnica moderna, que nos permite conocer con precisión las temperaturas para evaluar los flujos energéticos a través de las paredes de los equipos hacia la atmósfera. Además de esta, existen otras ventajas en la aplicación de la termografía que se mencionan más adelante.

En el caso de estudio, como resultado del análisis energético realizado a un generador de vapor de 200 ton/h (55.6 kg/s) de vapor sobrecalentado se encontró que: la eficiencia calculada por el método indirecto para el caso de operación (86.31%), es cercana al valor reportado por el fabricante (87.25%).

Para reducir las pérdidas de energía y por consiguiente incrementar la eficiencia térmica se recomiendan las siguientes medidas :

- Sustituir el aislamiento dañado e instalarlo en las áreas que carecen de él y que se ilustran en las imágenes de termografía presentadas. El porcentaje de pérdidas de energía por paredes que representan estas imágenes es muy pequeño, por lo que solo se recomienda este punto como medida de nula o mínima inversión, que al mismo tiempo es de mantenimiento para lograr una operación adecuada de la caldera y evitar el deterioro del equipo.

- Ajustar el exceso de aire utilizado en la operación a valores cercanos a los indicados por el fabricante o al valor mínimo que garantiza una combustión completa, para lo cual es necesario instalar el equipo indispensable para controlar el exceso de aire, como son los analizadores de oxígeno y de monóxido de carbono. Esta medida es muy factible de aplicar, ya que la inversión (111,996 Dls) es recuperable en ocho meses y medio con una T.I.R. de 159.52%.
- La segunda medida con inversión de capital que corresponde a la sustitución del precalentador de aire, es mucho menos atractiva económicamente, ya que la inversión requerida (305,000 Dls) es alta y su periodo de recuperación es prolongado (8 años), aunque técnicamente sí es justificable, es necesario realizar un análisis profundo a las fugas de aire que se presentan en el precalentador aire-gases, que si bien no inciden en la eficiencia térmica de la caldera, sí representan pérdidas energéticas debido a la potencia en exceso desarrollada por el ventilador para poder suministrar un flujo de aire mayor al requerido para la combustión. Más aun si el ventilador es accionado por motor eléctrico, cada unidad de energía eléctrica ahorrada representa el ahorro de al menos tres unidades de energía térmica.

Además de la determinación exacta de la magnitud de los flujos energéticos, a partir de temperaturas de pared, la termografía tiene otras ventajas que se mencionan a continuación.

VENTAJAS ADICIONALES DE LA TERMOGRAFIA

- ◆ La inspección de las fugas de energía a través de las paredes del equipo, es más rápida, exacta e ilustrativa al utilizar equipo de termografía de manera que se pueden detectar fugas de energía y problemas que a simple vista podrían pasar desapercibidas.
- ◆ La determinación de las temperaturas exactas en cualquier elemento o sistema permitirá evaluar satisfactoriamente su estado, detectar problemas incipientes y al correlacionarla con otras técnicas de medición y evaluación, se podrá obtener un diagnóstico de falla certero. Con la localización de estos problemas en sus directrices, y su clasificación de acuerdo a la severidad, pueden ser planeadas las medidas de corrección, además de poderse instituir y sincronizar con los programas de producción con un ahorro considerable de energía y de dinero.
- ◆ Utilizando termografía se pueden instituir programas de mantenimiento preventivo de plantas, lo que sustituiría la tradicional filosofía de "repararlo cuando deje de funcionar" por "mantenimiento predictivo apoyado en equipo infrarrojo".

Como conclusión final: Ante la problemática que se nos presenta y que cada día que pasa se agudiza más es necesario concientizarnos y que todos nos esforcemos en el medio en que nos desarrollemos, en utilizar la energía disponible en forma eficiente y racional para de esta manera contribuir, por un lado a preservar nuestros recursos energéticos y por otro lado proteger nuestra salud.

