



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA
PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN
DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE**

Aníbal Alexander Escobar Rosales

Asesorado por el Ing. Ever Nicolás Bautista Orozco

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO EN LAS OPERACIÓN DE UNA CALDERA
PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN
DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANÍBAL ALEXANDER ESCOBAR ROSALES
ASESORADO POR EL ING. EVER NICOLÁS BAUTISTA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Pedro Enrique Kubes Zacek
EXAMINADOR	Ing. Víctor Eduardo Izquierdo Palacios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha julio de 2014.


Aníbal Alexander Escobar Rosales

Guatemala, 03 septiembre del 2014.

Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador del Área Térmica,
Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala,

Señor Coordinador:

Por este medio le doy a conocer que la revisión que he realizado del Trabajo de Graduación del Estudiante Aníbal Alexander Escobar Rosales, con número de carné universitario 199416260, titulado **“ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE”**, se ha concluido satisfactoriamente.

Agradeciendo la atención prestada, atentamente.



Ing. Ever-Nicolás Bautista Orozco
Asesor de Tesis
Colegiado# 6050



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.180.2015

El Coordinador del Área Térmica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE.** Del estudiante **Anibal Alexander Escobar Rosales**, numero de carnet **199416260**, recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador del Área Térmica
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, mayo de 2015.



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.299.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN DEL DIESEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE** del Estudiante **Aníbal Alexander Escobar Rosales** Carné No. **1994-16260** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, octubre de 2015

/aej



DTG. 505.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA OPERACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR UTILIZANDO GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN SUSTITUCIÓN DEL DIÉSEL Y SU IMPACTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE**, presentado por el estudiante universitario: **Aníbal Alexander Escobar Rosales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polar
Decano



Guatemala, octubre de 2015

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz en mi camino, proveyéndome de sabiduría, fortaleza, salud, amor y esta meta alcanzada.
- Mis padres** Astrid Patricia Rosales Núñez (q. e. p. d.) y César Aníbal Escobar Veliz (q. e. p. d.), por brindarme amor, sabios consejos y apoyo infinito. Los amaré por siempre.
- Mis tíos** Manuela de Jesús Calderón de Gómez y Marco Lorenzo Gómez, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Les estaré infinitamente agradecido.
- Mi esposa** Carla Marili Díaz de Escobar, por su amor, apoyo y comprensión.
- Mis hijos** Jefferson, Astrid, Mishell y Cristian que este triunfo sea un ejemplo de perseverancia. Gracias por su dulzura y amor que irradian.
- Mis hermanos** Claudia y Cristina Escobar, por compartir este momento de alegría.

**Todos mis familiares y
amigos**

Por acompañarme en este día tan importante de
mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

**Manuela de Jesús
Calderón de Gómez**

Por su amor, sacrificio, esfuerzo y sabios consejos a lo largo de mi vida y carrera profesional.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudios donde me desarrolle profesionalmente.

**Ing. Roberto Guzmán
Ortíz**

Por su ayuda y apoyo profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Características exclusivas de la caldera pirotubular Cleaver Brooks.....	2
1.3. Características de funcionamiento y operación de los quemadores duales.....	8
1.4. Rutina de operación y mantenimiento	13
2. COMBUSTIBLES INDUSTRIALES.....	15
2.1. Tipos de combustibles.....	15
2.1.1. Combustibles líquidos.....	16
2.1.2. Combustibles gaseosos.....	17
2.2. Características y propiedades de cada combustible	20
2.3. Importancia y criterios para la elección de un combustible....	25
2.4. Operación de manipuleo: transporte y almacenamiento.....	26
3. EFICIENCIA EN LA CALDERA Y COMBUSTIÓN.....	31
3.1. Métodos para calcular la eficiencia de calderas	31
3.2. El proceso de combustión	53

4.	PROCESO DE CONVERSIÓN DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO A GAS VAPORIZADO.....	63
4.1.	Vaporizadores	63
4.2.	Características generales de los vaporizadores.....	73
4.3.	Principio de funcionamiento	74
4.4.	Mantenimiento y servicio.....	76
5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	79
5.1.	Análisis económico.....	79
5.2.	Ahorro estimado de la conversión.....	80
5.3.	Estimación de recuperación de la inversión.....	81
5.4.	Análisis comparativo con otro tipo de combustible.....	83
5.5.	Cuadro comparativo de la eficiencia de la caldera.....	85
5.6.	Análisis comparativo del costo de mantenimiento con cada combustible.....	87
5.7.	Análisis comparativo del costo de la libra de vapor con cada combustible.....	88
6.	IMPACTO AMBIENTAL	91
6.1.	Efecto invernadero	91
6.2.	Valorización del impacto ambiental	92
6.3.	Principales contaminantes atmosféricos del medio ambiente.	93
6.4.	Beneficios sobre el medio ambiente.....	95
6.5.	Buenas prácticas operativas	97
7.	SEGURIDAD INDUSTRIAL.....	103
7.1.	Seguridad y normas en calderas industriales.....	103

7.2.	Equipos de seguridad industrial implementados en el área de calderas.....	108
	CONCLUSIONES	113
	RECOMENDACIONES.....	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	117
	ANEXOS.....	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Caldera Cleaver Brooks.....	4
2.	Componentes caldera Cleaver Brooks.....	6
3.	Quemador retráctil caldera Cleaver Brooks.....	10
4.	Quemador tipo (gas/diésel).....	12
5.	Quemador de gas a baja presión.....	12
6.	Lugares y formas de obtención del GLP.....	28
7.	Forma gráfica de la eficiencia de una caldera.....	32
8.	Representación Sankey de los flujos de energía en una caldera.....	34
9.	Eficiencia <i>versus</i> temperatura de los productos de combustión.....	37
10.	Eficiencia <i>versus</i> espesor capa de hollín (lado de fuego).....	37
11.	Eficiencia <i>versus</i> espesor de las incrustaciones (lado de agua).....	38
12.	Pérdida de radiación <i>versus</i> potencia caldera.....	40
13.	Sistema de recuperación de calor de la purga.....	41
14.	Relación entre el porcentaje de purga y eficiencia de una caldera, de acuerdo a la presión de trabajo.....	42
16.	Eficiencia <i>versus</i> exceso de aire para el caso del petróleo residual y el gas natural (considerando una temperatura de salida de 220 °C).....	46
17.	Balance de energía en una caldera.....	47
18.	Análisis de combustión.....	56
19.	Instalación con un vaporizador de contacto directo.....	64
20.	Instalación del vaporizador de alimentación directa.....	66

21.	Instalación del vaporizador de retroalimentación.....	67
22.	Diagrama de flujo de un vaporizador.....	78
23.	Área de vaporizadores.....	78
24.	Porcentaje de óxido de nitrógeno (NO _x) <i>versus</i> combustible.....	83
25.	Partículas por millón <i>versus</i> combustible.....	83
26.	Kilogramos de dióxido de carbono (CO ₂) <i>versus</i> combustible.....	84
27.	Diagrama de Sankey para ambos combustibles.....	84
28.	Tuberías de conducción de vapor aislado.....	106
29.	Sala de calderas.....	108
30.	Válvula de seguridad.....	109
31.	Mirilla del nivel de corte por nivel bajo de agua.....	110
32.	Presostatos de control de vapor.....	111
33.	Área de almacenamiento GLP.....	111
34.	Equipo de protección personal.....	112

TABLAS

I.	Dimensiones generales, capacidades y características de la caldera.....	7
II.	Calendario recomendado de la inspección de la caldera.....	14
III.	Tipos de combustible.....	15
IV.	Clasificación de los gases.....	19
V.	Características de los combustibles.....	24
VI.	Contenido de energía transportada según combustible.....	30
VII.	Relación entre pérdida de calor por radiación y carga de la caldera.....	39
VIII.	Valores referenciales de exceso de aire de acuerdo al tipo de combustible y quemador.....	45
IX.	Parámetros de una combustión completa.....	55

X.	Diferencias entre vaporización por alimentación y retroalimentación.....	69
XI.	Ventajas e inconvenientes entre vaporización por alimentación y por retroalimentación.....	69
XII.	Rutina de mantenimiento vaporizadores.....	77
XIII.	Descripción de la inversión del proyecto.....	79
XIV.	Análisis costo-beneficio GLP <i>versus</i> diésel.....	80
XV.	Ahorro estimado de la conversión.....	81
XVI.	Proyección del proyecto total a 10 años.....	82
XVII.	Datos financieros del proyecto.....	82
XVIII.	Eficiencia calculada por el método indirecto para ambos combustibles.....	87
XIX.	Análisis del aire natural.....	94
XX.	Composición del aire natural.....	94
XXI.	Medición de los gases de combustión utilizando GLP.....	96
XXII.	Medición de los gases de combustión utilizando diésel.....	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BHP	<i>Brake horse power</i> (caballos de fuerza al freno)
HP	Caballos de fuerza
CB	Cleaver Brooks
ρ_r	Densidad relativa
CO₂	Dióxido de carbono
NO₂	Dióxido de nitrógeno
h_g	Entalpía de vapor (BTU/lb)
h_{fg}	Entalpía de vaporización (BTU/lb)
GNL	Gas natural licuado
HC	Hidrocarburos
hr	Hora
lb_m	Libra masa
Psi	Libra sobre pulgada cuadrada
MUSD	Millones de dólares
CO	Monóxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
O₂	Oxígeno molecular
ppm	Partes por millón
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
pH	Potencial de hidrógeno
Bar	Presión barométrica

TDS

Total de sólidos disueltos

GLOSARIO

Agua de alimentación	Agua que alimenta la caldera, puede ser: cruda, condensada o tratada.
ASME	American Society of Mechanical (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
BTU	Cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit.
Caldera	Equipo que se utiliza para calentar el agua en estado líquido a vapor utilizando combustible.
Centistokes	Unidad de viscosidad cinemática en el sistema cegesimal de unidades.
Combustión	Reacción química, caracterizada por ser instantánea y principalmente por su desprendimiento de calor y luz.
Conducción	Calor transferido a través de un sólido, debido a un gradiente de temperatura, sin desplazamiento apreciable de partículas.

Convección	Calor transferido por mezcla de una parte de fluido con otra. El movimiento de líquido o gas puede producirse por diferencia de densidades, por temperatura, o por el movimiento por medios mecánicos.
Engler	Relación entre el tiempo en segundos que necesita un líquido para salir de un recipiente y el que necesita una cantidad de agua para salir del mismo recipiente, se define como viscosidad a dicha temperatura y se mide en grados Engler.
Entalpía	Es la cantidad de energía por el producto de la presión y el volumen específico (BTU).
Evaporización	Proceso de calentamiento que hace que el agua cambie de estado líquido a gaseoso.
GLP	Gas licuado de petróleo.
Hollín	Partículas sólidas, en su mayoría compuestas de carbono impuro, resultantes de la combustión incompleta.
Oxidación	Acción del oxígeno sobre el material de un cuerpo.
Purga	Pérdida determinada de agua en el sistema de caldera.

Superficie de calefacción

Es aquella porción de la superficie de una caldera que por una cara se halla en contacto con el agua que se trata de calentar, y por la otra con los gases o refractarios calientes.

Trampa de vapor

Equipo cuya función es drenar el aire condensado y dióxido de carbono, tan rápido como sea posible.

OBJETIVOS

General

Demostrar a través de este análisis, que la utilización del GLP permite producir las mismas libras de vapor por hora que se producirían con el diésel a un menor costo, esto debido a la eficiencia y numerosas ventajas que ofrece.

Específicos

1. Determinar el comportamiento del GLP desde su recepción, almacenamiento y consumo.
2. Comparar los resultados teóricos con los resultados prácticos.
3. Presentar un análisis comparativo de ambos combustibles tomando en consideración propiedades y características de cada uno de ellos.
4. Comparar la eficiencia de la caldera usando los dos tipos de combustibles.
5. Establecer costos de operación, producción, inversión y su recuperación.
6. Determinar costos de la libra de vapor producido con ambos combustibles y su comparación.
7. Minimizar el efecto invernadero y la generación de gases contaminantes con la sustitución del uso de un combustible menos contaminante

INTRODUCCIÓN

Los tipos de combustibles más usados en la actualidad son los obtenidos por hidrocarburos, básicamente de petróleo (diésel), tanto en la industria como en el transporte, estos originan más daño, tanto al ser humano como al medio ambiente, y su costo es relativamente alto en comparación con otros combustibles cuando se utiliza en grandes cantidades; es por ello que las empresas se han dado a la tarea de buscar alternativas en la utilización de combustibles que les permitan obtener el máximo beneficio a través del menor costo de mantenimiento, una inigualada economía de combustible, sin descuidar la protección del medio ambiente por medio de una combustión limpia y, sobre todo, brindar una operación segura para sus instalaciones y personal operativo.

En el presente trabajo se describen los beneficios económicos, operativos, energéticos y ambientales que se pueden conseguir con el uso del gas licuado de petróleo (GLP), en calderas de vapor, así como el proceso que lleva este combustible, desde su despacho hasta que es utilizado como gas vaporizado dentro de la caldera, para que se dé el proceso de combustión.

El gas licuado de petróleo es un combustible extremadamente limpio, ofrece numerosas ventajas, tanto a los usuarios finales como a la sociedad. Se licúa con facilidad, lo que facilita su transporte y almacenamiento y lo convierte en una opción energética muy versátil.

1. GENERALIDADES DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

1.1. Introducción

En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales se hallan rodeados de agua. Las calderas pirotubulares, generalmente tienen un hogar integral (denominado caja de fuego) limitado por superficies enfriadas por agua. En la actualidad, las calderas pirotubulares horizontales se utilizan en instalaciones de calefacción a baja presión y algunos tipos más grandes, para producir vapor a presión relativamente baja, destinada a producción de energía.

Actualmente, las calderas de este tipo vienen equipadas con controles automáticos, ventiladores de tiro inducido y forzado, y otros accesorios. Además cuentan con la opción de poder utilizar *fuel-oíl*, gas o combinación como combustible debido al tipo de quemador que utiliza. Las calderas de este tipo se construyen en tamaños comprendidos entre 15 y 500 HP, con presiones relativas de 14 a 240 (lb/plg²).

Se pueden mencionar las siguientes ventajas e inconvenientes de este tipo de calderas:

Ventajas:

- Menor costo inicial debido a la simplicidad del diseño.

- Mayor flexibilidad de operación, ya que el gran volumen de agua permite absorber fácilmente las fluctuaciones de la demanda de vapor.
- Menores exigencias de pureza en el agua de alimentación, porque las incrustaciones formadas en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y ser eliminadas por las purgas.

Inconvenientes:

- Mayor tiempo para subir la presión y entrar en funcionamiento.
- Menor vaporización específica y menor eficiencia térmica, aunque las más modernas presentan cifras comparables a las acuatubulares.
- No son utilizadas para altas presiones.

1.2. Características exclusivas de la caldera pirotubular Cleaver Brooks

La caldera Cleaver Brooks (figura 1) es una caldera integrada pirotubular, de construcción general de acero soldado, y consiste de un recipiente de presión, quemador, ventilador de tiro forzado, compuerta de aire, bomba de aire, refractario y componentes relacionados.

Los componentes son seleccionados para operar en forma conjunta, lográndose así la eficiencia térmica más alta, una operación confiable y una máxima seguridad.

Es una caldera compacta totalmente automática para diésel, gas o combinación de 60 a 800 caballos caldera vapor o agua caliente que cuenta con las siguientes ventajas:

- Considerable economía de combustible: construcción de cuatro pasos y tiro forzado; quemador de tiro eficiente.
- Mantenimiento sencillo: puertas embisagradas o suspendidas; tablero de control modular, quemador retráctil.
- Operación silenciosa: único ventilador sin caja que reúne los estrictos requisitos de nivel de ruido. Es decir, que el nivel de presión sonora por el funcionamiento del ventilador no sobrepasa los 85 decibeles.
- Superficie de calefacción 0,465 m² por cada caballo caldera, la mayor área en calderas compactas.
- Automática, segura: gabinete de control a la altura de los ojos del operador; controles de combustión centralizados; fuego modulado; protección electrónica de flama.
- Control de combustible: precalentador de combustible eléctrico y de vapor, controlador de aceite combustible integrado; leva dosificadora de combustible.
- Combustión limpia: relaciones aire combustible balanceado, compuerta rotatoria, compresor de aire de diseño CB, quemador de diseño eficiente para diésel o gas.

Figura 1. Caldera Cleaver Brooks



Fuente: Pepsico, S. A.

Componentes principales de la caldera Cleaver Brooks (CB)

- Quemadores CB contruidos integralmente

Diseñados para una combustión limpia, las calderas CB están garantizadas para operar hasta con el 85 % de eficiencia en gas o aceite combustible. El quemador de atomización por aire a baja presión ha comprobado su eficiencia con aceite ligero (diésel) o aceites pesados. La boquilla del quemador hace una atomización del aceite combustible tan perfecta, que lo quema como si fuera gas.

La boquilla del quemador requiere alrededor de 40 segundos para ser quitada y reemplazada en la caldera. Las mangueras flexibles permiten al

operador quitar el quemador para la inspección o limpieza sin desconectar las líneas de aceite o abrir la tapa frontal.

- Tablero de control modular

Los módulos polarizados, por medio de clavijas, pueden ser utilizados para convertir la caldera de diésel a gas o viceversa, combinación de combustibles o a cualquier tipo de combustible disponible sin necesidad de realimentar el gabinete de control.

- Exclusivo ventilador sin caja

Corazón del eficiente y silencioso sistema de tiro forzado. El impulsor centrífugo de aluminio vaciado provee aire para la combustión en relación balanceada con el combustible proporcionado. Nunca necesita limpieza.

- Compuerta rotatoria

Este control de aire, maquinado, con acción de autolimpieza ofrece control adecuado del aire y estabilidad en la combustión. En conjunto con la leva dosificadora provee exactas relaciones de aire-combustible tan necesarias para mantener una alta eficiencia en la combustión.

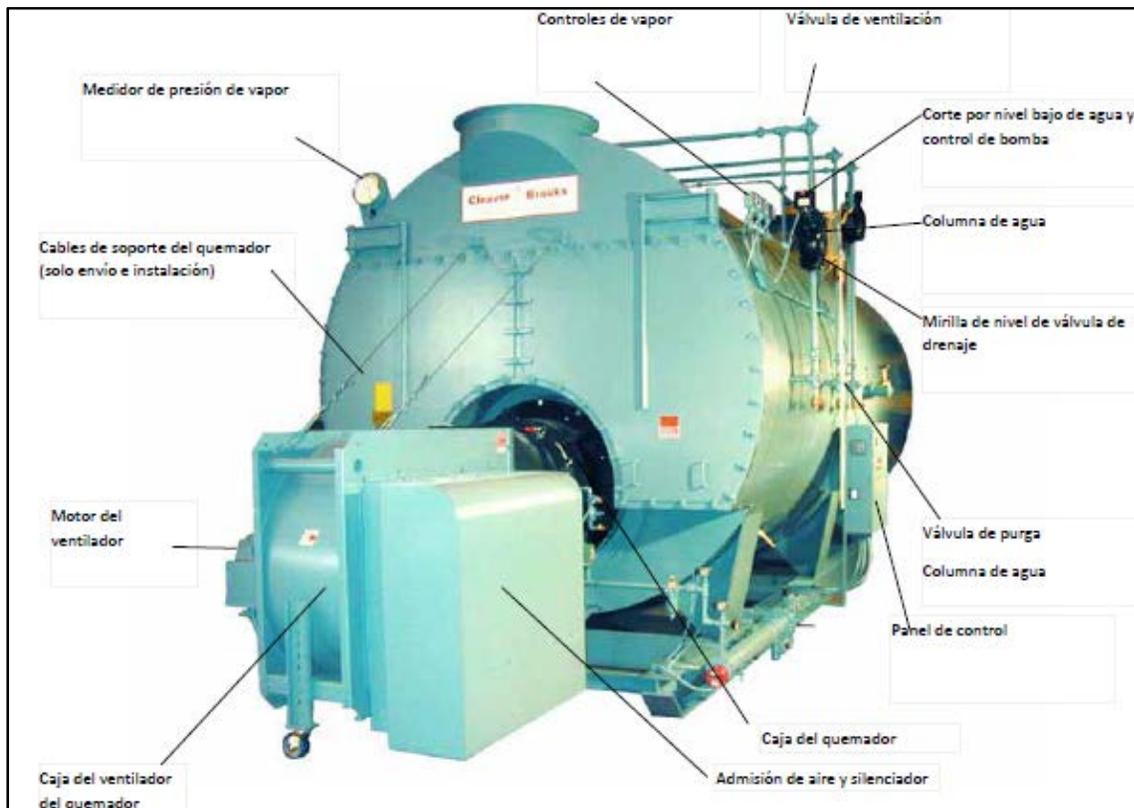
- Puertas embisagradas patentadas

Las puertas se abren rápido y fácilmente sin necesidad de desconectar alambrado eléctrico, líneas de combustible o líneas de fuerza.

- Leva dosificadora

La leva que controla el flujo de combustible está diseñada de tal manera, que proporciona el aire requerido para la combustión del diésel o el gas. Un orificio variable asegura excelentes características de flujo con respecto a la viscosidad del diésel. Para cualquier carga se mantiene una excelente relación aire-combustible.

Figura 2. Componentes caldera Cleaver Brooks



Fuente: Pepsico, S. A.

Tabla I. **Dimensiones generales, capacidades y características de la caldera**

Marca	Cleaver Brooks
Modelo	CB – 200 – 300 -150
Serie número	OL107666
Capacidad	300 B.H.P
Combustible	Diésel, gas o combinación
Ignición	Automática
Quemador (diésel)	Diésel: atomización de aire
Quemador (gas)	Sin premezcla – tipo orificio
Válvula de aire	Tipo con rejilla de ventilación (modulada eléctricamente)
Compensador de vapor	Código ASME
Compensador de agua	Código ASME
Presión de diseño	150 PSI
Presión de operación	135 PSI
Cantidad de pasos	4
Capacidad nominal Lb/h vapor a 100 °C	10,329
Superficie de calefacción m²	139,5

Fuente: elaboración propia.

