

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA TERMODINÁMICA**



**ANÁLISIS DE FACTORES TÉCNICO-ECONÓMICOS PARA
DETERMINAR EL COMBUSTIBLE ÓPTIMO PARA UNA
CALDERA.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA TERMODINÁMICA**

**PRESENTA
GABRIEL ERNESTO PANDO MARTÍNEZ**

**DIRECTOR
DR. ALEJANDRO ADOLFO LAMBERT ARISTA**

MEXICALI, B.C.

DICIEMBRE DE 2009

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, la salud y por permitirme lograr la conclusión de los estudios de la Maestría en Ingeniería Termodinámica y hoy mi tan ansiada tesis.

A mi hijo José Gabriel Pando Jaime a quien dedico este trabajo, por darme la mayor de las felicidades, haber nacido.

A mis padres, hermanos y esposa por su apoyo incondicional, para el logro de todas las metas que me he planteado en la vida.

Al Dr. Alejandro Adolfo Lambert Arista, Dr. Nicolás Velázquez Limón y Dr. Juan de Dios Ocampo Díaz, por su amistad, consejos, asesorías y la paciencia que tuvieron para un servidor.

A todos los maestros, revisores y jurados por su tiempo y dedicación, sin ustedes no se hubieran contado con los elementos necesarios que han hecho de mi lo que profesionalmente hoy soy.

Al personal de Fábrica de Papel San Francisco S.A. de C.V. (fapsa), muy en especial a los Ingenieros Darío Palma y Meza Espinoza y Héctor Fernando de la Torre Martínez quienes creyeron en mi y me brindaron todas las facilidades para la realización de esta tesis.

A mis compañeros y amigos muy en especial al M.C. Sergio Efraín Beltrán Beltrán, Ing. Jorge Luis García Cantón, C.P. Norma Angélica Jaime Chávez, M.A. Jesús Héctor Meza López, M.C. Leticia Villafuerte León, M.C. Ricardo Bermúdez Menchaca, M.C. Rubén Álvarez Morales, Ing. Alfonso González Cárdenas, M.C. Juana Barrientos Contreras, M.C. María del Carmen Palazuelos Solorza, por su ayuda, entusiasmo y el animo brindado para la culminación de este trabajo.

Resumen

Los principales energéticos utilizados en Fabrica de Papel San Francisco S.A. de C.V. (fapsa) en la operación de la caldera Babcock & Wilcox es el diesel, combustóleo y gas natural ya que cuenta con quemadores adaptados para el uso de cualquiera de estos combustibles. Sin embargo por razones económicas el combustóleo y el gas natural son los más utilizados a partir del año 1999, año en que fapsa incorpora el gas natural a su planta molino. En un principio el uso del gas natural brindaba mayores beneficios ya que aunado a la obtención de una combustión más limpia se contaba con una producción más económica del vapor. A partir del año 2000 el gas natural sufre un incremento en su precio inesperado, motivo por el cual fapsa decide alternar los combustibles a fin de poder obtener una generación de vapor lo más económicamente posible, que le permita ser una empresa altamente competitiva.

Para fines prácticos, una de las ecuaciones más utilizadas para seleccionar el tipo de combustible más factible técnica y económicamente es:

$$\text{Generación calorífica} = \text{Consumo de combustible} \times \text{Poder calorífico inferior del combustible}$$

Sin embargo, ésta no toma en cuenta la eficiencia en la generación del vapor ni el uso de aditivos para mejorar la combustión, entre otras variables. De ahí que surge la necesidad de contar con una metodología automatizada mediante un programa de cómputo que incorpore las variables más importantes para determinar el consumo del combustible seleccionado.

El programa desarrollado en el presente trabajo fue realizado en el Sistema Internacional de Unidades y cuenta con algunas de las conversiones más utilizadas si se tiene la medición en el Sistema Inglés. Además, incorpora una serie de variables que en su mayoría están en los reportes generados día a día por el operador, siendo éstas las que

tienen mayor incidencia en la cantidad de combustible a utilizar para la generación del vapor.

El criterio para decidir el combustible a utilizar es básicamente el costo necesario para generar el vapor, y se despliega en la pantalla de resultados el combustible que resulto ser más factible así como los ahorros obtenidos al seleccionarlo, sin embargo el programa únicamente considera algunas de las variables de mayor importancia en el uso del combustible, por lo tanto es preciso señalar algunos comentarios que pudieran, dependiendo del ahorro obtenido cambiar el criterio de decisión del combustible a utilizar, estos son:

- El vapor utilizado en el precalentamiento del combustóleo, en la atomización y en el sopleo, es un vapor que no se retorna como condensado, por lo tanto, hay que añadir una mayor cantidad de agua de reposición que con el gas natural, misma que tiene que ser tratada.
- Para el suministro del combustóleo a la caldera se requiere del uso de una bomba, la cual demanda cierta cantidad de energía eléctrica, asimismo para recircular el combustóleo en el tanque (si se requiere) y para la descarga del mismo. Este costo por concepto de energía eléctrica no se presenta con el uso del gas natural.
- El costo de mantenimiento se espera sea superior al utilizar combustóleo ya que debido a las impurezas del mismo, se forman escorias que se van acumulando, reduciendo el área de paso de los gases, aunado a lo anterior para el manejo del combustóleo se requieren más equipos como bombas, intercambiadores de calor, válvulas de alivio, reguladores de presión, termómetros, manómetros, trampas de vapor entre otros.