ANEXO I

nomenclatura

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES (S.I)
E_{ut}	Energía útil	W
E_s	Energía suministrada	W
Q_{av}	Calor absorbido por el vapor	W
Q_{atemp}	Calor absorbido por el agua de atemperación	W
Q_{ap}	Calor absorbido por la purga	W
Q_{del}	Calor liberado por el combustible líquido	W
Q_{deg}	Calor liberado por el combustible gas	W
Q_{sc}	Calor sensible del combustible	W
Q_{sa}	Calor sensible del aire	W
Q_{Svst}	Calor suministrado con el vapor de atomización	W
Q_{SH_2Oaire}	Calor suministrado con el vapor contenido en el aire	W
Q_s	Calor total suministrado	W
Q_{pg}	Calor perdido con los gases secos	W
Q_{PH_2Og}	Calor perdido por la humedad en el combustible	W
Q_{PH_2Oa}	Calor perdido con la humedad formada por el hidrogeno en la combustión	W
Q_{PH_2Oaire}	Calor perdido con el vapor de agua que entra con el aire de combustión	W
Q_{pvt}	Calor perdido con el vapor de atomización	W
Q_{pct}	Calor que se pierde por convección y radiación	W
Q_{pCO}	Calor que se pierde por el CO inquemado	W
Q_{pHCng}	Calor que se pierde por hidrocarburos inquemados	W
Q_{pHng}	Calor que se pierde por H_2 inquemado	W
W_v	Flujo del vapor	kg/s
W_{atemp}	Flujo del agua de atemperación	kg/s
W_p	Flujo de purgas	kg/s
W_c	Flujo de combustible	kg/s
$W_{aire seco}$	Flujo de aire seco	kg/s
W_{vst}	Flujo de vapor de atomización	kg/s
W_{H_2Oaire}	Flujo de la humedad en el aire	kg/s
W_{H_2Og}	Flujo de hidrógeno que se desprende en la combustión	kg/s
T_k	Temperatura de gases secos a la salida de la caldera	$^{\circ}C$
T_a	Temperatura de referencia (ambiente)	$^{\circ}C$
t_1	Temperatura de la zona más caliente	$^{\circ}C$
t_2	Temperatura de la zona más fría	$^{\circ}C$
t_s	Temperatura de la superficie del sólido	$^{\circ}C$
t_m	Temperatura media del fluido	$^{\circ}C$
h_{vsc}	Entalpia del vapor sobrecalentado	J
h_{aa}	Entalpia del agua de alimentación	J
h_{atemp}	Entalpia del agua de atemperación	J
h_{vRES}	Entalpia del vapor recalentado a la salida del precalentador	J
h_{vRE}	Entalpia del vapor recalentado a la entrada del precalentador	J
h_p	Entalpia de la purga	J

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES (S.I)
h_{aire}	Entalpía del aire	J
h_{ir}	Entalpía a la temperatura de referencia	J
h_{rg}	Entalpía a la temperatura de los gases	J
h_{rl}	Entalpía del líquido a la temperatura de referencia	J
h_{vr}	Entalpía del vapor a la temperatura de referencia	J
h_{va}	Entalpía del vapor de atomización	J
PCS	Poder Calorífico Superior	J/kg ó J/m ³
PCI	Poder Calorífico Inferior	J/kg ó J/m ³
$C_{p \text{ prom}}$	Calor específico promedio de los gases secos de combustión	J/kg K
q	Calor transmitido por conducción	m ² (W/m ²)
K	Conductividad térmica del material	W/m K
e	Espesor del sólido en la dirección de la transmisión	m
R	Resistencia térmica del sólido	K s m ² /J
q_r	Calor emitido por radiación	m ² /(W/m ²)
ϵ	Emisividad del material	
σ	Constante de valor 5.674×10^{-8}	W/m ² K ⁴
A	Area de transmisión	m ²
C	Coefficiente que toma en cuenta las pérdidas ocasionado en los elementos que forman cuerpo con las paredes.	
α_{CA}	Coefficiente de transmisión por convección del área	kcal/h m ² °C
α_{RA}	Coefficiente de transmisión por radiación del área	kcal/h m ² °C
α_T	Coefficiente global de transmisión de calor del área A,	kcal/h m ² °C
V	Velocidad del viento	m/s