1.3. Características de funcionamiento y operación de los quemadores duales

Los quemadores son dispositivos que permiten realizar la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia especificada y distribuyendo la zona de reacción (llamas) y la circulación de los productos de combustión de modo que se transfiera a la carga, del modo más eficiente posible, todo el calor producido.

Los quemadores son dispositivos responsables de:

Mezclar adecuadamente el combustible y el aire en las proporciones correctas, para obtener una combustión completa.

Determinar la forma y dirección de la flama.

- Rango del quemador

Una característica muy importante de los quemadores es su rango de operación. Esto se expresa como la relación entre su máxima capacidad (para quemar combustible), dividida entre su máxima capacidad controlable.

El rango de operación no es simplemente el hecho de forzar diferentes cantidades de combustible dentro del hogar de la caldera desde una perspectiva económica y ambiental que el quemador realice una combustión adecuada y eficiente, además de cumplir las regulaciones ambientales dentro de todo su rango de operación.

- Quemadores para combustibles líquidos

Existen dos clases fundamentales de quemadores de combustibles líquidos:

- Quemadores de gasificación o vaporización: en los que la llama, por radiación sobre la superficie del combustible líquido, produce la vaporización de este, el cual se incorpora a la llama y mantiene la combustión.

Este sistema tiene una doble limitación de uso: por un lado se aplica a quemadores pequeños (aproximadamente 15 KW); por el otro, solo es aplicable con combustibles ligeros.

- Quemadores de pulverización: son los generalmente utilizados. El combustible para ser pulverizado debe tener baja viscosidad, del orden de los 10 centistokes o 2 grados Engler, que solo presenta a baja temperatura los gasóleos y que requiere calentar a 110 °C el *fuel oil* pesado.

- Quemadores para gas

Los que mayormente se usan, para gas natural seco y gas líquido de petróleo, son del tipo atmosférico, particularmente para calentar a bajas temperatura, fácil ajuste y poco mantenimiento. Básicamente existen dos tipos de quemadores para gas: de baja y alta presión.

- Quemadores a baja presión

Usualmente estos operan entre los 2,5 y los 10 mbar. El quemador es un dispositivo tipo venturi simple, al cual se le introduce el gas en la zona de garganta, mientras que el aire para la combustión es succionado desde la parte posterior por el efecto venturi.

Figura 3. **Quemador retráctil caldera Cleaver Brooks**



Fuente: Pepsico, S. A.

- Quemadores de alta presión

Estos operan a presiones mayores, normalmente entre los 12 y los 175 mbar, y puede incluir varias toberas para producir una forma particular de la flama.

- Quemadores tipo dual

Como su nombre lo indica, estos pueden quemar combustible líquido o gaseoso; normalmente, se diseñan para utilizar gas como su combustible

principal, pero tiene las características de poder quemar además, combustibles líquidos como el combustóleo.

En general se basan en un quemador de *fuel oil* al que se le acopla un colector anular de gas que conduce este a la vena de aire.

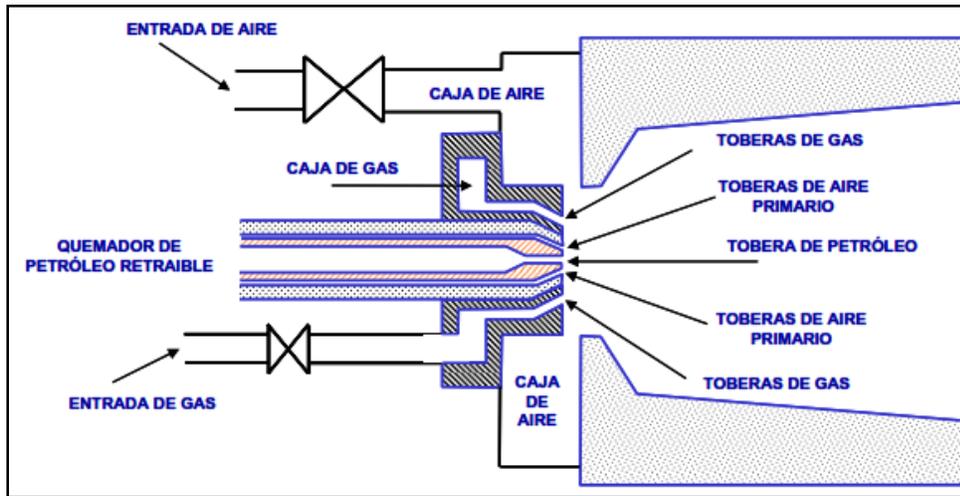
La estrategia más usual a la que recurren las empresas que cuentan con este tipo de quemadores, es tener un depósito de combustible líquido y usarlo cuando el suministro del gas se interrumpe.

El procedimiento de cambio se efectúa de la forma siguiente:

- Se cierra la línea de suministro de gas.
- Se abre la línea de suministro de combustible líquido.
- En el panel del control del quemador se selecciona: “combustible líquido” (*oil firing*), esto cambiará los parámetros de suministro de aire de combustión.
- Se purga y se vuelve a encender la caldera.

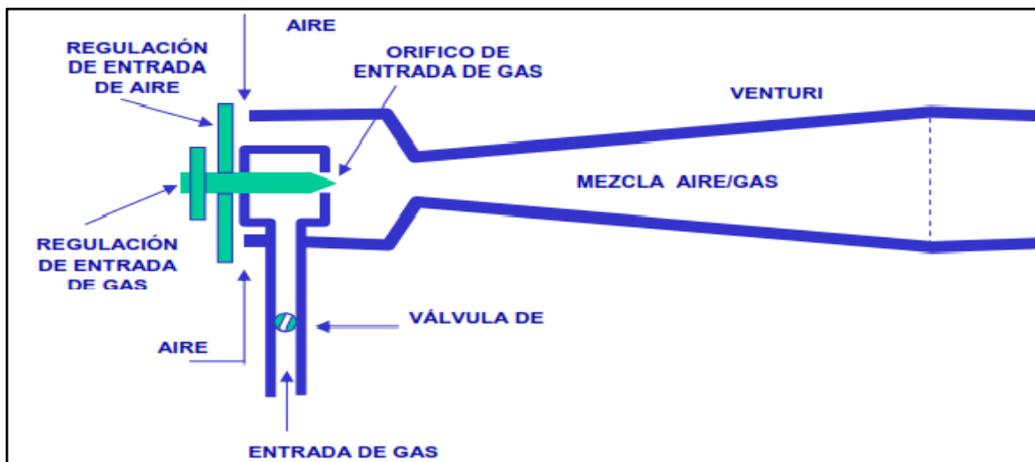
Esta operación puede ser llevada a cabo en un periodo de tiempo relativamente corto. Algunas empresas realizan este cambio periódicamente solo con el propósito de asegurarse de que los operarios están familiarizados con el procedimiento y que todo el equipo funciona adecuadamente.

Figura 4. Quemador tipo dual (gas/diésel)



Fuente: *Eficiencia en calderas y combustión*. <www.conae.gob.mx>. Consulta: 5 de agosto de 2014.

Figura 5. Quemador de gas a baja presión



Fuente: *Eficiencia en calderas y combustión*. <www.conae.gob.mx>. Consulta: 5 de agosto de 2014.

1.4. Rutina de operación y mantenimiento

Un programa de mantenimiento bien planeado evita reparaciones bien costosas o paros, promoverá la seguridad y ayudará a los inspectores de caldera. Debe establecerse un listado de procedimientos y una agenda de inspección. Es importante que se mantenga una bitácora o registro del cuarto de calderas. El registrar actividades de mantenimiento diarias, semanales, mensuales y anuales proveerá una guía valiosa que ayudará a obtener un largo y económico servicio del equipo. Se muestra una agenda de inspección de calderas en la tabla II.

Es importante dar a conocer que la frecuencia de inspección dependerá de condiciones variables tales como: carga, combustible, requerimientos, medio ambiente de la caldera (interiores/exteriores) entre otro.

Aunque la caldera tiene dispositivos mecánicos y eléctricos que permitan una operación automática o semiautomática, los dispositivos requieren mantenimiento periódico y sistemático. Cualquier característica automática no significa que el operador no tenga responsabilidades, sino que lo libera de ciertas tareas repetitivas para que tenga tiempo para el mantenimiento.

Si el operador está alerta de cualquier ruido inusual, lectura de medidor inapropiada, fugas entre otros, puede darse cuenta de una falla en desarrollo y permitir una acción correctiva expedita que prevenga mayores reparaciones o tiempo de paro inesperado. Cualquier fuga de: combustible, agua, vapor o gas, debe repararse prontamente y bajo condiciones que cumplan con las precauciones de seguridad.

Las medidas de mantenimiento preventivo, como revisar regularmente que las conexiones, tuercas, prensaestopas, entre otros, deben estar incluidas en las actividades de mantenimiento regular.

Tabla II. **Calendario recomendado de inspección de caldera**

Diario	Semanalmente	Mensualmente	Semianualmente	Actualmente
Revisar el nivel de agua	Revisar que la válvula de combustible esté bien apretada	Inspeccionar el quemador	Limpiar el corte por el nivel bajo de agua	Limpiar superficies en contacto con calor
Revisar visualmente la combustión Purgar la caldera	Revisar enlaces de aire y combustible Revisar luces y alarmas indicadoras	Buscar fuga en el gas de la chimenea Revisar levas	Limpiar el filtro de la bomba de aceite Limpiar el separador de aire/aceite y limpiador de aire Limpiar la alineación de acoplamiento de bomba de aire	Limpiar conexiones Inspeccionar superficies en contacto con agua Revisar las válvulas de seguridad de operación
Purgar la columna de agua	Revisar controles de límite y operación	Revisar que la válvula de combustible este bien cerrada Revisar enlace de combustible y aire	Quitar y limpiar el precalentador de aceite	
Registrar la presión/temperatura de agua de alimentación Registrar la temperatura de gas de chimenea	Revisar los controles de seguridad y boqueo Busque fugas, ruidos, vibraciones, condiciones inusuales etc.	Revisar luces y alarmas indicadoras		
Registrar la presión y temperatura de aceite Registrar la presión de gas Registrar la presión de aire de automatización		Revisar controles de operación y límite Revisar controles de seguridad y bloqueo Busque fugas, ruido, vibración, condiciones inusuales, etc. Analizar la combustión		
Registrar las temperaturas de alimentación y retorno de agua de caldera Registrar el uso de agua de compensación Registrar la presión de vapor Buscar condiciones inusuales, ruidos, etc. Tratar el agua de acuerdo con el programa establecido				

Fuente: *Manual de operación, servicio y partes CB.* Cleaver Brooks Company. p. 3.

2. COMBUSTIBLES INDUSTRIALES

2.1. Tipos de combustibles

Los distintos tipos de combustibles se clasifican como se describen en tabla III.

Tabla III. Tipos de combustibles

Sólidos	Naturales	Madera Carbón
	Artificiales	Carbón vegetal Coque Aglomerados y Briquetas
Líquidos	Derivados del petróleo	<i>Gas oíl</i> <i>Fuel oíl</i>
	Alcoholes	Naturales Artificiales
Gaseosos	Gas natural	Metano
	Gases licuados del petróleo (GLP)	Propano y butano
	Residuales	Fuel gas
	Artificiales	Gas de alto horno Gas pobre Gas de coquería

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Combustibles líquidos

La propiedad fundamental de los combustibles líquidos, tanto en lo que se refiere a su alimentación al quemador, como su comportamiento en el propio quemador (pulverización) es su viscosidad. Según sea esta, el control del caudal calorífico (caudal másico, como en el caso anterior, si el poder calorífico es constante), puede realizarse directamente o no.

Son mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo por medio de proceso de refinación. En el petróleo se pueden distinguir diferentes compuestos. Además de hidrocarburos (más de 40 de ellos diferentes) oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel, hierro, agua y sedimentos.

Los hidrocarburos presentes en el crudo son los siguientes:

- Parafínico (hidrocarburo saturado en forma de cadena $C_n H_{2N+2}$)
- Nafténico (de estructuras moleculares en forma de anillos $C_n H_{2N}$)
- Aromático (anillos no saturados $C_n H_{2N-6}$)

Dentro de este tipo de combustibles, los más utilizados en la industria son los derivados del petróleo, y se obtienen los siguientes hidrocarburos, usados en la industria:

- *Fuel Oil*: son los residuos pesados de la destilación del petróleo y forma de hidrocarburos entre 25 y 35 átomos de carbono. Su punto de inflamación es 65 °C, posee un poder calorífico inferior igual a 9 800 Kcal/Kg.

- Gasoil: pertenecen a esta categoría de destilados puros, compuestos por una gama de hidrocarburos cuyo número de átomos de carbono está comprendido entre 14 y 20. Su temperatura de ebullición oscila entre 220-390 °C. Su punto de inflamación es 55°C, posee un poder calorífico inferior o igual a 10 200 Kcal/Kg.

2.1.2. Combustibles gaseosos

Un combustible gaseoso, en comparación con los líquidos, es más fácil de manejar y su combustión es limpia y sin problemas de operación.

El gas es un combustible de fácil quemado, ya que para su combustión solo requiere ser mezclado con determinada cantidad de aire a condiciones óptimas de temperatura.

Dentro de este tipo de combustibles, los más usados industrialmente son:

- Gas natural: mezcla de hidrocarburos ligeros, formado principalmente por metano. Posee gran rendimiento, es de fácil manejo, su poder calorífico superior es igual a 9 300 Kcal/m³.
- Gas licuado de petróleo (GLP): compuesto por butano y propano. Se obtiene en las operaciones de refinado del petróleo. Se licua a baja temperatura y alta presión para almacenarlos (ocupan un volumen reducido en estado líquido, aumentando el mismo aproximadamente 300 veces a temperatura ambiente y presión atmosférica). Su poder calorífico inferior es igual a 10 950 Kcal/Kg.

- Clasificación de los combustibles gaseosos

Cuando un gas es capaz de reaccionar con el oxígeno del aire de forma rápida y con desprendimiento de energía térmica (proceso de combustión) se denomina gas combustible. Los combustibles gaseosos se clasifican en familias, según un parámetro llamado índice de Wobbe, que es la relación entre el poder calorífico del gas por unidad de volumen y la raíz cuadrada de su densidad relativa respecto del aire. El índice de Wobbe se denomina superior o inferior según el poder calorífico considerado sea superior o inferior. En la tabla IV se indican las familias y grupos de gases.

Clasificación según su origen:

- Primera familia: se incluyen los gases manufacturados, cuyo principal componente es el hidrógeno.
 - Segunda familia: se incluye el gas natural, cuyo principal componente es el metano.
 - Tercera familia: propano, butano y GLP.
- Butano

Es un hidrocarburo que está presente en el gas natural y puede ser obtenido cuando se refina el petróleo. Es un alcano gaseoso, su símbolo químico es C_4H_{10} . La ventaja principal del butano es que puede ser licuado fácilmente, esto significa que se puede utilizar en formas líquidas y gaseosas.

- Propano

Es un alcano gaseoso que puede ser obtenido cuando se refina el petróleo, es incoloro, el símbolo químico es C_3H_8 , puede ser licuado cuando se comprime o se enfría. La ventaja principal del propano es, que tal como el butano se puede licuar fácilmente.

Tabla IV. **Clasificación de los gases**

FAMILIAS Y GRUPOS DE GASES	NÚMERO DE WOBBE BRUTO A LAS CONDICIONES ESTÁNDAR DE 15 °C Y 1013,25 mbar	
	Mínimo (Mj/m ³)	Máximo (Mj/m ³)
Primera familia (gas de ciudad) Grupo A	22,4	24,8
Segunda familia (gas natural) Grupo H Grupo L Grupo E	39,1 45,7 39,1 40,9	54,7 54,7 44,8 54,7
Tercera familia (GLP) Grupo B/P Grupo P Grupo B	72,9 72,9 72,9 81,8	87,3 87,3 76,8 87,3

Fuente: elaboración propia.

2.2. Características y propiedades de cada combustible

Combustible

Es toda sustancia capaz de arder, es decir, que puede combinarse con el oxígeno en una reacción exotérmica.

Las características más importantes de los combustibles son:

- Poder calorífico (PC): es la energía por unidad de masa del combustible que se libera en una combustión completa y perfecta.
- Poder calorífico superior (PCS): tiene en cuenta el vapor latente de vaporización del agua generada en la combustión.
- Poder calorífico inferior (PCI): no tiene en cuenta el calor latente de vaporización del agua formada en la combustión.
- Poder calorífico bruto (PCB): es la cantidad total de energía contenida en el combustible. Sin embargo, la mayoría de los combustibles contienen hidrógeno, que durante el proceso de la combustión se mezcla con el oxígeno del aire para formar agua, la cual pasa a la chimenea en forma de vapor.
- Poder calorífico neto (PCN): es la cantidad de calor que se produce en la combustión, con exclusión del calor no recuperable. Equivale al calor del proceso de combustión que se aprovecha en la práctica. Para el carbón (sólidos) y los combustibles líquidos es un 5 % menor que el PCB, para las diversas modalidades de gas natural y procesado es el

10 % mientras que en la electricidad no hay diferencia alguna entre el PCN y PCB.

- Poder comburívoro: es la masa del aire necesaria para realizar la combustión estequiométrica de 1 Kg. de combustible. La cantidad estequiométrica de aire seco necesario para la combustión completa de una unidad de masa o volumen de combustible, referida a las condiciones normalizadas, medido en metros cúbicos normales por kilogramo, según se trate de combustible líquido, sólido o bien gaseoso, respectivamente.(Wikipedia)
- Poder fumífero: es la masa de humos secos producidos en la combustión de 1 Kg de combustible. La cantidad de gases resultantes de la combustión con aire estequiométrico de una unidad de masa o volumen de combustible, referida a las condiciones normalizadas, medido en metros cúbicos normales por kilogramo, según se trate de combustible líquido, sólido o bien gaseoso, respectivamente.
- Límites de inflamabilidad (inferior/superior) (Li/Ls): es el valor mínimo/máximo del porcentaje de combustible que debe estar presente en la mezcla para que se produzca la combustión.
- Temperatura de combustión: es la temperatura, superior a la de inflamación, a la que se produce la combustión de los vapores de un combustible durante 5 o más segundos cuando se pone en contacto con una llama.
- Poder calorífico del GLP: es la cantidad de energía calorífica contenida en una cantidad definida de un combustible, que puede ser liberada al

quemarse completamente. Se expresa en calorías por gramo o kilocalorías por kilogramo (Kcal/Kg). Puede ser medido en forma bruta (PCS) o neta (PCI).

- Calor latente de evaporación del GLP: es la cantidad de calor que debe proporcionarse a una unidad de masa, de una sustancia en estado líquido y en su punto de ebullición, para llevarla al estado de vapor. Como el GLP líquido se evapora, el calor latente correspondiente es absorbido del recipiente que lo contiene y la presión es consecuentemente reducida.
- Peso específico del GLP: en estado gaseoso, es más pesado que el aire y, en estado líquido más ligero que el agua. En estado de vapor 1 litro de GLP pesa 2 gramos, 1 litro de aire pesa 1 gramo; por lo que si se libera lentamente en una atmósfera en calma, tiende a descender; de existir una corriente o una leve brisa el gas es disipado rápidamente. En estado líquido un litro de GLP pesa 500 gramos, un litro de agua pesa 1 000 gramos.

Las propiedades más importantes de los combustibles líquidos son:

- Viscosidad: resistencia de un fluido a fluir (sirve para determinar la pérdida de carga y las condiciones de pulverización).
- Punto de fluidez crítica: temperatura a la cual el fluido deja de fluir.
- Inflamabilidad: el punto de llama es la temperatura a la cual el combustible produce suficiente cantidad de vapores para que la mezcla de estos con el aire sea capaz de inflamarse al contacto con una llama piloto. Si la

combustión se produce en forma espontánea, sin llama piloto, la temperatura a la cual se produjo se denomina punto de inflamación del combustible. Por esta razón, no debe almacenarse un combustible a temperaturas superiores a su punto de inflamación.

- Contenido de azufre: en una combustión, el azufre genera dióxido de azufre en combinación con el oxígeno del aire. Si el tiro no funciona correctamente puede condensar el vapor de agua generado en la combustión, y este en combinación con el dióxido de azufre dan como resultado ácido sulfúrico (agente corrosivo para la instalación).
- Contenido de agua: en un combustible disminuye su poder calorífico; razón por la cual, la misma debe eliminarse o bien minimizarse.

Las propiedades más importantes de los combustibles gaseosos son:

- Densidad relativa (ρ_r): con respecto al aire seco a 0° y 1 atmósfera de presión.
- Intercambiabilidad de los gases combustibles: dos gases que están a la misma temperatura son intercambiables entre sí en un mismo quemador cuando, con las mismas condiciones de suministro, mantienen las mismas características de combustión (dan llamas idénticas sin cambiar la regulación y geometría de los quemadores).

Para determinar la intercambiabilidad se utiliza en índice de Wobbe:

$$W = \frac{PC}{\sqrt{\rho_r}}$$

Donde:

PC = poder calorífico

pr = densidad relativa

- Módulo de un gas: dos gases de índice de Wobbe diferente son intercambiables entre sí, cuando al suministrarles presiones diferentes, tienen el mismo módulo y producen el mismo caudal calorífico. El módulo de un gas es:

$$w = \sqrt{p/W}$$

Donde:

W = módulo de un gas

p = presión

w = índice de Wobbe

Tabla V. **Características de los combustibles**

Tipo de combustible	Poder calorífico neto/inferior (Mj/bl)/Kcal/Kg	Poder calorífico BTU/GAL	Eficiencia	Azufre total, %masa
Gas licuado (GLP)	3 765 – 10 950	94,85	0,98	0,02
Diésel	5 426 – 9 800	129	0,95	0,29

Fuente: elaboración propia.