ANEXO 2

ANALISIS DE LAS FUGAS EN EL PRECALENTADOR LJUNGSTROM DE LA CALDERA CB-3 DE LA REFINERIA "LAZARO CARDENAS"

La eficiencia térmica de la caldera (87.65%), determinada por el método indirecto, es típica en calderas de capacidad similar con sistema de precalentamiento de aire; sin embargo, los datos recopilados en campo presentan cierta incongruencia con respecto a la información de diseño:

- El exceso de aire utilizado para el caso de operación (15%), es mayor que el utilizado en el caso de diseño(5%).
- La temperatura de los gases a la salida del precalentador de aire es más baja que la reportada para el caso de diseño (144°C vs 166°C).

Los datos anteriores son contradictorios, porque entre mayor sea el exceso de aire utilizado en la combustión, mayor será la temperatura de salida de los gases de combustión y por lo tanto mayores serán las pérdidas de calor y por consecuencia la eficiencia térmica deberá ser menor.

Una posible explicación de lo anterior, podría ser que las fugas de aire en el precalentador de aire-gases sean de una magnitud mucho mayor que las de diseño, lo que hace necesario realizar un análisis de las fugas actuales en el precalentador de aire.

La metodología para determinar las fugas de aire y la temperatura corregida de los gases es la siguiente:

- De campo se obtienen datos del %O₂ a la entrada y a la salida del precalentador de aire, así como la temperatura de los gases a la salida del precalentador.
- Con el % de O₂ y de las hojas de la corrida de combustión, se obtienen los % de exceso de aire, antes y después del precalentador, así como el flujo de aire práctico y de gases a ambos excesos de aire.
- Las fugas se obtienen de restar el flujo de aire a la entrada menos el de la salida

$$f_a = F_{ae} - F_{as} \text{ ó con relación al flujo de gases: } f_a = F_{gs} - F_{ge}$$

- Con los resultados de los cálculos anteriores y la ecuación que se describe a continuación, se obtiene la temperatura (T_g^*) que debieran tener los gases.(sin fugas).

$$T_g^* = \frac{F_{gs} * C_{p_g} * (T_{gs} + T_{ref}) - f_u * C_{p_a} * (T_a - T_{ref})}{F_{gc} * C_{p_g}} + T_{ref}$$

Donde:

C_{p_g} = Capacidad calorífica de los gases

C_{p_a} = Capacidad calorífica del aire

T_{gs} = Temperatura de los gases a la salida del precalentador (con fugas)

T_g^* = Temperatura corregida de los gases a la salida de precalentador (sin fugas)

T_{ref} = Temperatura de referencia (ambiente)

F_{gc} = Flujo de gases a la entrada del precalentador de aire

F_{gs} = Flujo de gases a la salida del precalentador de aire

F_{ac} = Flujo de aire a la entrada del precalentador de aire

F_{as} = Flujo de aire a la salida del precalentador de aire

f_u = Fugas de aire

A continuación se presentan los datos del precalentador, obtenidos de un reporte del mes de octubre de 1995:

%O ₂ entrada del P.A	%O ₂ salida del P.A	Temp. de los gases (°C)
2.0	8.6	144

Con estos datos y aplicando la metodología indicada anteriormente, se obtienen los siguientes resultados:

F_{gc} (m ³ /h)	F_{gs} (m ³ /h)	f_u (m ³ /h)	T_g^* corregida (°C)
192,765,885	279,510,533	86,744,65	183

Con base a este análisis de las fugas de aire, se utilizó para los cálculos del balance la temperatura de 183°C.