2.3. Importancia y criterios para la elección de un combustible

Los criterios a tener en cuenta para la elección del combustible a utilizar dependen de la disponibilidad y costo del mismo. Para determinar cuál es el más económico, deberán considerarse los siguientes puntos:

- La ubicación geográfica de la industria
- Las posibilidades de aprovisionamiento
- El precio del combustible
- Problemas ambientales derivados de su uso
- Contenido de energía
- Eficiencia de operación
- Mantenimiento y limpieza

Importancia de la elección de un buen combustible en las calderas

- Los combustibles están caracterizados por su poder calorífico, grado de humedad y los porcentajes de materias volátiles y de cenizas.
- Estos datos son de gran utilidad para determinar las condiciones prácticas de la combustión, pero no son suficientes para estudiar el mecanismo de las diferentes combinaciones químicas.

- El análisis químico es lo que permite distinguir los diferentes elementos (puros) que constituyen el combustible. Estos se pueden clasificar en dos grandes categorías:
- Elementos activos, es decir: combinables químicamente con el comburente, cediendo calor, carbono, hidrógeno, azufre, entre otros.
- Elementos inherentes, que no se combinan con el comburente y que pasarán como tales a los residuos de la combustión: agua nitrógeno, cenizas, entre otro.

2.4. Operación de manipuleo: transporte y almacenamiento

Los combustibles líquidos necesitan transportarse desde la planta de venta hacia el lugar de consumo, para luego almacenarlo y finalmente usarlo.

Es cuanto se tiene que pagar esta operación, y a la vez, se incrementa el precio del combustible líquido. Por último, en esta operación se tiene que tener cuidado por los problemas del impacto ambiental, en el manipuleo y de seguridad, como cualquier otro combustible.

El primer proceso al que se somete el petróleo en la refinería, es la destilación para separarlo en diferentes fracciones. La sección de destilación es la unidad más flexible en la refinería, ya que las condiciones de operación pueden ajustarse para poder procesar un amplio intervalo de alimentaciones, desde crudos ligeros hasta pesados. Dentro de las torres de destilación, los líquidos y los vapores se separan en fracciones de acuerdo a su peso molecular y temperatura de ebullición.

Las fracciones más ligeras, incluyendo gasolinas y gas LP, vaporizan y suben hasta la parte superior de la torre donde se condensan.

Los líquidos medianamente pesados, como el querosín y la fracción diésel, se quedan en la parte media. Los líquidos más pesados y los gasóleos ligeros primarios, se separan más abajo, mientras que los más pesados en el fondo.

Las gasolinas contienen fracciones que ebulen por debajo de los 200 °C mientras que en el caso del diésel, sus fracciones tienen un límite de 350 °C. Esta última contiene moléculas de entre 10 y 20 carbonos, mientras que los componentes de la gasolina se ubican en el orden de 12 carbonos o menos.

El gas licuado de petróleo (GLP) se produce en estado de vapor, pero se convierte en líquido mediante compresión y enfriamiento simultáneo de estos dos vapores, necesitándose 273 litros de vapor para obtener 1 litro de gas líquido. En cuyo estado se le transporta y maneja desde las refinerías, a las plantas de almacenamiento y de estas a los usuarios, ya sea por autotanques o cilindros portátiles, en donde el gas sale en estado de vapor para poder ser utilizado en calderas, vehículos y aparatos domésticos. El GLP se licúa, porque de este modo es más fácil transportarlo y almacenarlo. En la práctica se puede decir, que el GLP es una mezcla de propano y butano.

- Licuación

En estado gaseoso el GLP es muy similar en sus características al gas natural y como este, también puede ser utilizado como fuente de energía y de refrigeración. En estado líquido es similar a la gasolina en la forma en que es transportado, almacenado y medido; pero con esta diferencia esencial, para mantenerlo como líquido el GLP debe estar bajo presión.

Los gases licuados de petróleo son fácilmente condensables a líquidos, a la temperatura atmosférica normal por la aplicación de presión. Es la propiedad que los hace valiosos como combustibles, ya que pueden ser transportados, almacenados y manejados con la conveniencia de un líquido. El que el GLP esté en su estado físico líquido o gaseoso depende de 3 factores físicos: presión, temperatura y volumen.

Figura 6. Lugares y formas de obtención del GLP



Fuente: *Procedencia estratégica y sostenible del GLP*. < www.biblioteca.unet.edu.ve/db/alexandr/db/bcunet/.../Capituloll.pdf >.

Consulta: 8 de agosto de 2014.

- Manejo del GLP como vapor y líquido

Para manejar en forma adecuada y segura el GLP, es vital conocer su presión de vapor, ya que tanto el diseño del equipo, como el manejo GLP están influenciadas por esta. La presión de vapor en un recipiente de GLP está determinado solo por dos factores: la cantidad relativa de cada hidrocarburo presente en la mezcla y la temperatura que tenga.

La temperatura del líquido depende de la transferencia de calor del ambiente, la cual es relativamente lenta, por lo que la temperatura de los recipientes raramente llega a la temperatura atmosférica máxima y está regulada 16 °C por debajo de esta.

- Almacenamiento

Para almacenar y transportar el GLP se utilizan cilindros, cuya capacidad volumétrica total no excede de 0,12 m³ de contenido de agua a condiciones de referencia (100 libras de contenido de GLP), y que, por su tamaño y peso permiten ser transportados manualmente con cierta facilidad. Adicionalmente pueden ser transportados llenos como recipiente portátil, y a la vez, permite ser llenado en sitio y ser usado como recipiente estacionario. Para esta última condición se requiere que el recipiente disponga de un indicador de máximo lleno.

- Análisis de riesgos en los cilindros

Las fallas más frecuentes en las actividades de llenado, transporte y uso final de los cilindros de GLP se deben a fallas mecánicas de los materiales con los cuales están contruidos los cilindros y a falla por escape en las válvulas. Estas fallas aumentan de frecuencia cuando el cilindro se encuentra es su etapa de uso final, por parte de los usuarios.

- Transporte

El gas al ser comprimido y enfriado se condensa hasta convertirse en líquido, en cuyo estado se le transporta y maneja desde las refinerías, a las plantas de almacenamiento y de estas a los usuarios, ya sea por autotanques o

recipientes portátiles, en donde el gas sale en estado de vapor para ser utilizado en calderas, aparatos domésticos y vehículos.

Tabla VI. **Cantidad de energía transportada según el combustible**

PRODUCTO	1 Kg =BTU
Diésel	43,197
Gasolina	44,513
GLP	47,535
GNL	52,325

Fuente: elaboración propia.

Clasificación de acuerdo con la seguridad de transporte y manejo

- Líquidos combustibles clase I: punto de inflamabilidad por debajo de 100 °F y presión de vapor menor a 40 psi (dividido en IA, IBI C).
- Líquidos combustibles clase II: con punto de inflamabilidad entre 100 y 140 °F.
- Líquidos combustibles clase III: con punto de inflamabilidad mayor a 140 °F

3. EFICIENCIA EN LA CALDERA Y COMBUSTIÓN

3.1. Métodos para calcular la eficiencia de calderas

La eficiencia de una caldera, corresponde a la razón entre el calor absorbido (por el agua, vapor, fluido térmico, entre otros) y el calor liberado en el equipo. La diferencia entre el calor liberado y el calor absorbido corresponderá a las pérdidas de calor de la caldera.

El proceso para calcular la eficiencia comienza con la determinación, lo más precisa posible, de la cantidad de energía que entra al proceso. Para esto es necesario conocer cuánto combustible se está quemando y su poder calorífico (PCB), es decir, cuántos joule se suministran por cada kilogramo o metro cúbico de combustible.

La eficiencia de la caldera es el porcentaje de la energía contenida en el combustible alimentado (energía que entra a la caldera), que sale en el vapor producido (energía convertida en vapor o aprovechada).

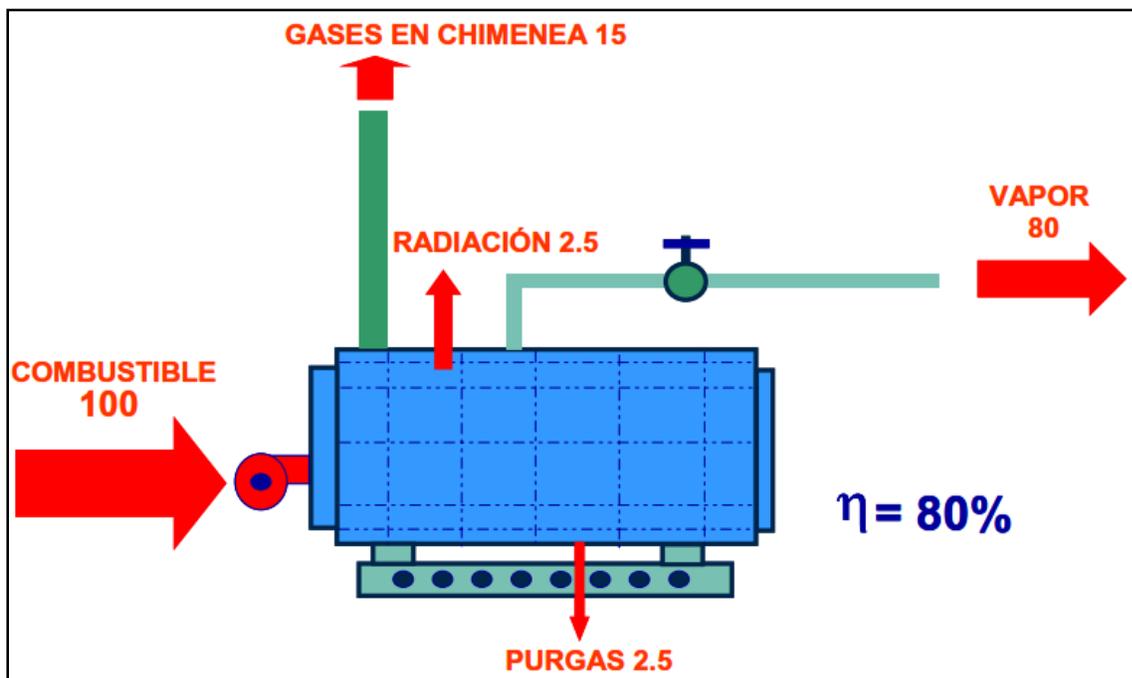
- Limitaciones

La eficiencia de una caldera está limitada, entre otros factores, por la temperatura de rocío y el exceso de aire necesario. El punto de rocío ácido es la temperatura de los gases de combustión en la cual se empieza a condensar ácido sulfúrico y otros ácidos en la chimenea de la caldera.

Este fenómeno, debido al contenido de azufre en algunos combustibles, no permite que se pueda recuperar todo el calor suministrado por el combustible y que sale con los gases de combustión.

También, debido a que se necesita suministrar más aire que el requerido teóricamente para la combustión, aumenta el volumen de los gases de combustión que sale por la chimenea, acarreando una cantidad mayor de calor.

Figura 7. Forma gráfica de la eficiencia de una caldera



Fuente: *Bases para el ahorro de energía en calderas y sistemas de vapor.*

< www.conae.gob.mx>. Consulta: 10 de agosto de 2014.

- Métodos para calcular la eficiencia en las calderas

Método directo

Este método, la eficiencia en una caldera se define como la relación entre la energía aprovechada en la transformación del agua en vapor y la energía suministrada por el combustible. Se expresa normalmente en forma de porcentaje:

$$\text{Eficiencia de la caldera} = \frac{\text{Calor que sale con el vapor producido}}{\text{Calor suministrado por el combustible}} \times 100$$

Calor que sale (exportado) con el vapor

Este valor se calcula mediante el uso de tablas de vapor; para esto se necesita conocer:

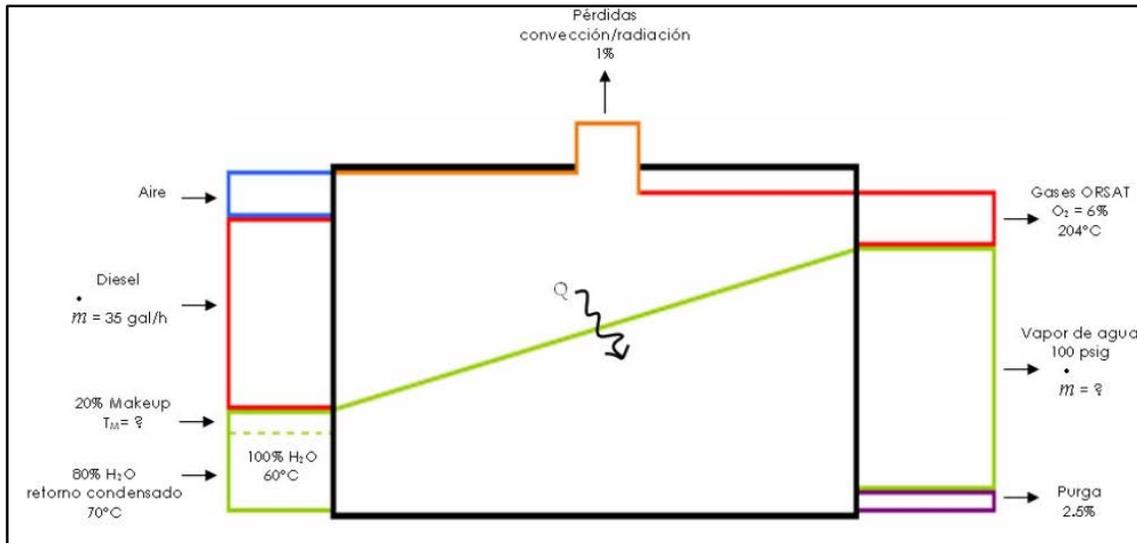
- La temperatura del agua de alimentación
- La presión a la cual se está produciendo el vapor
- El flujo de vapor

Calor suministrado por el combustible

Se calcula con base en la cantidad de combustible suministrado (m) y su poder calorífico (PC):

$$Q_{\text{suministrado}} = m \times \text{PC}$$

Figura 8. Representación Sankey de los flujos de energía en una caldera



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Método indirecto

En el método indirecto o de pérdidas, la eficiencia se calcula restándole a 100 el valor de las pérdidas de calor; también se expresa como un porcentaje:

$$\text{Eficiencia de la caldera} = (100 - \text{pérdidas}) \%$$

Dentro de las pérdidas se consideran:

- Pérdidas de calor sensible en gases de combustión
- Pérdidas por combustible no quemado
- Pérdidas por radiación
- Pérdidas de calor en purgas y otros

- Pérdidas de calor

Además de los problemas que se tienen en el quemador, el hogar y los derivados de la relación aire/combustible para obtener una combustión completa y eficiente, existen otras fuentes de pérdidas de calor y eficiencia. La evaluación de estas se utiliza para determinar la eficiencia de la caldera en el método indirecto o de pérdidas.

- Pérdidas de calor en gases de combustión

La pérdida de calor asociada a los productos (gases) de la combustión (en chimenea) representa alrededor de un 18 % para el caso de las calderas que utilizan gas y 12 % para el caso de las calderas que utilizan carbón y petróleo.

Las pérdidas se producen debido a la temperatura y volumen de los gases que salen por la chimenea: a mayor temperatura de los gases, menor es la eficiencia de la caldera.

Los gases pueden estar demasiado calientes por una, de dos razones:

- El quemador está produciendo más calor que el que se requiere para la carga específica de la caldera.
- Esto indica que el quemador(es) y el mecanismo de la compuerta de aire requieren mantenimiento y recalibración.
- Las superficies de calefacción de la caldera no están funcionando correctamente y el calor no se está transfiriendo al agua. Esto significa

que las superficies de calefacción están sucias o con incrustaciones y necesitan limpieza.

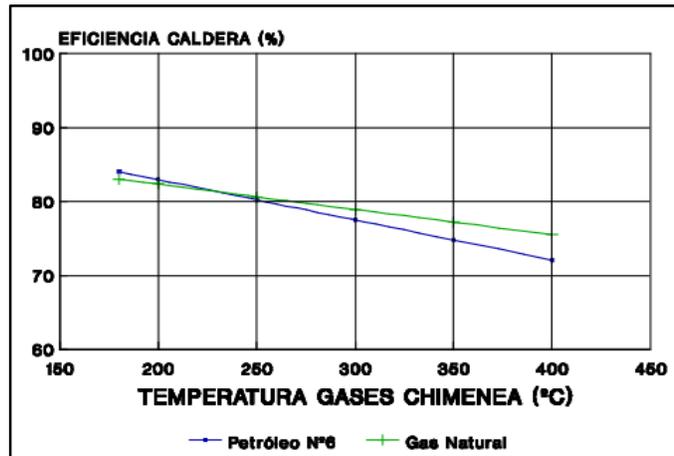
Se debe tener cuidado al reducir la temperatura de los gases de combustión, ya que demasiado enfriamiento puede reducir la temperatura de los gases por abajo del punto de rocío, lo que aumenta la posibilidad de corrosión por la formación de:

- Ácido nítrico (del nitrógeno del aire utilizado para la combustión)
- Ácido sulfúrico (si el combustible contiene azufre)
- Agua

En la figura 9 se observa la relación entre la eficiencia y la temperatura de los productos de la combustión en la chimenea para el caso del gas natural y el petróleo residual.

En las figuras 10 y 11 se observa la influencia de hollín (ensuciamiento lado de gases) e incrustaciones (ensuciamiento lado de agua) en la eficiencia de una caldera. Tanto el hollín como las incrustaciones actúan como aislantes, deteriorando el flujo de calor entre los productos de la combustión y el fluido contenido en la caldera. La acumulación de incrustaciones es especialmente crítica, ya que trae consigo problemas de refrigeración de las superficies metálicas de una caldera, pudiendo provocar daños catastróficos por sobrecalentamiento.

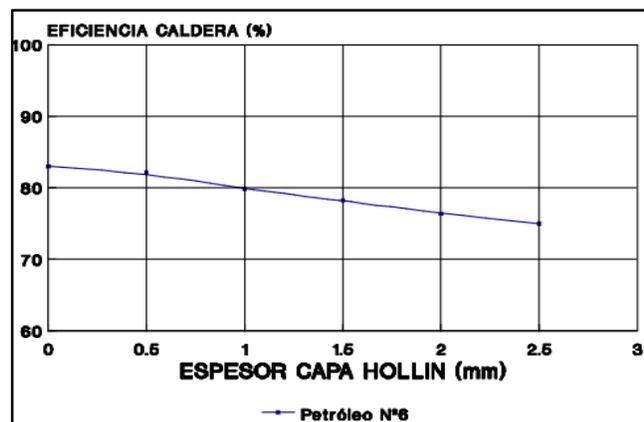
Figura 9. **Eficiencia versus temperatura de los productos de combustión**



Fuente: *Análisis de eficiencia de la caldera.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

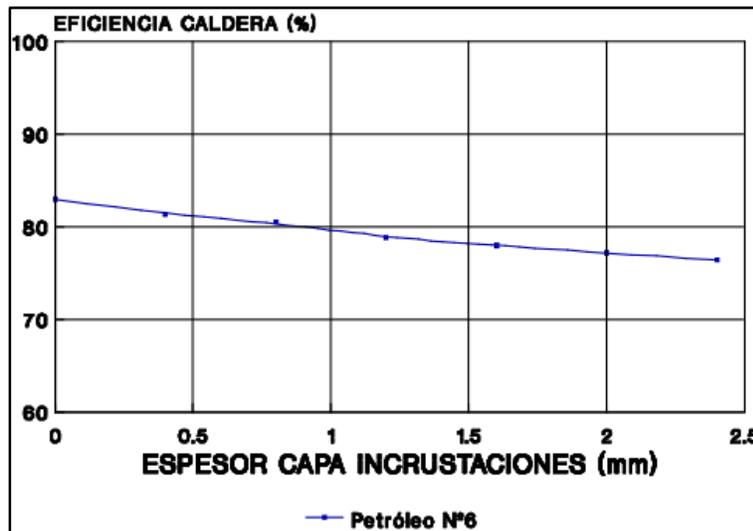
Figura 10. **Eficiencia versus espesor capa hollín (lado de fuego)**



Fuente: *Análisis de eficiencia en calderas.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

Figura 11. **Eficiencia versus espesor de las incrustaciones (lado de agua)**



Fuente: *Análisis de eficiencia de caldera.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

- Pérdidas por radiación

Debido a que la caldera (su envolvente) está más caliente que el medio ambiente donde se encuentra, una parte de su calor se transfiere a su alrededor.

Un aislamiento dañado, o mal instalado, aumentará considerablemente el potencial de pérdida de calor por radiación.

Una caldera de tubos de humo de agua, de 5MW, razonablemente bien aislada, tendrá una pérdida por radiación de 0,3 a 0,5 % de su energía.

En las calderas de menor potencia, el porcentaje de pérdida por radiación puede variar desde 1,3 % para una caldera de 600 CC hasta 3,0 % para una caldera de 50 CC.

Es posible que no parezca una cantidad considerable, pero estos porcentajes corresponden a plena carga y esta pérdida permanecerá constante, incluso si la caldera no está enviando vapor al proceso y se mantiene simplemente en *stand by*.

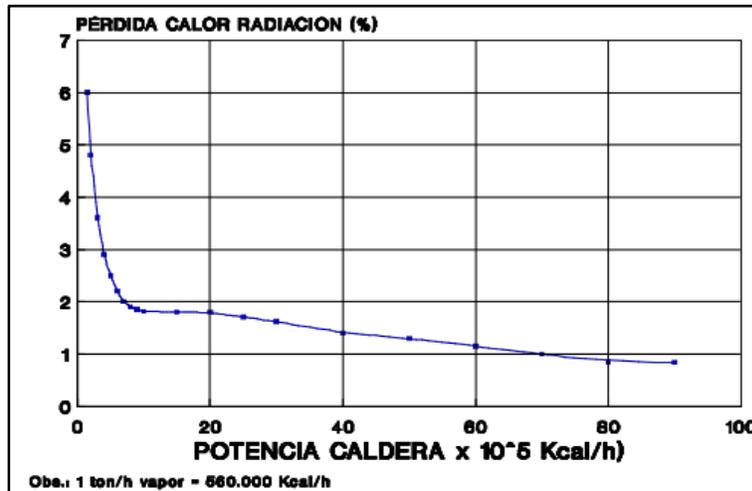
En la relación a la pérdida de calor por radiación de una caldera, su valor es constante, independiente de la carga a la que se encuentra operando, sin embargo, su influencia en la eficiencia varía con la carga de la caldera. En la tabla VII se observa cómo aumenta la incidencia (porcentual) de la pérdida de calor por su radiación en la eficiencia de la caldera al disminuir la carga; a pesar de que su valor se mantiene constante, independiente de la carga.

Tabla VII. **Relación entre pérdida de calor por radiación y carga de la caldera**

Carga caldera (%)	Pérdida por radiación (Kcal/h)	Calor liberado (Kcal/h)	Pérdida calor radiación (%)
10	224	1 120	20
25	224	2 800	8
50	224	5 600	4
100	224	11 200	2

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Pérdida de radiación *versus* potencia caldera



Fuente: *Análisis de eficiencia de calderas.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

- Pérdidas en purgas

El objetivo de esta operación es la extracción de sólidos disueltos y su suspensión dentro de la caldera, ya que al vaporizarse el agua, la concentración de sólidos aumenta en el agua que queda, lo cual conduce a problemas de incrustación importantes, ya que, entre otros efectos negativos, reduce significativamente la tasa de transferencia de calor del combustible al agua, reduciendo con ello la eficiencia de la caldera.

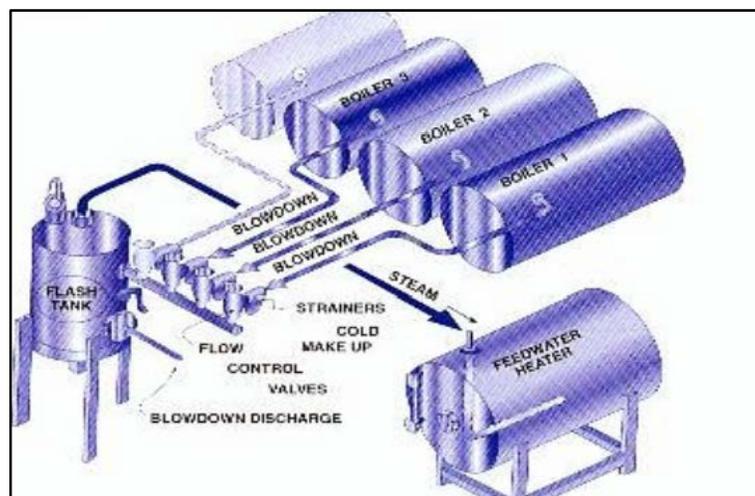
La purga se realiza extrayendo agua de la parte inferior de la caldera, donde se encuentran más concentrados los sólidos disueltos y en suspensión, e introduciendo agua de alimentación con una concentración muy baja. Hay que buscar el nivel adecuado de purga que se le debe dar a una caldera, una purga

insuficiente no impide la formación de fangos, incrustaciones y arrastres mientras que una purga excesiva producirá una pérdida de calor elevada.

Todos aquellos mecanismos tendientes a reducir la cantidad de agua/vapor eliminada a través de la purga de la caldera, permitirán conseguir una reducción en las pérdidas de calor asociadas a la purga. Entre estos mecanismos figura un óptimo tratamiento de agua, el uso de purgas continuas (operadas por sistemas de control, que incluyen la medición de las características del agua).

También es posible considerar la incorporación de sistemas recuperadores de calor en los de purga de una caldera. El vapor presurizado generado en el estanque de expansión es conducido al estanque de almacenamiento de agua, como medio de precalentamiento, y el agua o condensado puede ser utilizado para el precalentamiento del agua de reposición en un intercambiador de calor.

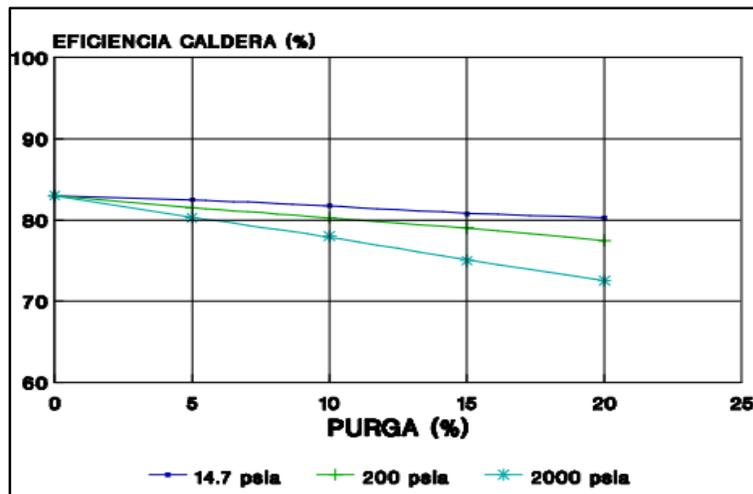
Figura 13. **Sistema de recuperación de calor de la purga**



Fuente: *Análisis de eficiencia de caldera.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

Figura 14. **Relación entre el porcentaje de purga y eficiencia de una caldera, de acuerdo a la presión de trabajo**



Fuente: *Análisis de eficiencia en caldera.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consulta: 12 de agosto de 2014.

- Pérdidas de calor asociadas a la operación dinámica y puntos de máxima eficiencia: estas pueden ser considerables y tienen relación con un sobredimensionamiento de la caldera con respecto a la demanda de energía (vapor, agua caliente, etc.). La operación dinámica de una caldera se refiere a las variaciones de carga y a los ciclos de encendido y apagado que realiza. Lo ideal es que una caldera trabaje en forma continua, no apagándose jamás.

La importante pérdida de energía asociada a los ciclos de encendido/apagado tiene relación con la pérdida de calor por radiación y la pérdida de calor asociada al aire que pasa a través de la caldera durante la ventilación que forma parte de cada secuencia de encendido de un quemador,

así como también, el aire que pasa a través de la caldera cuando está detenido debido a la acción del tiraje natural de equipo.

Para reducir esta pérdida es necesario definir correctamente el tamaño de la caldera requerida para cierto proceso productivo, o bien, ajustar el tamaño de las boquillas del quemador para asegurar un funcionamiento continuo.

En caso de disponer más de una caldera, es sumamente importante conocer la curva de eficiencia en relación a la carga, para definir la combinación ideal de estos equipos, que permitan la operación en puntos de máxima eficiencia.

- Pérdidas de calor, debido a no contar con un sistema de precalentamiento del aire requerido para la combustión

El precalentamiento del aire requerido para la combustión es utilizado, principalmente, en calderas que utilizan combustibles sólidos (carbón, madera, biomasa, entre otros).

Para el caso de las calderas que utilizan combustibles líquidos y gaseosos es posible instalar un sistema donde se aprovecha la estratificación del aire existente, generalmente, en una sala de calderas.

El sistema contempla la aspiración de aire de mayor temperatura, el cual existe en la parte alta de la sala de calderas. Se estima que con este tipo de sistema sería posible lograr un aumento en la eficiencia y con ello ahorros anuales de combustible cercanos al 1 %. Sin embargo, la mayor temperatura del aire para la combustión traerá consigo temperaturas de llama más altas y con ello un aumento en la formación de óxidos de nitrógeno.

- Pérdida de calor asociada al exceso de aire: el concepto de exceso de aire tiene relación con la cantidad de aire para la combustión que debe ser entregado por sobre el estequiométrico, para lograr una buena mezcla aire/combustible y con ello una buena combustión. La magnitud del exceso de aire requerido por una caldera varía, principalmente de acuerdo al tipo de combustible y a la tecnología del quemador. Conforme el exceso de aire se reduce, la temperatura de flama aumenta.

A mayor temperatura de flama, la transferencia de calor por radiación es más intensa; por lo mismo, si la temperatura en la sección de radiación de la caldera se reduce por bajar la temperatura de flama, habrá una menor transferencia de calor por radiación. Finalmente, esto ocasionará un aumento en la temperatura de gases en la chimenea, debido a que parte del calor del combustible no se aprovechó en esta zona y sale con los gases de combustión, reduciendo la eficiencia.

Debido a este fenómeno, se han notado variaciones en la temperatura de chimenea hasta de 28 °C. Los cambios en el exceso de aire afectan directamente la temperatura de flama y la transferencia de calor en la zona de combustión y radiación.

En la tabla VIII se pueden observar valores referenciales para diferentes tipos de combustibles y quemadores.

Tabla VIII. **Valores referenciales de exceso de aire de acuerdo al tipo de combustible y quemador**

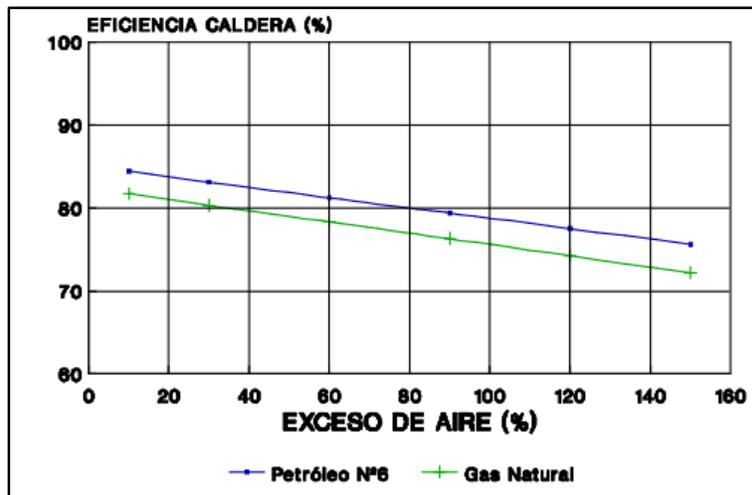
Combustible	Tipo de quemador	Exceso de aire mínimo (%)
Gas natural	Atmosférico	65
	tipo anillo	45
	boquillas	10
	bajo exceso de aire	1
Petróleo	Atomizado por presión	15
	copa rotativa	22-35
	atomizado con vapor o aire	8-15
Carbón	Parrilla móvil	36
	Parrilla fija	36
	Pulverizado	8

Fuente: elaboración propia.

En general, se sugiere trabajar con excesos de aire levemente superiores a los presentados en la tabla VIII, para compensar problemas de combustión asociados a variaciones en las propiedades del combustible y en el aire requerido para la combustión (presión atmosférica y temperatura).

En la figura 15 se observa la eficiencia térmica de una caldera en relación al exceso de aire con el que se encuentra trabajando, tanto para el caso de gas como para el caso de petróleo.

Figura 15. **Eficiencia versus exceso de aire para el caso del petróleo residual y el gas natural (considerando una temperatura de salida de 220 °C)**



Fuente: *Análisis de eficiencia de caldera.*

<www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. Consultado: 12 de agosto de 2014.

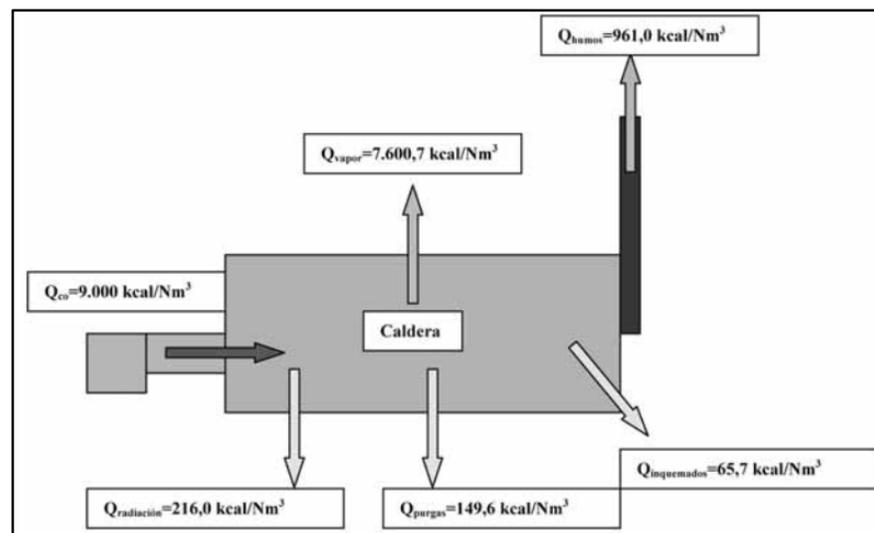
El trabajar con exceso de aire inferiores a los recomendados, también provoca disminuciones drásticas en la eficiencia de una caldera, debido a la combustión incompleta del combustible.

Otros problemas asociados a la operación con exceso de aire insuficientes son la formación de depósitos al interior de la caldera (hollín) y la emisión de productos de la combustión con características explosivas y tóxicas.

La determinación del exceso de aire con que está trabajando una caldera puede ser efectuada en forma sencilla, a través de la medición del contenido de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono presente en los productos de la combustión.

Los procedimientos que deben realizarse para reducir las pérdidas de calor asociados a un exceso de aire diferencial al requerido, tiene relación con: ajuste de la presión de combustible, ajuste de la presión del hogar, ajuste de aire en la entrada al quemador, presión de atomización, temperatura del combustible, posición del quemador, espesor de la cama de combustible sólido, razón aire sobre y bajo parrilla, distribución de aire bajo parrilla, entre otros.

Figura 16. **Balance de energía en una caldera**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.

Consejos para ahorrar energía en sistemas de vapor

- Precaliente el aire para la combustión

Una de las mejores formas de aumentar la eficiencia y productividad en los procesos de calentamiento industrial es precalentar el aire para combustión que

entra a los quemadores. La fuente de energía en forma de calor es la corriente de gases de escape que salen del proceso a una temperatura elevada.

Un intercambiador de calor instalado en la chimenea o el sistema de ductos de salida de gases, puede extraer una buena cantidad de la energía térmica de estos y transferirla al aire que entra a la combustión. Mediante el reciclaje del calor en esta forma, se reduce la cantidad de combustible necesario para la caldera.

- Minimice la purga de la caldera

Al reducir la cantidad de agua que se purga de la caldera, pueden evitarse pérdidas sustanciales de energía, ya que la temperatura del líquido purgado es la misma que la del vapor generado por la caldera.

Cuando el agua se evapora en el tambor de vapor de la caldera, se separan los sólidos presentes en el agua de alimentación. Los sólidos en suspensión forman lodos o sedimentos en la caldera, que degradan la transferencia de calor, mientras que los sólidos disueltos provocan espuma y acarreo de agua con el vapor. Para reducir el nivel total de sólidos disueltos y suspendidos (TDS) y llevarlos a límites aceptables, periódicamente se tiene que descargar o purgar el agua de la caldera. El propósito es eliminar los sólidos suspendidos que se sedimentan y forman lodos muy espesos. Por su parte, las purgas de superficie o de espumas tienen como finalidad desechar los sólidos disueltos que se concentran cerca de la superficie del líquido.

Un purgado insuficiente puede provocar arrastres de agua en la corriente de vapor, como también la formación de depósitos. El purgado en exceso provoca desperdicio de energía, agua y productos químicos.

La cantidad correcta de purga es determinada por varios factores, incluyendo el tipo de caldera, presión de operación, tratamiento de agua y la calidad del agua de repuesto.

La cantidad de purga va normalmente, del 4 % al 8 % de la cantidad de agua de repuesto, pero puede ser tan elevada como el 10 % cuando esta tiene un alto contenido de sólidos.

- Mejore la eficiencia de combustión de su caldera

La operación de la caldera con el exceso de aire adecuado, minimizará las pérdidas de calor a través de la chimenea y mejorará la eficiencia de la combustión.

La eficiencia de combustión es una medida de la efectividad donde el contenido de calor del combustible se convierte en calor utilizable. La temperatura de la chimenea y la concentración de oxígeno o bióxido de carbono en los gases de combustión son los mejores indicadores de la eficiencia con que esta se realiza.

Para una mezcla completa (oxígeno-combustible), se requiere de una cantidad de aire precisa (estequiometría), que reaccione completamente con una determinada porción de combustible. En la práctica, las condiciones de la combustión nunca son ideales y se necesita suministrar una cantidad adicional o en exceso de aire para quemar completamente el combustible.

La cantidad correcta de exceso de aire se determina, a partir del análisis de los gases de combustión, en cuanto a su contenido de oxígeno o bióxido de carbono ($O_2 - CO_2$).

La falta de exceso de aire provoca una combustión incompleta también que en los gases de esta aparezca hollín, humo, combustible no quemado y monóxido de carbono; por otra parte, demasiado exceso de aire resulta en pérdida de calor, debido al incremento de flujo de gases de combustión, que reduce la eficiencia de la caldera.

- Instale economizadores para recuperar el calor de desperdicio

Un economizador instalado para precalentar el agua de alimentación, reduce el consumo de combustible del generador de vapor al transferir calor de los gases de combustión al agua de alimentación que entra a la caldera. En la mayoría de los casos, los gases de combustión son enviados a la chimenea a temperaturas que superan entre 38 y 65 °C la del vapor generado. Por lo general, la eficiencia del generador se incrementa en 1 % por cada 4,5 °C de reducción en la temperatura de los gases de combustión. Así, al recuperar calor de desperdicio, los economizadores pueden disminuir el consumo de combustible entre un 5 % y 10 %.

- Establezca un costo de referencia para la generación de vapor

El establecimiento de un costo de referencia para la generación de vapor (\$/ton vapor) es una forma muy efectiva para determinar la eficiencia de su sistema de vapor. Este costo dependerá del tipo de combustible, su costo unitario, la eficiencia de la caldera, la temperatura del agua de alimentación y la presión de vapor.

- Mantenga libre de incrustaciones el lado del agua de las superficies de calefacción.

La incrustación se produce cuando el calcio, magnesio y sílice, presentes normalmente en la mayoría de los suministros de agua, reaccionan y forman una película continua de material en el lado del agua de los tubos de los intercambiadores de calor.

Esta incrustación crea un problema debido a que, típicamente posee una conductividad térmica menor que la del acero con que están hechos los tubos. Incluso las capas de incrustaciones delgadas funcionan como un aislante y retardan la transferencia de calor. Como resultado se produce un sobrecalentamiento en los tubos de la caldera, pérdida de la eficiencia energética y hasta llegan a romperse los tubos. El desperdicio de combustible que ocasiona la incrustación puede llegar a ser del 2 % en calderas del tipo de tubos de agua y hasta el 5 % en el tipo de tubos de humo.

- Monitoree la temperatura de los gases en chimenea.

Un indicador indirecto de la formación de depósitos o incrustaciones es la temperatura de los gases en chimenea. Si esta temperatura aumenta, para una carga de la caldera y el exceso de aire constante, el efecto se debe, posiblemente, a la presencia de incrustaciones.

- Aísle las líneas de distribución de vapor y las de retorno de condensado

Sin aislamiento adecuado, las líneas de distribución de vapor y las de retorno de condensado son una causa de desperdicio de energía constante.

Un buen aislamiento puede reducir las pérdidas en un 90 % y ayuda a mantener la presión requerida por equipos de la planta. Deben ser aisladas todas aquellas superficies cuyas temperaturas se encuentren por arriba de los 50 °C, incluyendo las de las calderas, líneas de vapor o de retorno de condensado, así como válvulas y accesorios.

- Suministro de aire adecuado para la combustión

El exceso de aire se define como la cantidad de este, que es suministrada al quemador, más allá de la requerida teóricamente (por estequiometría), para asegurar una combustión completa. Las infiltraciones de aire dentro de la cámara de combustión traen como consecuencia, el tener un aire adicional que interfiera con la eficiencia del proceso de combustión.

- Inspeccione y repare las trampas de vapor

Las trampas de vapor se revisan para determinar si están funcionando adecuadamente y no se han quedado atascadas, ya sea cerradas o en exposición abierta; en este último caso permiten que el vapor vivo escape hacia el sistema de retorno de condensado.

Existen cuatro formas básicas para revisar el funcionamiento de las trampas: por temperatura, sonido, visualmente y electrónicamente.

- Eliminar las pérdidas de calor

Las mayores pérdidas de energía en una caldera convencional se producen a través de los gases que salen de la chimenea, por radiación o por purgas de vapor; es importante evitar estas pérdidas, ya que en el peor de los casos,

pueden representar hasta un 30 % del combustible suministrado. La cantidad de calor perdido depende de la temperatura y del volumen del gas que sale de la caldera. Por lo tanto, al reducir cualquiera de estos parámetros disminuirá la cantidad de calor perdido. Las siguientes son algunas medidas prácticas que puedan ayudar a minimizar las pérdidas a través de los gases de la chimenea.

- Ajustar el tiro en el piso de la caldera.
- Ajustar el exceso de aire al nivel recomendado por el fabricante del quemador.
- Mantener limpias las superficies de intercambio de calor.
- Recuperar el calor de los gases de la chimenea.
- Controlar la infiltración de aire.

3.2. El proceso de combustión

- **Combustión:** la combustión es una reacción química en la cual están presentes siempre tres elementos: combustible, aire y calor.

Si uno de estos tres elementos falta, la combustión no se puede realizar. El combustible suministra los elementos químicos conocidos por hidrocarburos (HC) y el aire proporciona el oxidante de la combustión, el oxígeno (O₂) y el calor permite las condiciones adecuadas para la reacción química entre estos compuestos sea permanente y continua.

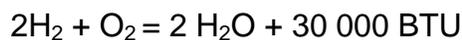
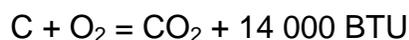
Combustión completa es el proceso de quemar el combustible sin exceso de aire de combustión (O₂), logrando el dióxido de carbono final adecuado para el grado de combustible quemado y sin generación de monóxido de carbono (CO).

El dióxido de carbono final puede ser calculado, puesto que la combustión de los diferentes grados de combustible es, principalmente, la oxidación del carbón presente. La medición de los gases de dióxido de carbono es predecible tomando en cuenta la cantidad de aire (oxígeno O₂) que interviene en la combustión (exceso de aire).

Propano	CO ₂ final	13,7 %
Diésel	CO ₂ final	15,2 %
Fuel oíl #. 6	CO ₂ final	16,7 %

Todo fabricante de quemadores y calderas recomienda los parámetros aceptables para obtener una buena combustión, pero la regla general obliga a mantener un exceso de aire entre 20 % y 30 %, con esto se garantiza una lectura de dióxido de carbono final, muy cercana a la mostrada arriba y lectura baja de oxígeno (entre 3 % y 5 %).