Para el cálculo de la potencia desarrollada por el ventilador para suministrar el aire de combustión, para los casos con y sin fugas de aire en el precalentador, se utilizó la siguiente metodología:

- Se calcula primero la densidad del aire a las condiciones de operación, con la ecuación: $\rho = \frac{P * PM}{10.731 * (T + 460)}$
- La corrección de la presión estática se realiza con: $PS_R = PS \left(\frac{\rho_N}{\rho} \right)$
- La presión dinámica (PV), se calcula con: $PV = \frac{\rho * V^2}{334.352}$
- De lo anterior, la presión total se define como: $PT = PS + PV$
- Por último, la potencia requerida por el ventilador a las condiciones normales se obtiene de: $BHP_N = \frac{Q * PT}{6356 * \eta}$

Para corregir de las condiciones normales a las condiciones de operación, se utiliza:

$$BHP_{real} = \frac{BHP_N * \rho}{\rho_N}$$

Nomenclatura:	PS	=	Presión estática
	ρ_N	=	Densidad a las condiciones normales
	PM_A	=	Peso molecular del aire
	P	=	Presión ambiente
	V	=	Velocidad del aire a la salida del ventilador
	Q	=	Flujo volumétrico de aire real
	η	=	Eficiencia del ventilador

Aplicación de la metodología anterior a los casos de operación del ventilador de tiro forzado :

Datos :

ρ_N	PM_A	P	PS	V	Q sin fugas	η
0.075 lb/ft ³	29 lb/lbmol	14.7 lb/plg ²	30 plg H ₂ O	125 ft/s	106.134.33 ft ³ /min	70%

Resultados de los cálculos sin fugas

ρ	PS_R	PV	PT	BHP_N	BHP_{real}
0.0732 lb/ft ³	30.74 plg H ₂ O	3.20 plg H ₂ O	34.24 plg H ₂ O	8816.79	797.19

Resultados de los cálculos con fugas

ρ	PS _f	PV	PT	BHP _N	BHP _{real}
0.0732 lb/ft ³	30.74 plg H ₂ O	3.50 plg H ₂ O	34.24 plg H ₂ O	1,192.51	1,163.89

De lo anterior se obtiene un potencial de ahorro de energía al eliminar las fugas de aire del precalentador de aire, de: 273.4 kW (366.7 BHP), que considerando 8,000 h/año de operación, se tendría 2,187,680 kW-h/año.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

1. Babcock and Wilcox
Steam, its Generation and Use
Babcock and Wilcox Ed. (1972)
2. Balance Nacional de Energía
Ed. SECRETARIA DE ENERGIA
México, D.F. 1994
3. Burghardt M. David
Ingeniería Termodinámica
Segunda Edición
Ed. Harla
México, D. F.
4. Energy Conservation in Boiler
The Conservation Center, Japan
Japón
5. Energy Conservation Technology of Industrial Boilers
The Conservation Center, Japan
México, D.F. 1991
6. García-Colin Scherer Leopoldo
Introducción a la termodinámica clásica
Ed. Trillas
México, D.F. 1976
7. Holman J. P
Transferencia de calor
Comp. Editorial Continental. S.A. de C.V.
México, D.F. 1991

8. Kern D. Q
Procesos de Transferencia de Calor
C.E.C.S.A.
Vigesimasegunda impresión en Español
México, D.F. 1990

9. Mendoza Arcaraz Alfonso
Análisis Exergético de un Calentador Domestico de Gas L.P.
Proyecto Terminal
Universidad Autónoma Metropolitana -Azc.
Ingeniería Mecánica
México, D.F. 1991