La combustión o quemado de combustible derivados del petróleo, implica la reacción química del carbón y el hidrógeno con el oxígeno para producir dióxido de carbono y vapor de agua, y la consecuente liberación de energía química de enlace en forma de luz y calor.



Cuando la reacción no está balanceada en la mezcla de aire y combustible, suceden dos eventos:

Si falta aire de combustión (exceso, de aire muy bajo) o existe mucho combustible, la reacción es deficiente y se tiene una mala combustión y generación de CO (humo negro).



En cambio, si existe exceso de aire (mucho O₂) y poco combustible, la combustión es deficiente, las lecturas de gases de dióxido de carbono son bajas y el oxígeno es alto, la eficiencia de combustión es baja y la temperatura de los gases en la chimenea se incrementa, generando, incluso, humo blanco y monóxido de carbono.

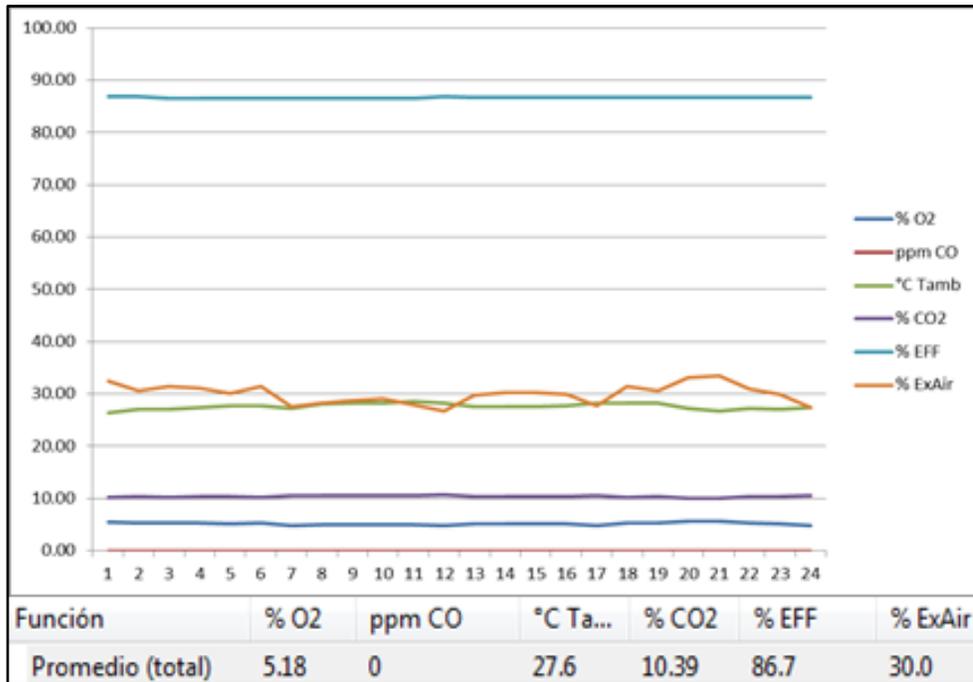
Como regla general y considerando la recomendación de cada fabricante, la combustión deberá mantenerse entre los siguientes parámetros:

Tabla IX. **Parámetros de una combustión completa**

Componente	Valor	Porcentaje
Exceso de aire		20 % - 30 %
Oxígeno O ₂	Bajo	3 % - 5 %
CO ₂	Estándar	11 % - 15 %
Eficiencia de combustión	Estándar	80 % - 85 %
Monóxido de CO		0 ppm
Temperatura de chimenea	Estándar	

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Análisis de combustión**



Fuente: Pepsico, S. A.

Los grados de la combustión varían ampliamente, conociéndose la combustión lenta y la combustión rápida o detonación.

El objetivo de la combustión, refiriéndose a los hogares, es el de proporcionar una producción de calor uniforme y regulada para ser transmitida a un medio que la absorba. Una de las cuestiones más importantes es la de suministrar una cantidad exacta de oxígeno por unidad de peso de combustible, para que se realice la combustión completa. Además de la exactitud correcta de la mezcla aire-combustible, se debe dar el tiempo necesario para que la mezcla interna y para que el combustible arda completamente; la temperatura del hogar debe ser tal que mantenga la combustión.

Cuando la reacción no está balanceada en la mezcla de aire y combustible, suceden dos eventos:

Si falta aire de combustión (exceso, de aire muy bajo) o existe mucho combustible, la reacción es deficiente y se tiene una mala combustión y generación de CO (humo negro).



En cambio, si existe exceso de aire (mucho O₂) y poco combustible, la combustión es deficiente, las lecturas de gases de dióxido de carbono son bajas y el oxígeno es alto, la eficiencia de combustión es baja y la temperatura de los gases en la chimenea se incrementa, generando, incluso, humo blanco y monóxido de carbono.

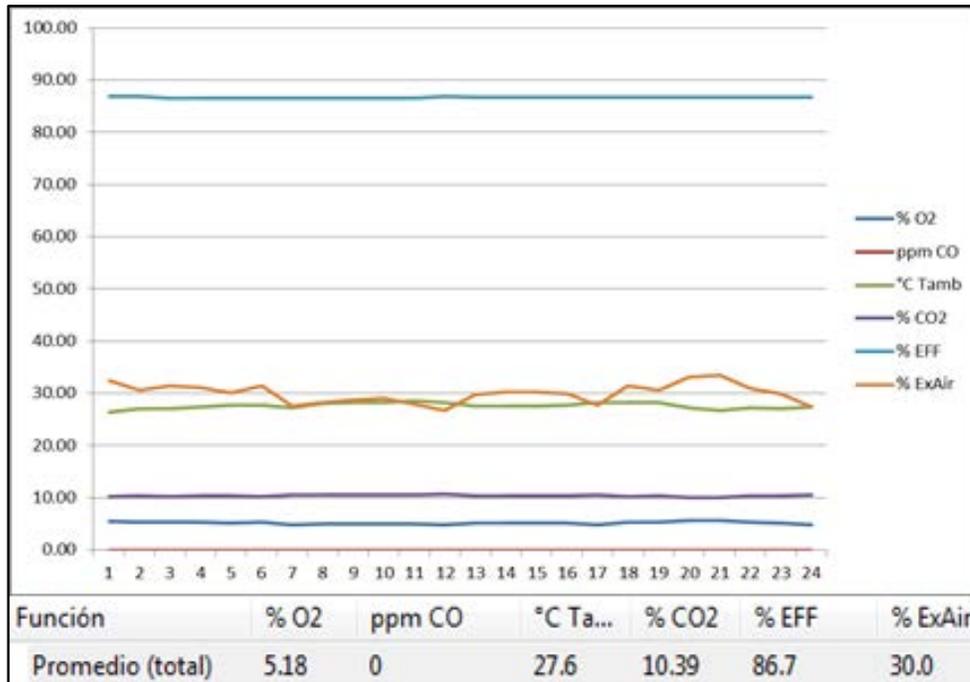
Como regla general y considerando la recomendación de cada fabricante, la combustión deberá mantenerse entre los siguientes parámetros:

Tabla IX. **Parámetros de una combustión completa**

Componente	Valor	Porcentaje
Exceso de aire		20 % - 30 %
Oxígeno O ₂	Bajo	3 % - 5 %
CO ₂	Estándar	11 % - 15 %
Eficiencia de combustión	Estándar	80% - 85 %
Monóxido de CO		0 ppm
Temperatura de chimenea	Estándar	

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Análisis de combustión**



Fuente: Pepsico, S. A.

Los grados de la combustión varían ampliamente, conociéndose la combustión lenta y la combustión rápida o detonación.

El objetivo de la combustión, refiriéndose a los hogares, es el de proporcionar una producción de calor uniforme y regulada para ser transmitida a un medio que la absorba. Una de las cuestiones más importantes es la de suministrar una cantidad exacta de oxígeno por unidad de peso de combustible, para que se realice la combustión completa. Además de la exactitud correcta de la mezcla aire-combustible, se debe dar el tiempo necesario para que la mezcla interna y para que el combustible arda completamente; la temperatura del hogar debe ser tal que mantenga la combustión.

La combustión tal y como se verifica en un hogar, es una reacción intermedia entre las más lentas y las más rápidas conocidas. Si el calor desarrollado en una reacción de combustión se genera tan lentamente que no se produce una elevación apreciable de temperatura en un corto espacio de tiempo, se tendrá el límite inferior.

El superior es el caso de un explosivo de alta potencia, a cuya explosión sigue una instantánea elevación de temperatura y de presión, acompañada de una detonación.

Los hogares comunes no tienen una combustión tan rápida como los de combustión pulverizada, en los que se verifica una mezcla más íntima entre el aire y el combustible.

Aunque han ocurrido explosiones con el combustible pulverizado, el objetivo no es la explosión, sino una rápida combustión.

Para que se produzca la combustión es necesario que estén presente tres elementos fundamentales.

- Comburente: es la sustancia que se reduce, el más habitual es el oxígeno contenido en el aire atmosférico.
- Combustible: la sustancia que se oxida, es decir, el elemento que se quema, los más habituales son C, H, O y a veces, N y S.
- Temperatura de ignición: debe ser lo suficientemente elevada como para producir el incendio.

Las reacciones químicas deben satisfacer unas condiciones para que tengan lugar en el proceso de combustión:

- Adecuada proporción entre combustible y comburente.
- La mezcla de las dos sustancias debe ser uniforme.
- La temperatura de ignición se establecerá y será motorizada de manera que el combustible continúe su ignición sin calor externo cuando comience la combustión.

Las tres funciones más importantes que tiene un hogar desde el punto de vista de la combustión son:

- Proveer el espacio necesario para acomodar la llama, sin que esta toque los tubos. De no evitar esto, se corre el riesgo de la extinción anticipada de los extremos de la llama que entran en contacto con los tubos, ya que estos últimos están a mucha menor temperatura que la llama. Este fenómeno se exterioriza mediante la emisión de humos, producto de una combustión incompleta.
- Mantener la temperatura de la llama y de los gases lo más alto posible, durante el tiempo necesario con la finalidad de que la combustión se complete sin humos o cenizas.
- Proveer un recinto hermético, que evite las fugas de gases o entrada de aire ajeno a la combustión.

- Rendimiento de la combustión: es la relación entre la fracción de energía realmente liberada en el proceso, y el total teórico disponible, que da una idea del grado de aprovechamiento del combustible, para las condiciones de trabajo dadas.

El factor que tiende a disminuir dicho rendimiento es el escaso tiempo disponible para el proceso, para controlar ese factor se debe aumentar el tiempo o estadía de los gases en el hogar, para lo cual se puede aumentar el recorrido de los gases aumentando las dimensiones, o bien, aumentar dicho recorrido sin aumentar las dimensiones físicas del hogar, pero modificando la circulación en forma de flujo helicoidal (hogares ciclónicos).

Los diferentes tipos de combustibles implican diferentes porcentajes de exceso de aire para el funcionamiento satisfactorio.

El tipo de combustible, no solamente determina la configuración física de los quemadores y el hogar, sino que también determina el flujo de aire requerido, como por ejemplo:

- Carbón y combustible sólidos en general: 20 a 30 % de exceso de aire
- Combustible líquido: 15 %
- Combustible gaseoso: 10 a 15 %

La elección del combustible depende de la disponibilidad y el costo del mismo. Para determinar cuál es el más económico, deberán considerarse los siguientes puntos:

- Contenido de energía
 - Eficiencia de operación
 - Disponibilidad y manipulación del combustible
 - Mano de obra necesaria
 - Mantenimiento
 - Limpieza
 - Precio
- Condiciones para la combustión: para que un combustible arda con una llama autosostenida, se necesitan ciertas condiciones termodinámicas y cinéticas, las cuales dependen del combustible y de la atmósfera donde se realiza la combustión. Estas condiciones son:
 - Temperatura de inflamabilidad (temperatura más baja provoca inflamación en la mezcla).
 - Límite de inflamabilidad (concentración del límite de mezcla).
 - Temperatura de ignición (la temperatura más baja a la cual una reacción de combustión se autosostiene).
 - Fenómeno de inestabilidad de la llama (velocidad de propagación).

- Etapas del proceso de combustión:
 - Etapas de precombustión
 - Etapas de combustión propiamente dicha
 - Etapas de poscombustión

- Descripción de los mecanismos del proceso de combustión
 - Atomización
 - Vaporización
 - Eliminación de humedad en los combustibles
 - Etapa de ignición
 - Zona de reacción o llama

- Emisiones del proceso de combustión

La combustión de cualquier combustible libera calor que se aprovecha en gran parte en la generación de vapor en las calderas; pero también produce una serie de emisiones (gases y partículas) descargadas por chimenea que, bajo ciertas condiciones pueden producir impactos ambientales negativos en el ambiente.

Los principales productos de combustión son: dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), partículas, así como oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2) remanentes del exceso de aire.

De dichos gases el dióxido de carbono (CO_2) es considerado gas de efecto invernadero; mientras que los otros gases, como el monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y las partículas, son considerados como contaminantes atmosféricos.

La producción de monóxido de carbono (CO) y partículas en la caldera depende de cuán bien sean completadas las reacciones de combustión en el quemador; asimismo depende del diseño del quemador y su estado de mantenimiento.

Las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) dependen, básicamente del contenido de azufre del combustible quemado en la caldera.

El óxido de nitrógeno (denominación de la suma del monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno) se produce durante la combustión, ya sea debido a la fijación térmica del nitrógeno del aire de combustión o a la conversión de nitrógeno químicamente ligado al combustible. La producción de óxido de nitrógeno (NO_x) aumenta con la temperatura de llama, el oxígeno disponible, el tiempo de resistencia a altas temperaturas y el contenido de nitrógeno del combustible.

4. PROCESO DE CONVERSIÓN DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO A GAS VAPORIZADO

4.1. Vaporizadores

La finalidad de un vaporizador es regasificar el GLP contenido en los depósitos de almacenamiento, antes de su emisión a la red de distribución, proporcionándole a dicho combustible, el calor necesario para que se lleve a cabo el cambio de estado y el GLP pase de líquido a vapor.

La fuente de energía que aporta calor al vaporizador puede ser de tipo eléctrica, mediante unas resistencias colocadas en el vaporizador; o con un fluido intermedio que puede ser calefactado a partir de gas contenido en el depósito de almacenamiento de propano que alimenta una caldera, calentando un circuito primario en el que circula dicho fluido, que pasa por un intercambiador o vaporizador.

Tipos de vaporizadores

- Vaporizador eléctrico de inmersión directa

Es aquel dentro del cual un elemento eléctrico se encuentra sumergido directamente en el líquido y vapor del GLP.

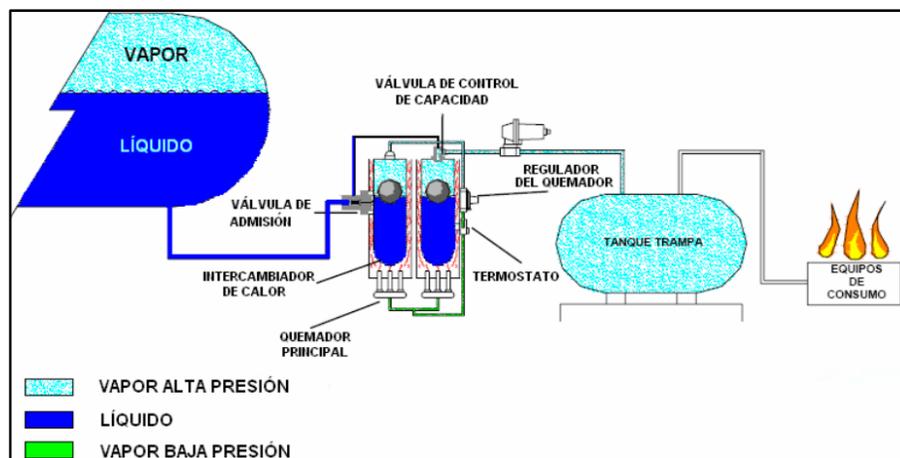
- Vaporizador eléctrico indirecto

Dentro del vaporizador hay un elemento eléctrico que calienta una solución intermedia, dentro de la cual se encuentra sumergido el intercambiador de calor de GLP, o un absorbedor de calor intermedio.

- Vaporizadores de contacto directo

En los vaporizadores de contacto directo el calor que se suministra, mediante una llama, se aplica directamente sobre la superficie de un intercambiador de calor que se encuentra en contacto con el GLP líquido que se quiere vaporizar. En esta clasificación se encuentran los vaporizadores de combustión sumergida, que vaporizan el GLP el cual fluye dentro de tubos sumergidos en un baño de agua con un quemador.

Figura 18. **Instalación con un vaporizador de contacto directo**



Fuente: *Diseño de una instalación de GLP en una estructura tipo skid para abastecimiento de gas.* < <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/14866>>.

Consulta: 14 de agosto de 2014.

- Vaporizadores de baño de maría

En los vaporizadores de baño de maría, también denominados de inmersión, una cámara de vaporización, tuberías, serpentín u otra superficie de intercambio de calor que contiene el GLP líquido para vaporizar, se sumerge en un baño de agua de temperatura controlada, una combinación del agua-glicol u otro medio de transferencia de calor incombustible, calentado por un dispositivo de inmersión que no entra en contacto con la superficie de intercambio de calor del GLP.

- Vaporizadores indirectos o de fuego indirecto

En los vaporizadores indirectos, el calor suministrado por vapor, agua caliente u otro medio de calentamiento, se aplica a un intercambiador que contiene el GLP que se desea vaporizar. La característica principal es que el calentamiento del medio usado se produce en una instalación alejada.

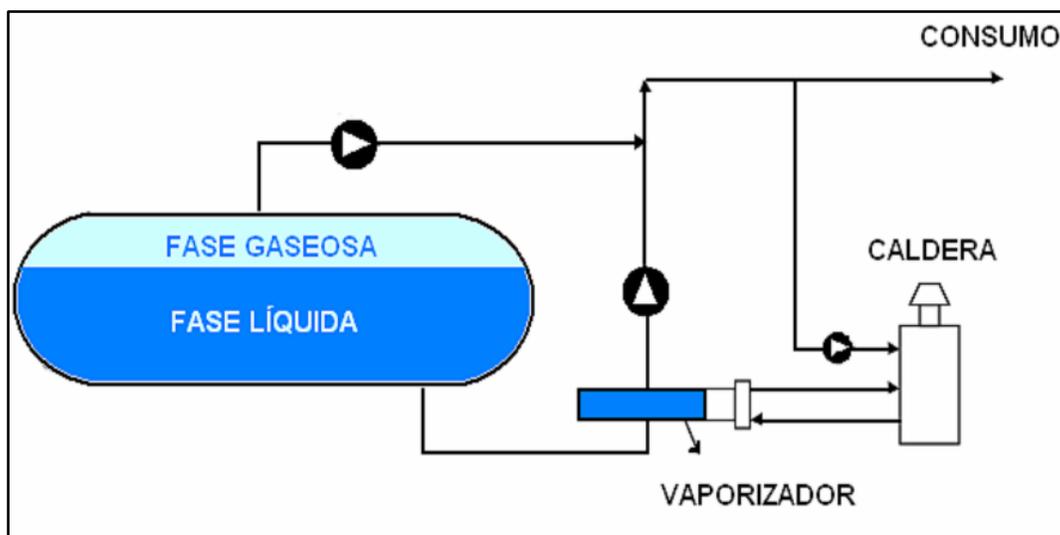
Dentro de los vaporizadores indirectos y según el diseño de la instalación de vaporización, se pueden hablar de dos sistemas diferenciados, el tipo alimentación directa y el de retroalimentación.

- Vaporizadores de alimentación directa

En los vaporizadores de alimentación directa, el GLP en fase gas que sale del vaporizador se envía directamente a la red de servicio. Cuando se produce un consumo de gas, disminuye la presión de la red, y como esta presión es inferior a la del depósito que almacena el GLP, se produce la entrada del GLP líquido en el vaporizador.

Al vaporizarse parte del GLP y aumentar la cantidad de vapor, se produce un aumento de la presión de la red y esto provoca que se estabilicen las presiones y se vuelva a la situación de equilibrio del principio y que, por lo tanto, finalice la entrada de GLP líquido en el vaporizador.

Figura 19. **Instalación del vaporizador de alimentación directa**



Fuente: *Diseño de una instalación de GLP en una estructura tipo skid para abastecimiento de gas.* <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/14866>>.

Consulta: 14 de agosto de 2014.

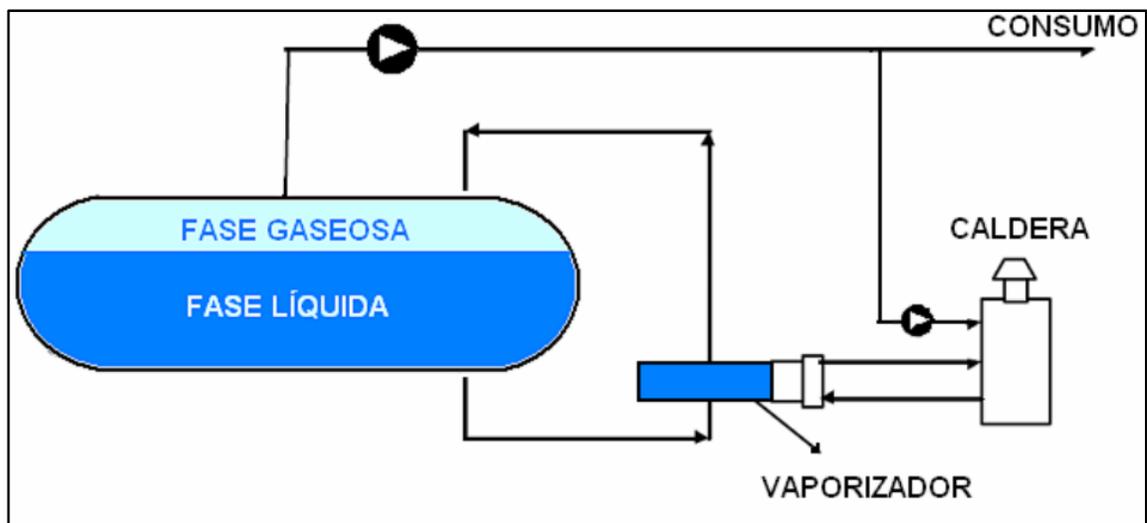
- Vaporizadores de retroalimentación

Este sistema el cual consiste en un recipiente a presión que dispone de un intercambiador que está completamente bañado por el propano líquido. De este modo se optimiza la transferencia de calor del circuito de calefacción, ya que se reducen las emisiones de calor al exterior.