10. Mc. Adams H. W
Heat Transmission
Mc Graw Hill

11. Perry H.R.
Manual del Ingeniero Químico
Tercera edición en español, Secc. 9 y 10
Mc Graw- Hill
México, D.F. 1992

12. Peters S. Max, Timmerhaus
Plant Design and Economics for Chemical Engineers
Mc Graw Hill

13. Severns W.H.
La producción de Energía mediante Vapor, Aire o Gas
Ed. Reverté, S.A.
México, D.F. 1976

14. Reyes Chumacero Antonio
Termodinámica fenomenológica en sistemas cerrados y abiertos
De. Trillas
México, D.F. 1976

15. Shield, D.C.
Calderas. Tipos, Características y sus funciones
C.E.C.S.A.
Décima Impresión
México, D.F. 1982
16. Smith Van Ness
Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química
Ed. Mc. Graw Hill
Cuarta Edición
México, D.F. 1989
17. Taylor G.A.
Ingeniería Económica
Ed. LIMUSA, S.A.
México, D.F. 1970
18. Valiente Antonio
Manual del Ingeniero Químico
Ed. LIMUSA S.A. de C.V.
México, D.F. 1990
19. ATPAE, FIDE, UAM
XV Seminario Nacional Sobre el Uso Racional de la Energía y Exposición de Equipos y Servicios.
Memoria Técnica
México D.F. Nov. 1994
20. Ministerio de Industria y energía
Manuales Técnicos y de instrucción para conservación de energía
Tomo 2. Generación de Vapor
Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales
21. Zemansky Mark
Heat and Thermodynamics
Mc Graw Hill

CODIGOS Y NORMAS

1. NOM - 002- ENER -1995
Eficiencia Térmica de Calderas Paquete
Secretaria de Energía
2. NOM - 009 - ENER - 1995
Eficiencia Energética en Aislamientos Térmicos Industriales
Secretaria de Energía
3. NOM - 008 - SCFI -1993
Sistema General de Unidades de Medida
Comisión Federal de Electricidad
4. Performance Test Code
Steam Generating Units, PTC 4.1
ASME
8 Agosto 1972

CATALOGOS

1. Q. DOT Corporation
The Q-Pipe Waste Heat Recovery Boiler
USA. 1982
2. C-E Air Preheater Ljungstrom
Process Equipment
Combustion Engineering, Inc.
Wellsville, New York
3. C-E Air Preheater Industrial Ljungstrom
Heat Recovery Systems
Combustion Engineering Inc.
New York

4. Inframetrics
ThermaGram 95 for Windows "Real Time Digital Thermal Image Processing System"
North Billerica

5. Inframetrics
Model 760 "Infrared Thermal Imaging Radiometer"
North Billerica

ARTICULOS

1. IDAE
Generación de vapor
Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía

2. Hurley Charles W. and Kreider
Applications of Thermography for Energy Conservation in Industry
National Bureau of Standards
Department of Commerce
Washington, D.C. 1976

3. Ing. Espinosa Cuevas Jorge, Ing. Tellez
La termografía como herramienta para programas de mantenimiento
I.M.P.

4. Infrared Thermography as Applied to Refinery & Petrochemical Plant Maintenance and
Energy Conservation.

5. Inframetrics, The Infrared Specialists. Representado en México por: Tecnología KLM
S.A. de C.V.
Teoría Básica de Infrarrojo y Radiosidad

6. Inframetrics
Los Radiómetros de la serie 700 de Inframetrics

7. R.W. Mangof
Infrared Theory
Omega Engineering

8. Temperature, Microsoft (R) Encarta
Copyright 1993 Microsoft Corporation
Copyright (c) 1993 Funk & Wagnall's Corporation

9. Conclusiones y Recomendaciones del XV Congreso del Consejo Mundial de la Energía
Madrid 1992

10. Suplemento de la Revista "Nosotros los Petroleros"
Conservación y ahorro de energía
1985-1988

11. El XV Congreso del CME "Energía y Vida". Un hito de transición
John Baker

12. Programa de Conservación y Ahorro de Energía
Reglamento de acciones para la Conservación y Ahorro de Energía
México, octubre 1991

13. Caltenco E. J. L., Robles L. F.
Conservación y Ahorro de Energía
Curso IMP 1992

14. Caltenco E. J. L., Robles L. F., Ceballos S. A. A.
Técnicas de Conservación de energía térmica
Primer Congreso Nacional de la Asociación Mexicana para la Economía Energética
I.M.P. AMEE
México, D. F. 1995

15. Caltenco E. J. L., Robles L. F., Ceballos S. A. A.
Análisis Energético y Ecológico de Recuperadores de Energía
I.M.P.