En el intercambiador, al estar totalmente bañado en el recipiente, no se producen condensaciones de aceite ni la destilación de los productos por un calentamiento excesivo. El control de encendido del sistema se realiza mediante un presostato, el cual, cuando detecta una bajada de presión, actúa encendiendo la caldera y cuando el regulador del depósito no se puede asegurar el caudal demandado, entra en juego el vaporizador.

Esta técnica recibe el nombre de retroalimentación debido a que no actúa directamente sobre el consumo, sino que el gas retorna al depósito, con lo cual el propio depósito funciona de cojín ante los cambios y fluctuaciones del consumo.

Figura 20. **Instalación del vaporizador de retroalimentación**



Fuente: *Diseño de una instalación de GLP en una estructura tipo skid para abastecimiento de gas.* <<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/14866>>.

Consulta: 14 de agosto de 2014.

Las diferencias entre la vaporización por alimentación y por retroalimentación se esquematizan en la siguiente tabla X.

Tabla X. **Diferencias entre vaporización por alimentación y retroalimentación**

Vaporización por alimentación	Vaporización por retroalimentación
Funcionamiento	
El servicio de gas a la red de consumo se realiza desde el vaporizador.	El servicio de gas a la red de consumo se realiza desde el depósito.
Regulación	
Se realiza por medio de termostatos en el circuito de calefacción y en el retorno del agua de caldera. Se necesita válvula de corte, flotador contra invasión de fase líquida o detector de nivel para controlar el nivel del líquido.	Se realiza por medio de un presostato que actúa sobre la caldera de calefacción. No necesita controles de nivel de líquido porque el intercambiador trabaja inundado.
Purgas	
Al producirse recalentamiento del gas: Formación de aceites (polimerización) Necesidad de purgas y decantor.	Al trabajar siempre inundado de líquido. No se producen polimeraciones.
Economía	
Instalación más compleja	Instalación más sencilla

Continuación de la tabla X.

Condiciones de trabajo	
Parte del serpentín de calefacción suele estar en contacto con el gas: Se produce recalentamiento del gas. Hay que limitar la temperatura de calefacción.	El vaporizador trabaja siempre inundado de líquido: No se produce sobrecalentamiento del gas. Las temperaturas del primario pueden ser mayores
Limitaciones	
Presión de servicio en función de la temperatura del depósito. Temperatura de calefacción limitada por la polimerización. Temperatura de calefacción por encima de la máxima previsible en el depósito.	No hay limitaciones de presiones de servicio. No se debe cuidar excesivamente la temperatura máxima de calefacción. No hay rango inferior de temperaturas del agua de calefacción.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Ventajas e inconvenientes entre vaporización por alimentación y por retroalimentación**

Vaporización por alimentación	Vaporización por retroalimentación
Ventajas	
Se aprovecha la vaporización natural. El gas va directamente a la red. La regulación es automática.	Se aprovecha la vaporización natural. No existen limitaciones relacionadas con la temperatura del depósito.

Continuación de la tabla XI.

Inconvenientes	
<p>La presión de la red está limitada a la temperatura del depósito.</p> <p>El funcionamiento del vaporizador es incorrecto con temperaturas del depósito superiores a 45 °C.</p> <p>Se forman aceites (polimerización) a partir de los 50 °C.</p>	<p>El vaporizador debe instalarse a un nivel inferior al depósito (modelo sin bomba).</p> <p>El vaporizador necesita bomba en el caso de tener depósitos enterrados.</p> <p>Desaprovechamiento de calor en el invierno.</p> <p>El gas vaporizado retorna al depósito.</p>

Fuente: elaboración propia.

- Tipos de vaporización del GLP

Como el consumo de GLP se realiza, por lo general, en estado gaseoso, es necesario que pase al estado de vapor antes de que llegue al lugar de consumo. Este proceso se denomina vaporización y puede ser natural o forzada.

- Vaporización natural

Es la posibilidad de un depósito de suministrar, de manera continua, una determinada cantidad de fase gaseosa sin la necesidad de aportar calor de manera auxiliar al GLP líquido, y depende de las superficies del depósito, de la temperatura ambiente y de la presión a la que se extrae el gas.

En el interior de un depósito cerrado, a la temperatura ambiente, el GLP se encuentra en dos fases, la líquida ocupando la parte inferior, y la gaseosa ocupando la superior, coexistiendo ambas en equilibrio y sometido a una presión que corresponde a la presión de vapor a dicha temperatura. Si se abre una válvula y se extrae fase gaseosa se rompe el equilibrio al disminuir la presión interior. Como consecuencia de ello, y para compensar esta pérdida de presión, se produce la vaporización natural de la fase líquida para atender a recuperar el equilibrio perdido.

Para realizar la transformación de estado líquido a vapor, se requiere un aporte de calor al líquido en una cantidad por unidad de masa, determinada para cada sustancia, pero variable con la temperatura, que se conoce como calor latente de vaporización. Este calor lo toma el líquido de su propio seno, de manera que se enfría. Si se supone que, inicialmente, está a temperatura ambiente, en este momento, al disminuir su temperatura, se producirá una transmisión de calor desde el exterior al interior del depósito. Este calor lo recibe el GLP líquido del exterior a través de la chapa del recipiente que está en contacto con él, llamada superficie mojada, ya que la fase gaseosa como todos los gases es muy mala conductora de calor.

Esta superficie mojada es menor, cuanto menor es la cantidad de líquido en el depósito, por lo que, si se consideran dos depósitos del mismo volumen geométrico, pero de dimensiones diferentes, la superficie mojada será mayor en el que tenga el menor diámetro.

Por otro lado, la cantidad de calor que pasa desde el entorno del depósito a la masa de líquido depende de si el depósito es aéreo o enterrado. En el primer caso, la cantidad es mayor, ya que el aporte lo realiza el aire atmosférico que lo rodea y que con su movimiento convectivo facilita el intercambio.

Cuando el depósito está enterrado, la cantidad de calor que recibe es menor, pues en este caso la transmisión se realiza por conducción desde el terreno en que se encuentra.

Por último, y en cuanto a la temperatura, es evidente que en los depósitos aéreos, cuanta más alta sea la temperatura exterior, mayor cantidad de calor se podrá transmitir al GLP, aunque también influyen otras condiciones meteorológicas como la velocidad del viento y la humedad relativa. Para los depósitos enterrados hay que considerar una temperatura constante del terreno que para los cálculos se toma de 5 °C.

En resumen, hay varios factores que influyen en la vaporización natural de un depósito. La presión de utilización, la superficie mojada que varía con las dimensiones del recipiente y con la cantidad de líquido que contiene y, por último, la temperatura exterior que a su vez depende de la ubicación, ya sea aérea o enterrada.

- Vaporización forzada

Si la demanda de fase gaseosa de la instalación es mayor que la que puede aportar el depósito, el GLP se va enfriando, con lo que disminuye la vaporización llegando a interrumpirse el suministro. Cuando, mediante la vaporización natural, no se obtiene la cantidad suficiente para suministrar de manera continua la fase gaseosa que se precisa para el consumo, se ha de instalar un sistema de vaporización forzada, el cual consiste en un intercambiador de calor o vaporizador, en el que, por medio de un fluido auxiliar, se aporta al GLP el calor necesario para aportar la fase gaseosa que requiere la instalación sin que descienda la temperatura en el depósito.

De manera que, la vaporización forzada es la que se produce cuando se calienta la fase líquida de forma artificial para provocar la vaporización, y se lleva a cabo mediante un aporte calor de forma auxiliar al GLP líquido.

4.2. Características generales de los vaporizadores

Uno de los requisitos que debe cumplir un vaporizador, por cuestión de seguridad, es que reduzca al máximo la posibilidad de que se produzca una explosión. Los hidrocarburos son inflamables, y según su punto de inflamación pueden provocar atmósferas explosivas. Al vaporizarse el GLP se genera una cantidad de gases y vapores que, si en algún momento se pusieran en contacto con un comburente como el oxígeno del aire, en un intervalo de concentración y con un foco de ignición, se produciría una explosión.

Instalar un vaporizador eléctrico no sería lo más idóneo en este caso, ya que no es aconsejable que un elemento eléctrico, una resistencia, esté en contacto directo o indirecto con el GLP. Estos elementos no pueden permanecer en contacto con atmósfera peligrosa, ya que durante un funcionamiento normal o en caso de avería se pueden generar arcos, chispas o puntos calientes que desencadenen una explosión.

Del mismo modo, en un vaporizador de contacto directo se produce un calentamiento excesivo del gas, la llama que aplica calor a la superficie del intercambiador está en contacto con el GLP que se requiere vaporizar, de manera que al mínimo fallo, avería o escape de gas, tal exposición podría provocar una explosión no deseada.

Por otro lado, también existe el problema de la polimerización. Cuando el calentamiento del GLP supera los 50 o 60 °C, los hidrocarburos no saturados

rompen sus enlaces dobles y triples, provocando la polimerización, o dicho de otra forma, la formación de aceites. Estos aceites se acumulan en los puntos más bajos y en los elementos puntuales intercalados en la conducción como los reguladores y los contadores, alterando su funcionamiento y pudiendo llegar a inutilizarlos. La polimerización se incrementa cuando se produce una reducción grande de la presión, como es el caso de los reguladores, donde por ese motivo, la acumulación de aceites es mayor.

Para evitar la aparición de este fenómeno se ha de trabajar a temperaturas inferiores a la señalada, por lo que se descarta el vaporizador de llama directa, ya que en ellos se produce calentamientos locales elevados.

Finalmente, el vaporizador elegido que cumple con las normas de seguridad de atmósferas inflamables, con las especificaciones citadas en el punto anterior y reduce la posibilidad de que se produzca el efecto de la polimerización, es el vaporizador indirecto.

4.3. Principio de funcionamiento

La función del vaporizador es utilizar la fase líquida del gas y vaporizarla. Cuando el gas en estado líquido entra en el vaporizador, se vaporiza debido al incremento de temperatura que el vaporizador le suministra. No es relevante la capacidad del tanque, es importante que el recipiente almacene suficiente gas líquido para suministrar las necesidades de consumo por el periodo seguro de suministro de gas al recipiente.

En condiciones normales, el volumen requerido de vapor deberá ser suministrado por la vaporización generada por el área del tanque de almacenamiento y la temperatura ambiental. Cuando baja la temperatura o

aumenta la demanda de vapor de GLP y este sobrepasa la capacidad de vaporización se requiere un sistema de vaporización forzada.

Al abrir las válvulas, la fase líquida del gas licuado de petróleo fluye del tanque de almacenamiento al vaporizador al llenarse el o los recipientes, hasta un nivel predeterminado, la válvula de admisión del vaporizador cerrará la entrada de líquido al tanque o tanques del vaporizador.

El vapor generado en el o los recipientes, suministra vapor de gas que se utilizará para el encendido del quemador o quemadores.

El incremento de temperatura vaporizará el (GLP) almacenado en ellos, iniciando el ciclo de vaporización al abrirse la válvula de admisión para permitir la entrada de (GLP) en estado líquido al o los recipientes.

La válvula de admisión cerrará y abrirá dependiendo del consumo del vapor de (GLP).

La temperatura de los tanques se determina ajustando el termostato a la temperatura deseada, por lo que esta encenderá el o los quemadores, según sea necesario con base en la demanda de vapor (GLP).

- Funcionamiento del sistema por alimentación

Consiste en un recipiente a presión con un serpentín en la parte inferior por donde circula el agua caliente suministrada por una caldera que calienta el GLP líquido que, a su vez, entra también, por la parte inferior del vaporizador proveniente del depósito; en la parte superior está la salida del gas propano.

El nivel del GLP líquido dentro del vaporizador, cuando está en funcionamiento varía con la demanda de gas de consumo. Cuando hay poca demanda, baja el nivel del líquido, pues el GLP caliente produce más fase gaseosa que la necesaria para el consumo, y el exceso de presión en el recipiente del vaporizador hace retornar el GLP líquido del vaporizador hacia el depósito.

Para que este movimiento de GLP, entre los depósitos y el vaporizador, pueda producirse en ambos sentidos, es necesario que no exista en la toma de salida de fase líquida del depósito, ninguna válvula antirretorno.

Si la demanda crece, la presión en el interior del vaporizador disminuye y el nivel de líquido aumenta al haber más presión en el depósito de almacenamiento que en el vaporizador. Para evitar esta posibilidad, el vaporizador incorpora sistemas de seguridad para evitar la inundación.

4.4. Mantenimiento y servicio

Los vaporizadores, como cualquier otro equipo para GLP requieren de revisiones y mantenimiento periódicos.

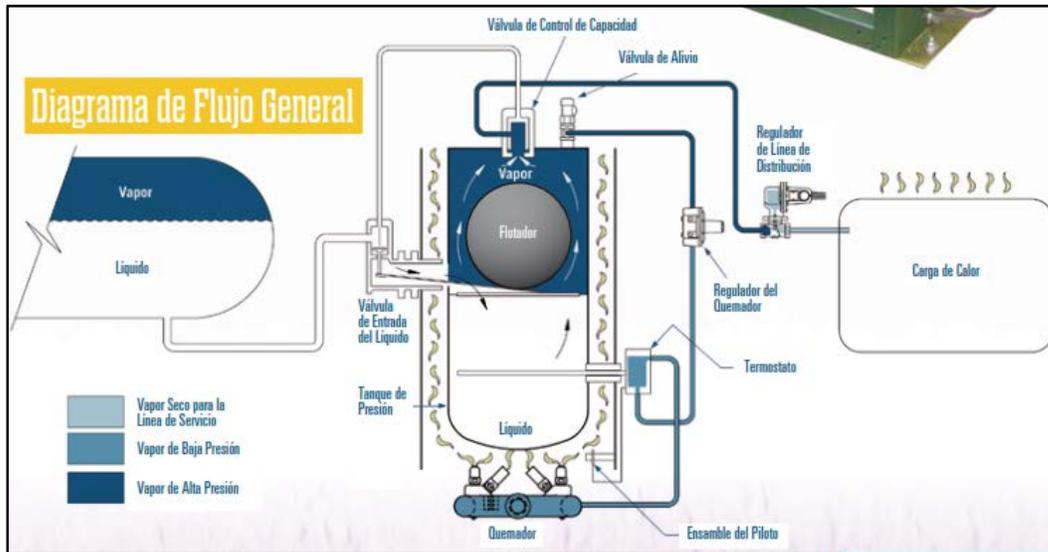
Los siguientes puntos son una guía para el mantenimiento, sin embargo, la frecuencia de los mismos puede variar dependiendo de cada instalación, así como de las características de uso y calidad de propano que se esté vaporizando.

Tabla XII. Rutina de mantenimiento vaporizadores

SERVICIO DIARIO	
SISTEMA EN GENERAL	Revisar que no existan fugas.
PILOTO	Revisar que se encuentre encendido y con flama adecuada.
SERVICIO MENSUAL	
FILTRO	Remueva y limpie la malla, en su caso cambiarla.
QUEMADOR PRINCIPAL	Limpiar los orificios de espreas y mezcladores de aire-gas.
VÁLVULA DE SEGURIDAD	Revisar buscando corrosión, asegurarse que tienen colocados los protectores para lluvia.
SERVICIO ANUAL	
TERMOSTATO	Comprobar su funcionamiento es su caso cambiarla.
TERMOPAR	Verificar desgaste del sensor, en su caso sustituirlo.
REGULADOR	Revisar la calibración. Limpiarlo exteriormente y verificar que la ventila no esté obstruida.
VÁLVULA DE ADMISIÓN	Desarmarla y limpiarla, en su caso cambiar el sello.
INTERCAMBIADO DE CALOR	Limpiarlo eliminando el hollín y cascarilla. Revisar que no existan picaduras en el fondo. Si existen picaduras mayores a 3,0 mm, el Intercambiador debe ser sustituido.

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Diagrama de flujo de un vaporizador



Fuente: *Diseño de una instalación de GLP en una estructura tipo skid para abastecimiento de gas.* <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/14866>.

Consulta: 14 de agosto de 2014.

Figura 22. Área de vaporizadores



Fuente: Pepsico, S. A.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1. Análisis económico

Este proyecto solicita la aprobación para invertirse \$ 250 MUSD, para el cambio del uso de diésel a gas en las calderas de vapor. Las inversiones estarán distribuidas en: obra civil, instalaciones mecánicas y eléctricas para las nuevas pipas de gas y sistemas de evaporadores, sistemas de medición. La descripción de la inversión se detalla en la tabla XIII.

Tabla XIII. Descripción de la inversión del proyecto

EQUIPO	Costo MUSD
Obra civil	55,00
Instalación mecánica	80,00
Medidores de flujo	55,00
Instalación eléctrica	45,00
Programación	15,00
Total inversión MUSD	250,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Análisis costo-beneficio GLP versus diésel**

ANÁLISIS COSTO BENEFICIO		
GLP VS. DIÉSEL		
	GLP	DIÉSEL
PODER CALORÍFICO BTU/GALÓN	94,850	129,000
EFICIENCIA	0,98	0,95
PODER CALORÍFICO EFECTIVO	92,953	122,550
CONSUMO POR MES	20,567	15,600
CONSUMO POR DÍA	686	520
PRECIO	16	27,26
COSTO	\$ 1,40	\$ 1,75

AHORRO POR DÍA	\$ 0,4
AHORRO POR MES	\$ 12,00
AHORRO ANUAL	\$ 144 271,96

Fuente: elaboración propia.

5.2. Ahorro estimado de la conversión

Los beneficios de este proyecto provienen de la reducción de gastos descritos en los siguientes puntos. Estos se traducen anualmente a la siguiente tabla, dando en total ahorros anuales de 116.4 MUSD.

- Generar una productividad de 144 MUSD anuales con el cambio del uso de combustible en la caldera. Actualmente se usa diésel y se cambiará a gas.
- Mejorar los gases de combustión en la caldera, ya que el gas es un combustible más limpio y los niveles de contaminación se reducen notablemente.

- Mejorar el poder de negociación con el proveedor de gas, ya que se tendrá un incremento considerable en el consumo.
- Cambiar la capacidad de las pipas de gas con el nuevo volumen, actualmente se tiene capacidad para 11 000 galones y se incrementará a 22 000 galones. Esto ayuda a que el suministro no sea con la misma frecuencia, actualmente la pipa que suministra el gas viene dos veces al día.
- Instalar sistemas de medición para tener mejor control de los inventarios de gas y del consumo hacia planta.
- Cambiar el diseño de los vaporizadores ya que se han ido agregando conforme el incremento que ha tenido el gas en los últimos años sin considerar un cambio de fondo. El riesgo que existe en dicha área es alto, ya que la obra civil no cumple con los requerimientos de seguridad industrial.

Tabla XV. **ahorro estimado de la conversión**

Total ahorros (MUSD)	
Ahorro energía eléctrica por reducción de fugas	106,5
Reducción costos mantenimiento	9,9
	116,4

Fuente: elaboración propia.

5.3. Estimación de recuperación de la inversión

- Supuestas proyecciones:

- Se considera una tasa del 3 % (inflación) para proyectar los ahorros.
- Se considera 15 años para lá depreciación del equipo. Basado en una buena rutina de mantenimiento.

Al considerar la implementación de este equipo, se obtiene la proyección total a 10 años del escenario:

Tabla XVI. **Proyección del proyecto total a 10 años**

Total ahorros (MUSD)	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
Ahorro energía eléctrica por reducción de fugas	106,5	109,7	113,0	116,4	119,9	123,5	127,2	131,0	134,9	139,0
Reducción costos mantenimiento	9,9	10,2	10,5	10,8	11,1	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9
	116,4	119,9	123,5	127,2	131,0	134,9	139,0	143,2	147,5	151,9

Fuente: elaboración propia.

Este proyecto genera una tasa de retorno del 72,4 %, tiene un NPV de \$482,5 MUSD, logrando que la inversión se recupere en 1,4 años.

Tabla XVII. **Datos financieros del proyecto**

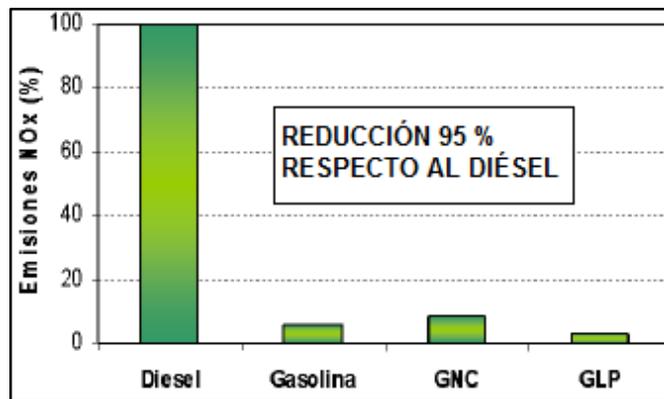
MUSD	
INVERSIÓN	(120,00)
AHORROS AÑO 1	116,40
VALOR ACTUAL NETO (NPV) @ 9%	482,49
IRR	72,4%
RECUPERACIÓN EN AÑOS	1,4
DESCUENTO DE RECUPERACIÓN EN AÑOS	1,7

Fuente: elaboración propia.

5.4. Análisis comparativo con otro tipo de combustible

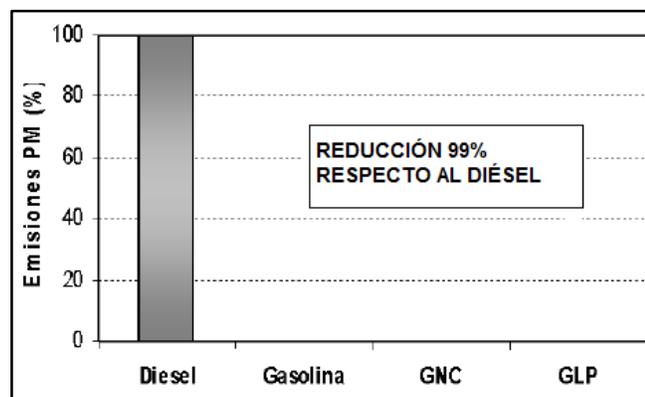
El uso de GLP en calderas proporciona una tecnología limpia la cual reduce el impacto ambiental como se demuestra en las siguientes figuras.

Figura 23. **Porcentaje de óxido de nitrógeno (NO_x) versus combustible**



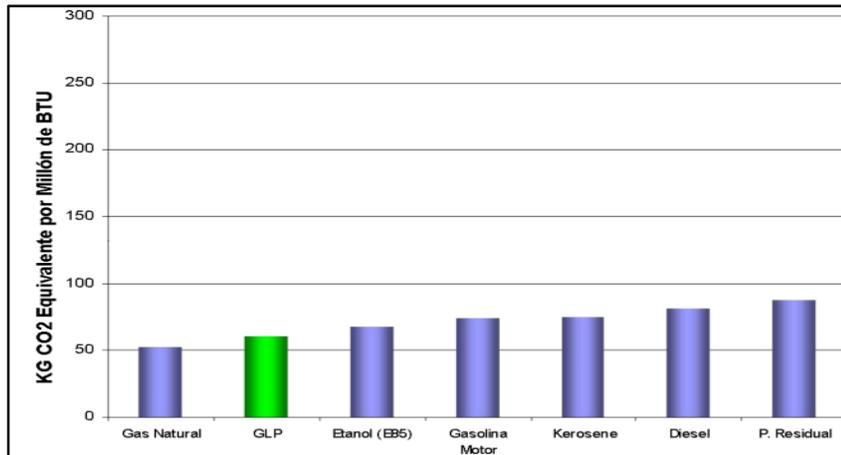
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Partículas por millón versus combustible**



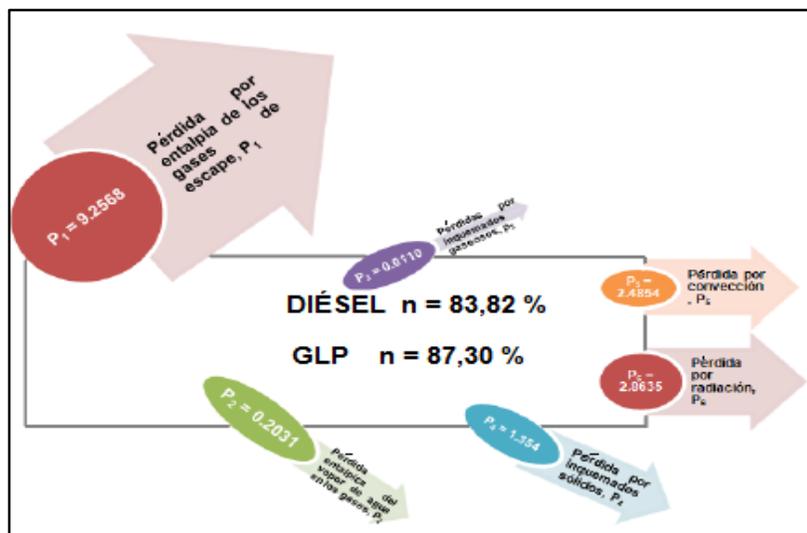
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Kilogramos de dióxido de carbono (CO₂) versus combustible**



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Diagrama de Sankey para ambos combustibles**



Fuente: elaboración propia.

5.5. Cuadro comparativo de la eficiencia de la caldera

Procedimiento para el cálculo de la eficiencia por el método indirecto, también conocido como el método de las pérdidas separadas.

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{PÉRDIDAS}}}{Q_{\text{APORTADO}}}$$

Siendo:

$$Q_{\text{PÉRDIDAS}} = Q_{\text{HUMOS}} + Q_{\text{INQUEMADOS}} + Q_{\text{RADIACIÓN}} + Q_{\text{PURGAS}}$$

$$Q_{\text{APORTADO}} = \text{PCI [kcal/Ud. de combustible]}$$

Para obtener las pérdidas utilizamos las siguientes ecuaciones:

Calor de los humos (Q_H)

$$Q_{\text{HUMOS}} = x \text{ [kg. humos/Ud. de combustible]} * y \text{ [kcal/kg humos]}$$

Con el porcentaje de oxígeno y dióxido de carbono se obtiene el caudal de humos (x) expresado en kilogramos de humos/Ud. de combustible. Con la temperatura de los humos y utilizando las tablas de entalpia, se encuentra la entalpía específica de los humos (y) en kilocalorías por kilogramo de humo.

Calor por inquemados gaseosos (Q_{IG})

$$Q_{IG} = \frac{21}{21 - [O_2]} \left[\frac{[CO]}{3.1} + \frac{[CH]}{3.1} \right]$$

Donde:

[O₂] = concentración de oxígeno en los humos (%)

[CO] = concentración de monóxido de carbono en los humos (ppm)

[CH] = concentración de hidrocarburo en los humos (ppm)

Inquemados sólidos (Q_{IS})

Se calcula midiendo la opacidad mediante la escala Bacharach, es decir, es la relación que existe entre el N° Bacharach y el porcentaje de pérdidas sobre el PCI del combustible.

Calor por radiación (Q_R)

El calor perdido por radiación, se calcula midiendo la temperatura y la superficie de la caldera, distinguiendo paredes verticales y horizontales hacia arriba y hacia abajo. Si b es el consumo horario de combustible, las pérdidas por radiación se obtendrán de la forma siguiente:

$$Q_R = \frac{\text{Kcal / h}}{b} \quad [\text{Kcal / unidad de combustible}]$$

También pueden emplearse tablas para calcular las pérdidas por radiación en función de la producción máxima de vapor y el índice de carga.

Tabla XVIII. **Eficiencia calculada por el método indirecto para ambos combustibles**

Pérdida	Diésel	GLP
Pérdida por entalpía humos, P1	9,2568	5,6198
Pérdida entalpica del vapor de agua en los gases, P2	0,2031	0,2856
Pérdida por inquemados gaseosos, P3	0,0110	8,7272x10 ⁶
Pérdida por inquemados sólidos, P4	1,3540	1,3540
Pérdida por convección, P5	2,4854	2,4854
Pérdida por radicación, P6	2,8635	2,8635
Eficiencia, η	83,8262	87,3919

Fuente: elaboración propia.

5.6. **Análisis comparativo del costo de mantenimiento con cada combustible**

En cuanto a los costos de mantenimiento de este equipo, las variaciones de ellos se consideran poco significativos, ya que para el presente caso se sigue la misma rutina de mantenimiento, independientemente de qué combustible se esté utilizando. El mayor costo (o beneficio) asociado a medida de control es el mayor (o menor) costo del nuevo combustible usado por la caldera.

Donde influye el cambio de combustible es también, que el GLP produce menos depósitos de hollín en los tubos, con lo que se logra una mayor

transferencia de calor. Al aumentar dicha transferencia de calor, los gases evacuados por la chimenea salen menos calientes y, por lo tanto, la energía suministrada a la caldera se aprovecha más en la generación de vapor, es decir, aumenta el rendimiento energético de la caldera y disminuye el consumo de combustible por unidad de vapor producida.

5.7. Análisis comparativo del costo de la libra de vapor con cada combustible

Calculando el costo y producción de vapor con cada combustible, se obtiene lo siguiente:

Se obtuvo de la placa de datos de la caldera el input, que es el consumo de calor que requiere la caldera de 300 B.H.P. Dividiendo el input dentro del poder calorífico de cada combustible se obtiene la cantidad de galones utilizado por hora de cada combustible.

Datos:

Input = 12 555 000 BTU/hora

P.C_{Diésel} = 138 000 BTU/galón

P.C_{GLP} = 92 000 BTU/galón

$$\text{GLP} = \frac{12\,500\,000 \text{ BTU/hora}}{92\,000 \text{ BTU/galón}} = 136,46 \approx 136 \text{ galones/hora}$$

$$\text{Diésel} = \frac{12\,500\,000 \text{ BTU/hora}}{138\,000 \text{ BTU/galón}} = 90,97 \approx 91 \text{ galones/hora}$$

Calculando el calor suministrado por el combustible

$$Q = \eta [(poder\ calorífico) (consumo\ de\ combustible)]$$

$$Q_{\text{Diésel}} = 0,83 [(138\ 000\ \text{BTU/galón}) (90\ \text{gal/hora})] = 10\ 308\ 600\ \text{BTU/hora}$$

$$Q_{\text{GLP}} = 0,87 [(92\ 000\ \text{BTU/galón}) (90\ \text{gal/hora})] = 7\ 203\ 600\ \text{BTU/hora}$$

Estimación de la cantidad de vapor producido para ambos combustibles

Temperatura del agua de alimentación

$$T_{\text{inicial}} = 80^{\circ}\text{C} = 176^{\circ}\text{F} \quad h_o = 142,89\ \text{BTU/lb}_m$$

Vapor saturado

$$P_{\text{final}} = 100\ \text{psig} + 15\ \text{psig} = 115\ \text{psia} \quad h_f = 1\ 190,00\ \text{BTU/lb}_m$$

$$\Delta H_{\text{vapor}} = h_f - h_o = 1\ 190,00 - 142,89 = 1\ 047,11\ \text{BTU/lb}_m$$

Datos:

$$\text{Poder calorífico del diésel} = 138\ 000\ \text{BTU/galón}$$

$$\text{Poder calorífico del GLP} = 92\ 000\ \text{BTU/galón}$$

$$m_{\text{fDiésel}} = 91\ \text{galones/hora}$$

$$m_{\text{fGLP}} = 91\ \text{galones/hora}$$

$$Q_{\text{Diésel}} = 10\ 308\ 600\ \text{BTU/hora}$$

$$Q_{\text{GLP}} = 7\ 203\ 600\ \text{BTU/hora}$$

$$m_{\text{vapor}} = Q / \Delta H_{\text{vapor}}$$

$$m_{\text{vapor-diésel}} = [(10\ 308\ 600\ \text{BTU/hora}) / (1\ 047,11\ \text{BTU/lb}_m)] = 9\ 844,81\ \text{lb}_m/\text{hora}$$

$$m_{\text{vapor-GLP}} = [(7\ 203\ 600\ \text{BTU/hora}) / (1\ 047,11\ \text{BTU/lb}_m)] = 6\ 872,98\ \text{lb}_m/\text{hora}$$

Cálculo de la cantidad de galones de GLP por hora que se necesita para producir las mismas libras de vapor que el diésel 9 844,81 lbm

$$\text{Galones/hora} = \frac{(m_{\text{vapor}}) (\Delta H_{\text{vapor}})}{\text{Eficiencia} \times \text{P.C}}$$

$$\text{GLP} = \frac{(9\,844,81 \text{ lb}_m/\text{hora}) (1\,047,11 \text{ BTU}/\text{lb}_m)}{(0,87) \times (92\,000 \text{ BTU}/\text{galón})} = 128,79 \approx 129 \text{ galones/hora}$$

Estimación de la cantidad de galones que se necesita con cada combustible y su costo para producir 1,000 lb_m vapor.

$$\text{Galones Diésel} = \frac{(1,000 \text{ lb}_m) (91 \text{ galones/hora})}{9\,844,81 \text{ lb}_m/\text{hora}} = 9,24 \approx 9 \text{ galones}$$

$$\text{Galones GLP} = \frac{(1,000 \text{ lb}_m) (129 \text{ galones/hora})}{9\,844,81 \text{ lb}_m/\text{hora}} = 13,10 \approx 13 \text{ galones}$$

$$\text{Costo Diésel} = (\text{Q } 27,26 / \text{gal diésel}) (9 \text{ gal diésel}) = \text{Q. } 245,34$$

$$\text{Costo GLP} = (\text{Q } 16,00 / \text{gal diésel}) (13 \text{ gal diésel}) = \text{Q. } 208,00$$

Facturación estimada por mes con ambos combustibles

$$\text{Facturación Diésel} = (65\,520 \text{ gal/mes}) (\text{Q } 27,26/\text{gal}) = \text{Q } 1\,786\,075,20/\text{mes}$$

$$\text{Facturación GLP} = (92\,880 \text{ gal/mes}) (\text{Q } 16,00/\text{gal}) = \text{Q } 1\,486\,080,00/\text{mes}$$

Beneficio del uso del GLP

$$\text{Q. } 1\,786\,075,20/\text{mes} - \text{Q } 1\,486\,080,00/\text{mes} = \text{Q } 299\,995,20/\text{mes}$$

6. IMPACTO AMBIENTAL

6.1. Efecto invernadero

Es un fenómeno por el cual los gases que se encuentran en la atmósfera retienen el calor emitido por la tierra. Este calor proviene de la natural radiación solar, pero cuando rebota sobre la superficie terrestre queda atrapado por la barrera de gases. Al quedarse estos gases entre suelo y atmósfera, sin poder quedar liberados al espacio, el efecto producido a escala planetaria es muy similar al de un invernadero. El efecto invernadero es la principal causa del calentamiento global.

- **Causas del efecto invernadero**

Los gases responsables de este efecto son, principalmente, el dióxido de carbono y el metano. Estos gases, junto a otros, han existido desde los orígenes de la Tierra, pero su presencia en la atmósfera empezó a multiplicarse durante la revolución industrial, momento en el que los avances tecnológicos obligaron al uso de combustibles fósiles. A partir de entonces, esta dinámica no ha hecho más que incrementarse, alcanzando un 35 % más de dióxido de carbono que en los niveles preindustriales.

La dependencia casi total de un modelo energético basado en el carbón, el gas y el petróleo está generando unas alteraciones en el clima de efectos desastrosos para la vida en el planeta.

Las emisiones de gases aumentan en torno al 0,4 % anual y seguirán haciéndolo si no se modifica nuestro abastecimiento energético.

6.2. Valorización del impacto ambiental

La valorización y evaluación del impacto ambiental resulta de un diagnóstico de la presión que ejercen las diferentes industrias sobre el medio ambiente, específicamente para efecto de este trabajo de graduación aquellas que requieren para sus procesos la utilización de energía térmica, y para eso son evaluados los aspectos relacionados con generación de emisiones, vertimientos y residuos sólidos, así como las consecuencias del proceso sobre la salud humana, con el objetivo de promover la toma de decisiones en el nivel gerencial, público y privado, a favor del uso racional de los recursos naturales, el mejoramiento de la eficiencia del proceso de combustión y la minimización de los efectos sobre la población afectada.

Los principales aspectos e impactos ambientales asociados al proceso de combustión se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Contaminación atmosférica

Ocasionada por la emisión de gases y partículas, entre las cuales se cuentan monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, material particulado, humos metales pesados y formación de gases oxidantes como el ozono, al igual de ácidos como nítrico y sulfúrico.

- Contaminación hídrica

La contaminación hídrica relacionada con el proceso de combustión, se encuentra asociada a la utilización del recurso agua, en procesos de enfriamiento y limpieza de equipos principalmente. La carga contaminante del vertimiento en estos casos se encuentra relacionada con la presencia de fosfatos, los cuales se emplean para evitar la corrosión y la formación de costras en tuberías.

6.3. Principales contaminantes atmosféricos del medio ambiente

Algunos de los principales contaminantes atmosféricos son sustancias que se encuentran de forma natural en la atmosfera. Se consideran contaminantes cuando sus concentraciones son notablemente más elevadas que la situación normal. Así se observa en la tabla XVIII en la que se comparan los niveles de concentración entre aire limpio y contaminado.

- Óxidos de carbono

La presencia en la atmósfera se manifiesta, sobre todo en forma de dióxido de carbono (CO_2), en una fracción correspondiente a 315 ppm, así como monóxido de carbono (CO) en aire. Para que este fuera considerado como no contaminante su proporción debería ser $< 1\text{ppm}$ de monóxido de carbono.

- Monóxido de carbono (CO)

Es un gas sin color, olor ni sabor. Es un contaminante primario. Es tóxico porque envenena la sangre impidiendo el transporte de oxígeno. Se combina

fuertemente con la hemoglobina de la sangre y reduce drásticamente la capacidad de la sangre de transportar oxígeno.

- Dióxido de carbono (CO₂)

Es un gas inodoro e incoloro que se desprende en la respiración, en la combustión y en algunas fermentaciones. La respiración interna es un proceso por el cual el oxígeno es transportado a los tejidos corporales y el dióxido de carbono es tomado de ellos y transportado al exterior. El dióxido de carbono es un guardián del pH de la sangre, lo cual es esencial para sobrevivir.

Tabla XIX. **Análisis del aire natural**

Componentes	Aire limpio	Aire contaminado
SO ₂	0,001 – 0,01 ppm	0,02 – 2 ppm
CO ₂	310 – 330 ppm	350 – 700 ppm
CO	< 1 ppm	5 – 200 ppm
NO _x	0.001 – 0.01 ppm	0.01 – 0.5 ppm
Hidrocarburos	1 ppm	1 – 20 ppm
Partículas	10 – 20 g/m ³	70 – 700 g/m ³

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Composición del aire natural**

Componentes	% Volumen	% Peso
Nitrógeno	78,03	75,58
Oxígeno	20,99	23,08
Argón	0,94	1,28
Dióxido de carbono	0,35	0,053
Neón	0,0024	0,0017
Otros gases inertes	0,0024	0,0017

Continuación de la tabla XX.

Hidrógeno	0,00005	0,000004
-----------	---------	----------

Fuente: elaboración propia.

6.4. Beneficios sobre el medio ambiente

En la comparación del uso de GLP y el diésel en procesos térmicos se verá que existen excelentes ventajas y diferencias, siendo de importancia el grado de contaminación.

El GLP (acrónimo de gases licuados del petróleo) es un gas combustible extremadamente limpio, ofrece numerosas ventajas, tanto a los usuarios finales como a la sociedad. Se licúa con facilidad, lo que facilita su transporte y almacenamiento y lo convierte en una opción energética muy versátil.

El GLP es una alternativa a los combustibles fósiles convencionales de bajo contenido de carbono y disponibilidad inmediata, en la actualidad está desplazando el uso del diésel. Su combustión emite un 33 % menos dióxido de carbono que el carbón y un 15 % menos que el diésel. Ofrece importantes ventajas medioambientales, en especial en términos de la calidad del aire interior y exterior. Se caracteriza por su baja emisión de partículas y óxido de nitrógeno, además de bajo contenido de azufre.

En virtud de que el gas produce una combustión limpia (sin partículas visibles) y sin presencia de compuestos de azufre corrosivos, resulta ser menos agresivo para las calderas, lo cual se traduce en menores paradas y costos de mantenimiento por limpieza y cambio de tubos, o ductos corroídos entre otros.

Mayor eficiencia en aprovechamiento de la energía, ello resulta porque al producir menos depósitos de hollín en los tubos y menores inquemados en la combustión, las pérdidas de energía por chimenea son menores y se logra una mayor eficiencia térmica en la caldera.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la medición de gases de combustión para cada combustible. Como dato relevante de estas pruebas de medición se puede observar la cantidad de ppm que se obtienen de monóxido de carbono, utilizando GLP y diésel. El monóxido de carbono es el principal contaminante y para que se no se considere perjudicial se debe encontrar en cantidades menores al 1 ppm.

Tabla XXI. **Medición de los gases de combustión utilizando GLP**

DATOS GENERALES						
Caldera marca: Cleaver Brooks Modelo: CB-200-300-150						
Tipo: piro-tubular			# Pasos : (4)			
Potencia nominal: 300 (BHP)			Presión de diseño: 150 (psi)			
Combustible utilizado: GLP			Flujo de ingreso: 132,086 gal/h			
MEDICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN						
Parámetro	1	2	3	4	5	PROM
Temperatura °C	150	152	148	155	158	152,6
O ₂ %	7	6,8	7,2	7,0	6,6	6,92
CO ppm	0,02	0,03	0,024	0,022	0,032	0,0256
CO ₂ %	11	10,8	11,2	11,4	10,8	11,04
Hora	14:00	14:10	14:20	14:30	14:50	

Fuente: Pepsico, S. A.

Tabla XXII. **Medición de los gases de combustión utilizando diésel**

DATOS GENERALES						
Caldera marca: Cleaver Brooks Modelo: CB-200-300-150						
Tipo: pirotubular			# Pasos : (4)			
Potencia nominal: 300 (BHP)			Presión de diseño: 150 (psi)			
Combustible utilizado: diésel			Flujo de ingreso: 110 gal/h			
MEDICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN						
Parámetro	1	2	3	4	5	PROM
Temperatura °C	169	178	225	220	218	202
O ₂ %	6,6	7	10,6	9,8	9,4	8,68
CO ppm	27	35	16	16,4	15,8	22,04
CO ₂ %	10,7	9,10	7,7	7,2	7,0	8,34
Hora	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50	

Fuente: Pepsico, S. A.

6.5. Buenas prácticas operativas

En este ítem se agrupan todas aquellas actividades encaminadas a la modificación y al rediseño de las actividades asociadas al proceso de combustión y de los sistemas utilizados para tal fin.

Entre las principales actividades, catalogadas como buenas prácticas, se tiene el control del proceso de combustión y monitoreo, actividad que se constituye en una de las etapas fundamentales para la búsqueda de ahorros y eficiencias en la utilización de combustibles.

- Control del caudal de aire

El control de aire, aparte de garantizar la proporción de la mezcla combustible deseada, determina, de alguna manera, la temperatura de los gases de combustión y la cantidad de energía que se puede aprovechar de los mismos, acercando con esto al proceso de combustión completa.

Algunos aspectos importantes para tener en cuenta en la regulación del caudal de aire en el proceso de combustión son los siguientes:

- Al aumentar el exceso de aire, se disminuye la eficiencia de combustión, aumentando así el consumo de combustible.
 - Al aumentar el exceso de aire y manejar dentro del proceso temperaturas excesivamente altas, se reduce la eficiencia térmica del sistema.
 - En los sistemas de combustión, no debe permitirse diferencias de temperaturas entre la salida de chimenea y el proceso en sí, superiores a 150 °C.
- Control de mezcla en el quemador

En procesos de combustión complejos, como puede ser los sucedidos en calderas pirotubulares, el quemador debe poseer un margen de operación para distintos niveles de requerimientos de energía, además de responder a ciclos de control automático de encendido y seguridad.

Entre los parámetros que deben de tenerse en cuenta para la selección de un quemador se incluye la tecnificación del proceso, el costo de la energía (combustible) y las condiciones disponibles de presión.

Otros aspectos que deben de tenerse en cuenta en la operación de un quemador son los siguientes:

- Revisar y limpiar periódicamente boquillas de quemadores y parrillas.
- Utilizar la temperatura de presión de atomización acorde a la viscosidad del líquido en caso de trabajar con un combustible en este estado.
- No sobrepasar la temperatura de atomización, ya que esto ocasiona un mayor consumo energético, y en consecuencia, mayores costos en el consumo de combustible.
- Evaluar que la relación airecombustible se pueda controlar consistentemente.
- Utilizar el fluido de atomización adecuado para aquellos quemadores que así lo requieran.
- Mantener el rango de presión del combustible en los valores recomendados por el fabricante en el caso de combustible gaseoso.
- Precalentar el aire de combustión con el calor residual de los humos.

- Recirculación de los gases de escape

Mediante la recirculación de gases de escape se consigue recuperar parte de los hidrocarburos no quemados en el interior del ciclo de combustión, reduciendo así el costo de combustible y optimizando la eficiencia energética del sistema de combustión.

- Control de combustible

Teniendo en cuenta que gran parte de las emisiones generadas al ambiente por los procesos de combustión se refieren al tipo de combustible utilizado, las unidades empresariales deben garantizar un combustible de características apropiadas (contenido de azufre y nitrógeno).

- Otras buenas prácticas de manufactura

Dentro de otras prácticas operativas que hacen de la combustión un proceso más eficiente se tienen las siguientes:

- Limpiar las superficies de intercambio de calor periódicamente.
- Controlar los aumentos progresivos en la temperatura de humos y gases de escape.
- Realizar deshollinamiento periódico a los sistemas de combustión.
- Revisar los sistemas de control, tales como termómetros y manómetros, ya que su descalibración pueden llegar a afectar ostensiblemente el desarrollo del proceso.

- No permitir concentraciones de monóxido de carbono superiores a 400 mg/L en los gases de escape.
- Atomizar los líquidos a la presión recomendada mediante la utilización de fluidos, con el fin de acercar el proceso a la combustión completa.
- Vigilar y evaluar periódicamente la coloración de la llama.
- Regular el tiro de la chimenea, mediante la utilización de un dámper.
- Drenar periódicamente el agua que pueda almacenarse en los tanques de combustible.
- Manejar registros generales del proceso de combustión, en los que se incluyan, entre otros parámetros: presión, temperatura de aire y combustible.
- Si el sistema de combustión lo permite, realizar el recalentamiento y alimentación en contra corriente.

7. SEGURIDAD INDUSTRIAL

7.1. Seguridad y normas en calderas industriales

La seguridad se encarga de evitar que los trabajadores de una empresa sufran accidentes de trabajo.

La higiene industrial se dedica a la participación, reconocimiento, evaluación y control de aquellos factores o elementos estresantes del ambiente en el lugar de trabajo, los cuales pueden causar enfermedad, deterioro de la salud, incomodidad e ineficiencia de importancia entre trabajadores.

Riesgos de una caldera

- Aumento súbito de la presión: sucede, generalmente cuando se disminuye el consumo de vapor, o cuando se descuida el operador y hay exceso de combustible en el hogar o cámara de combustión.
- Descenso rápido de la presión: se debe al descuido del operador en la alimentación del fuego.
- Descenso excesivo del nivel de agua: es la falla más grave que se puede presentar. Si este nivel no ha descendido más allá del límite permitido y visible , bastará con alimentar rápidamente, pero si el nivel ha bajado demasiado y no es visible, en el tubo de nivel, deberá considerarse seca la caldera y proceder a quitar el fuego, cerrar el consumo de vapor y dejarla

enfriar lentamente. Antes de encenderla nuevamente, se deberá inspeccionarla en forma completa y detenida.

- Explosiones de las calderas: son desastres de gravedad extrema, que casi siempre ocasionan la muerte a cierto número de personas. La caldera se rasga, se hace pedazos, para dar salida a una masa de agua y vapor; los fragmentos de la caldera son arrojados a grandes distancias.

Cuando el nivel de agua baja, deja al descubierto las planchas, que, estando en contacto con el calor de la combustión, se recalientan al rojo. Al recalentarse estas pierden gran parte de su resistencia, el vapor se produce en menor cantidad por la disminución de la superficie de calefacción.

Las incrustaciones actúan como aislante dejando las planchas de la caldera sometidas a calor y sin contacto con el agua. De esta manera se van recalentando y perdiendo su resistencia hasta que no son capaces de resistir la presión y se produce la explosión.

- Seguridad operativa para el área de calderas: las calderas de vapor deben operarse siempre con todos sus dispositivos de seguridad.
 - Debe asegurarse que los manómetros estén siempre en buenas condiciones de operación.
 - Todas las calderas deben ser inspeccionadas mensualmente en los siguientes componentes:

- Cámara de agua: grado de incrustación y llaves de purga.
 - Cámara de fuego: acumulación de hollín y limpieza de toberas.
-
- Las inspecciones y reparaciones deben hacerse con base en la ficha técnica de las mismas.
 - El área de calderas debe mantenerse limpia, libre de obstrucciones y materiales combustibles.
 - Ninguna caldera debe ser operada con fugas de vapor, gas, combustible humo o aire de combustión.
 - Estos u otros desperfectos de funcionamiento deben ser reportados de inmediato al Departamento de Mantenimiento.
 - El área de Calderas debe estar señalizada y rotulada, con mensajes de precaución y/o peligro, como: “Equipo caliente”, “Peligro”, “Área Restringida”, “Solo personal autorizado”.
 - En esta área siempre debe de utilizarse protección auditiva que tenga el respaldo de estudios técnicos (orejeras).
 - Al realizar tareas de mantenimiento, se debe circular el área para evitar el ingreso de personas ajenas, y colocar los respectivos avisos.
 - Al momento de realizar un trabajo de mantenimiento en el interior de la caldera, una persona debe quedarse afuera para emergencias.

- Seguridad operativa en el área de tubería de vapor
 - Todo el personal que trabaje en el área debe seguir los procedimientos establecidos, incluyendo las normas de seguridad.
 - Todo personal que trabaje en el área debe utilizar el equipo de protección personal que le fuere asignado.
 - Toda tubería de vapor de agua debe ser completamente hermética y suspendida, de acuerdo a las normas internacionales.
 - La tubería de conducción de vapor debe estar siempre aislada con material adecuado y donde halla posibilidad de contacto con personas, debe tener una protección mecánica, además del aislamiento y rótulos de “peligro”, “tubería caliente”, “no tocar”.

Figura 27. Tuberías de conducción de vapor aisladas



Fuente: Pepsico, S.A.

- Sala de calderas: el reglamento también define las características mínimas que debe poseer el lugar donde se instala el generador de vapor o caldera.

Si el generador de vapor tiene una superficie de calefacción igual o superior a 5 m² y cuya presión de trabajo exceda a 2.5 Kg. /cm², se instalará en un recinto específico para su utilización.

Esta sala será de material incombustible y estará cubierta de techo liviano.

No podrá ubicarse la caldera sobre construcción destinada a habitación o lugar de trabajo.

La distancia mínima entre la caldera y las paredes del recinto será de un metro, esta misma distancia debe respetarse entre la caldera y cualquier otro equipo o instalación.

Esta sala deberá tener dos puertas o más, en direcciones diferentes, estas se deben mantener en todo momento despejadas y deberán permanecer sin llave mientras las calderas están funcionando.

Figura 28. **Sala de calderas**



Fuente: Pepsico, S.A.

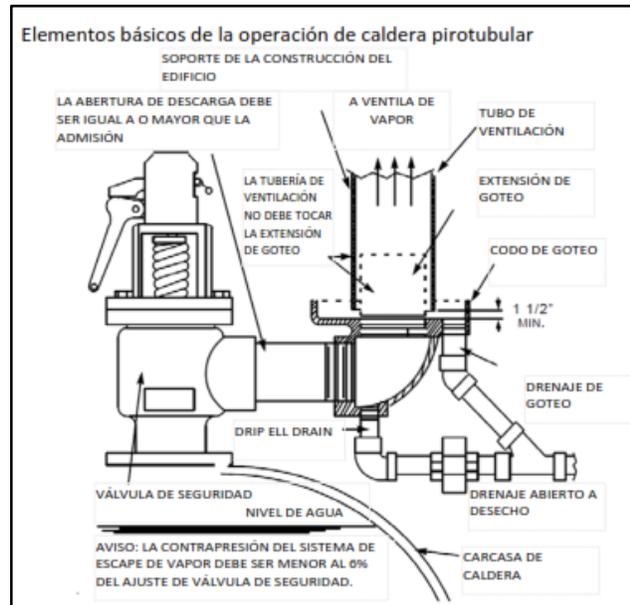
7.2. Equipos de seguridad industrial implementados en el área de calderas

Los dispositivos de seguridad de calderas son:

- Válvula de seguridad

Todas las calderas tienen una o más válvulas de seguridad, cuya finalidad es dar salida al vapor de la caldera cuando se sobrepasa la presión normal de trabajo, con lo cual se evitarán presiones excesivas en los generadores de vapor.

Figura 29. **Válvula de seguridad**



Fuente: *Manual de operación, servicio y partes CB*, Partes principales de una válvula de seguridad. p. 16.

- Tapón fusible

Consiste en un tapón de bronce, con hilo para ser atornillado al caldero, y tienen un orificio cónico en el centro, en el cual se rellena con una aleación metálica (plomo, estaño), cuyo punto de fusión debe ser de 250 °C como máximo.

- Silbato de alarma

Accesorios de seguridad que funcionan cuando el nivel de agua en el interior de la caldera ha descendido más allá del nivel normal. Consiste en

un tubo metálico con el extremo inferior abierto y sumergido al interior de la caldera, hasta el nivel mínimo admisible.

Figura 30. **Mirilla de nivel de corte por nivel bajo de agua**



Fuente: *Manual de operación, servicio y partes CB*. Mirilla de nivel de agua. p. 24.

- Presostato de baja, presostato de alta, presostato de operación, presostato de seguridad (límite), presostato de gas y de combustible.

Figura 31. Presostatos de control de vapor



Fuente: *Manual de operación, servicio y partes CB. Presostatos de control de vapor.* p. 15.

El área de calderas deberá estar dotada de un sistema de extinción de fuego que contenga extintores tipo BC, así como uno de señalización, indicando que es prohibido fumar en el área y que existen productos inflamables.

Figura 32. Área de almacenamiento del GLP



Fuente: Pepsico, S. A.

El equipo de protección personal en el área consiste en:

- Utilizar guantes de cuero de manga corta, para protección contra riesgo mecánico, eléctrico y térmico.
- Utilizar cascos de seguridad, para proteger la cabeza contra impactos, fuego y productos químicos.
- Utilizar protección auditiva, en presencia de altos niveles de ruido.
- Antojos contra salpicaduras.
- Utilizar protección de vías respiratorias; mascarilla cuando se realice un mantenimiento en las calderas.

Figura 33. Equipo de protección personal



Fuente: Equipo de protección personal. <http://www.acerosarequipa.com>. Consulta: 20 de agosto de 2014.

CONCLUSIONES

1. Todas las empresas buscan minimizar los costos de operación para ser competitivas. Dar a conocer las oportunidades de ahorro de energía constituye una herramienta que, además de disminuir su consumo, ayuda a la conservación de los equipos de vapor.
2. La caldera es un sistema que cumple con los principios de la primera ley de la termodinámica, ya que la energía utilizada para el calentamiento del agua proviene de una combustión. Asimismo, la energía que no pudo ser utilizada en el calentamiento de agua se pierde en forma de calor por radiación y convección, en los gases de combustión y agua de purga como conducción. La energía no utilizada no se destruye.
3. La caldera es un sistema que opera bajo lo establecido por la segunda ley de la termodinámica, menor al 100 % de eficiencia, debido a distintas pérdidas durante el proceso. Lo más importante se debe a la diferencia de temperatura entre la superficie de la caldera y la temperatura del ambiente, lo cual crea una pérdida de energía en forma de calor.
4. Se necesitaron 129 galones de GLP para producir las mismas libras masa por hora ($lb_m/hora$) de vapor que se producirían con 91 galones de diésel y con un costo menor.
5. Este proyecto genera una tasa de retorno del 72,4 %, tiene un valor actual neto de \$482,5 MUSD, logrando que la inversión se recupere en 1,4 años.

6. Las condiciones de la caldera no fueron ideales debido a las pérdidas de calor y purga. Al haber irreversibilidad se redujo la generación de vapor de agua teniendo como resultado una eficiencia térmica de 83 % con el diésel y 87 % con el GLP.
7. En cuanto a los productos de combustión (contaminación), el GLP es un combustible menos contaminante, ya que no contiene plomo, ni azufre, ni sus correspondientes óxidos, la combustión no produce olores ni residuos (hollín, ni humos), los productos de la combustión son dióxido de carbono, agua y óxidos de nitrógeno.
8. La sociedad y la propia evolución del mercado energético demandan cada vez más un suministro de energía limpia, cómoda y económica para cubrir sus necesidades. Esto está impulsando el desarrollo del GLP, que en la actualidad se utiliza para aplicaciones muy variadas.
9. En virtud de que el GLP produce una combustión limpia (sin partículas visibles) y sin presencia de compuestos de azufre corrosivos, resulta ser menos agresivo para las calderas, lo cual se traduce en menores paradas y costos de mantenimiento por limpieza de tubos, cambio de tubos o ductos corroídos, entre otros.
10. Existe una oportunidad única para muchos usuarios de calderas de vapor de acceder a un combustible a toda luz eficiente, económico y de baja emisión de contaminantes, pero es necesario realizar primero un análisis de factibilidad técnica y económica para cada caso.

RECOMENDACIONES

1. El costo de la producción de vapor puede sufrir variaciones debido al precio del combustible, que puede aumentar o disminuir.
2. Para el desarrollo de los cálculos tomar en cuenta las reglas prácticas y no solamente las reglas teóricas. Durante el manejo de aparatos en la vida real, el funcionamiento de los mismos no es exactamente como lo dicta la teoría (debido a la irreversibilidad).
3. Lo ideal es que una caldera trabaje en forma continua no apagándose y que esta opere en sus puntos de máxima eficiencia, como generalmente ocurre para cargas superiores al 75 %.
4. Llamar la atención sobre los importantes ahorros de energía y combustible que pueden ser logrados con cuidados y regulaciones mínimas de las calderas de una planta.
5. Crear la cultura del uso de GLP para el consumo interno del país, por diferentes ventajas que tiene con respecto a otro combustible.
6. Si mediante la vaporización natural no se obtiene la cantidad suficiente para suministrar de manera continua la fase gaseosa que se precisa para el consumo, se ha de instalar un sistema de vaporización forzada.

7. Es necesario implementar un buen programa de seguridad industrial en el área de vaporizadores, debido a que el tipo de vaporizadores que están utilizando no cumplen con las normas de seguridad de atmósferas inflamables.

8. Sustituir los medidores de consumo de GLP, que actualmente están instalados por otros más precisos los cuales permiten obtener lecturas de consumo más exactas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARTÍCULO TÉCNICO. *Análisis de la eficiencia en calderas*. [en línea]. <www.thermal.cl/prontus.../site/.../articulo___eficiencia_en_calderas.pdf>. [Consulta: 19 de agosto de 2014].
2. CLEAVER-BROOKS. *Manual de operación, servicio y partes*. USA, 2003. 53 p.
3. CONAE. *Consejos para ahorrar energía*. [en línea]. <www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/.../2/Agosto2005.pdf>. [Consulta: 25 de julio de 2014].
4. CORDÓN ADQUI, Ángel René. *Diseño de plan de mantenimiento preventivo para calderas pirotubulares Cleaver Brooks de una institución hospitalaria*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. 22 p.
5. *Eficiencia en calderas y combustión*. [en línea]. <http://www.cnpml.org.sv/UCATEE/ee/docs/Calderas_02.pdf>. [Consulta: 25 de julio de 2014].
6. GUÍA DE REFERENCIA TÉCNICA - Spirax Sarco. [en línea]. <www.spiraxsarco.com/cl/pdfs/training/gcm_04.pdf>. [Consulta: 9 de agosto de 2014].

7. LARIOS REN, Hugo Tomas. *Diseño del plan de mantenimiento preventivo del área de calderas del Hospital Nacional Santa Elena de Santa Cruz del Quiché, Quiché*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 29 p.
8. MÁRQUEZ MARTÍNEZ, Manuel. *Combustión y quemadores*. España: Marcombo, 2005. 79 p.
9. REPSOL. *Propiedades del GLP*. [en línea]. <www.repsol.com>. [Consulta: 12 de agosto de 2014].
10. SELMEC. Equipos Industriales. *Manual de mantenimiento de caleras y sistemas de distribución de vapor*. México: SELMEC, 1999. 74 p.
11. TREJO FOLGAR, Luis Eduardo. *Estudio y propuesta para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor de la empresa Agro Industrias Nacionales, S. A*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 97 p.
12. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. *Conversión a gas natural seco de una caldera pirotubular con potencia de 500 BHP que trabaja con diésel-2*. [en línea]. <cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/406/1/melendez_gs.pdf>. [Consulta: 2 de agosto de 2014].

ANEXOS

Anexo 1. Combustibles

Diésel

- Cuando es obtenido de la destilación del petróleo se denomina diésel y cuando es obtenido a partir de aceites vegetales se denomina biodiesel.
- Petro-diesel es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 y 350 °C a presión atmosférica. El gasóleo es más sencillo de refinar que la gasolina y suele costar menos. Por el contrario, tiene mayores cantidades de compuestos minerales y de azufre.
- El gasóleo, también denominado gasoil o diésel, es un líquido de color blancuzco o verdoso y de densidad sobre 850 kg/m³ compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado, principalmente, como combustible en motores diésel y calderas.
- El gasóleo tiene aproximadamente un 18 % más energía por unidad de volumen que la gasolina, lo que sumado a la eficiencia de los motores diésel contribuye a que su rendimiento sea mayor.
- La inyección del diésel en la caldera está controlada por volumen o por tiempo de la válvula solenoide. Las variaciones en la densidad y

viscosidad del combustible resultan en variaciones en la capacidad de generación de vapor del equipo, en las emisiones y en el consumo.

- El diésel tiene propiedades lubricantes, se piensa que los componentes lubricantes del diésel son los hidrocarburos más pesados y las sustancias polares.

Gas licuado de petróleo: GLP

- El GLP es un combustible limpio, cuando se quema debidamente combinado con el aire, no forma hollín, ni deja mal sabor el los alimentos preparados con él.
- No es tóxico: solo desplaza el oxígeno, por lo que no es propio respirarlo mucho tiempo.
- No tiene olor cuando se produce y licúa, pero se le agrega una sustancia de olor penetrante para detectarlo cuando se fugue, llamada etyl mercaptano.
- Es muy inflamable cuando se escapa y vaporiza se enciende violentamente con la menor llama o chispa.
- Es excesivamente frío, porque cuando se licuó se le sometió a muy bajas temperaturas debajo 0 °C, por lo cual al contacto con la piel producirá siempre quemaduras de la misma manera que lo hace el fuego.
- Es manejable con las debidas precauciones presenta un riesgo mínimo.
- Es económico por su rendimiento en comparación con otros combustibles.

- En fase gaseosa es más pesado que el aire, por ello, en caso de fugas tiende a ubicarse o depositarse en lugares bajos. En estado líquido es más liviano que el agua.
- Está compuesto, mayoritariamente, por propano y butano.
- Es una mezcla de gases (propano y butano) obtenidos de la destilación fraccionada del petróleo crudo, que a temperatura normal y a presión atmosférica permanece en estado gaseoso, pero que tiene la propiedad de pasar al estado líquido a presión.

Anexo 2. Ventajas y desventajas del diésel y GLP

	DIESEL	GLP
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rendimiento térmico con mayor potencia útil. • No requiere revisiones frecuentes. • Consumen menos combustible y su potencia es mayor. • No requieren trabajar a altas revoluciones para producir su máxima potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • No contiene plomo ni azufre. • Por su condición de gas, facilita una combustión más completa y limpia, que se refleja en la reducción del 90% de emisión de partículas. • Tiene mayor resistencia al autoencendido que otros, por tener 103 octanos. • Resulta económico por su alto rendimiento térmico y requieren instalaciones sencillas, de bajo costo de inversión y mantenimiento. • Proporcionan un calentamiento preciso y homogéneo, debido a la constancia de su poder calorífico. • Es fácil alcanzar mezclas homogéneas de aire combustible, lo que permite mejorar sustancialmente la eficiencia en la utilización del producto. Su rango de eficiencia térmica puede alcanzar el 90%. • La adaptación de los equipos para utilizar GLP es sencilla, económica y de montaje rápido. • Arrancan a cualquier temperatura.
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor peso, más ruidoso y costo elevado. • Arranque más difícil y menor régimen de revoluciones. • Reparaciones costosas. • Demoran en arrancar a bajas temperaturas. • Su mantenimiento a corto plazo es más caro, pues debido al tamaño de sus piezas se requiere más aceite. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumen mayor combustible y ofrecen menos potencia. • Tiene menor durabilidad.

Fuente: FLORES SÁNCHEZ. <www.unac.edu.pe/.../vri/.../IF FIME.pdf>. Consulta: 10 de agosto de 2014.