El programa es una herramienta que permite determinar con certeza el combustible más idóneo a utilizar para la generación de vapor en la caldera Babcock & Wilcox de Fábrica de Papel San Francisco S.A. de C.V. ubicada en su planta molino tissue máquina 1, y es responsabilidad exclusiva del usuario el ingreso de la información solicitada y la decisión del combustible a utilizar.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Lista de figuras, tablas y gráficas.....	vii
Nomenclatura.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivo específico.....	5
1.4. Metas.....	5
2. GENERALIDADES.....	6
2.1. Situación energética.....	6
2.1.1. Situación energética del combustóleo.....	6
2.1.2. Situación energética del gas natural.....	12
2.2. Combustión.....	17
2.2.1. Definición y clasificación de los principales fenómenos relacionados con la combustión.....	18
2.2.2. Temperatura de flama.....	20
2.2.3. Forma y apariencia de la flama.....	21
2.2.4. La estequiometría de la combustión.....	28
2.2.5. La combustión de hidrocarburos.....	31
2.2.6. Efectos de la turbulencia sobre la flama.....	32
2.2.7. Eficiencia de combustión.....	32
2.2.8. Contaminación atmosférica.....	33
2.3. Quemadores.....	36
2.3.1. Principales funciones del quemador.....	36
2.3.2. Principales puntos de evaluación del quemador.....	37
2.2.3. Principales componentes del quemador.....	39

2.4. Calderas.....	44
2.4.1. Tipos de calderas.....	45
2.4.2. Componentes principales.....	47
2.4.3. Funcionamiento de las calderas.....	50
3. DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	53
3.1. Generalidades.....	53
3.2. Balance termodinámico utilizando combustóleo.....	55
3.3. Balance termodinámico utilizando gas natural.....	59
3.4. Vapor requerido por servicios propios al usar combustóleo.....	62
3.5. Análisis económico.....	67
3.6. Diagrama de flujo.....	68
4. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	81
4.1. Generalidades.....	81
4.2. Resultados del programa	86
5. CONCLUSIONES.....	97
ANEXOS.....	99
Anexo I Precios al público de productos petrolíferos y gas natural.....	100
Anexo II Pérdidas de calor vs exceso de aire para el combustóleo.....	101
Anexo III Pérdidas de calor vs exceso de aire para el gas natural.....	102
Anexo IV Calores específicos de hidrocarburos líquidos.....	103
Anexo V Temperaturas mensuales promedio en Mexicali durante el 2008...	104
Anexo VI Velocidades del viento mensuales en Mexicali (2007-2008).....	104
Anexo VII Listado del programa	105
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	134

Lista de Figuras y Tablas.

Figuras

- Fig. 2.1.- Distribución de los combustibles en el sector industrial.
- Fig. 2.2.- Intensidad en el uso de combustibles en el sector industrial.
- Fig. 2.3.- Flama con geometría cercana a la ideal.
- Fig. 2.4.- Flama angosta, no llena la garganta.
- Fig. 2.5.- Flama con manchas en su coloración.
- Fig. 2.6.- Flama inestable.
- Fig. 2.7.- Flama con tendencia y retroceso y adherencia a las paredes.
- Fig. 2.8.- Flama con incidencia en la garganta del quemador.
- Fig. 2.9.- Oxígeno y CO₂ generado con respecto al exceso de aire para diferentes combustibles.
- Fig. 2.10.- Cantidad de CO generado en base al porcentaje de oxígeno a la salida de los gases de combustión.
- Fig. 2.11.- Corte de un quemador dual.
- Fig. 2.12.- Caldera de tubos de humo tipo escocés (pirotubular).
- Fig. 2.13.- Caldera de tubos de agua (acuotubular).
- Fig. 2.14.- Partes esenciales y algunas opciones necesarias para producir vapor por medio del calor liberado durante la combustión de un combustible.
- Fig. 2.15.- Circulación natural en una caldera de tubos de agua.
- Fig. 3.1.- Diagrama esquemático de la caldera utilizando combustóleo.
- Fig. 3.2.- Diagrama esquemático de la caldera utilizando gas natural.
- Fig. 3.3.- Diagrama esquemático del intercambiador de calor de la caldera
- Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo.
- Fig. 4.1.- Pantalla de inicio.
- Fig. 4.2.- Pantalla principal.
- Fig. 4.3.- Pantalla de ingreso de datos.
- Fig. 4.4.- Pantalla de conversiones.
- Fig. 4.5.- Pantalla de resultados.
- Fig. 4.6.- Costo de generación de vapor con combustóleo y gas natural.

- Fig. 4.7.- Costo de generación de vapor con combustóleo.
- Fig. 4.8.- Costo de generación de vapor con gas natural.
- Fig. 4.9.- Consumo de combustóleo vs exceso de aire.
- Fig. 4.10.- Consumo de gas natural vs exceso de aire.
- Fig. 4.11.- Eficiencia vs exceso de aire.
- Fig. 4.12.- Consumo de combustóleo vs temperatura gases de combustión en chimenea.
- Fig. 4.13.- Consumo de gas natural vs temperatura gases de combustión en chimenea.
- Fig. 4.14.- Eficiencia vs temperatura gases de combustión en chimenea.
- Fig. 4.15.- Consumo de combustóleo vs temperatura agua de alimentación.
- Fig. 4.16.- Consumo de gas natural vs temperatura agua de alimentación.
- Fig. 4.17.- Eficiencia vs temperatura agua de alimentación.
- Fig. 4.18.- Consumo de combustóleo vs temperatura ambiente.
- Fig. 4.19.- Consumo de gas natural vs temperatura ambiente.
- Fig. 4.20.- Eficiencia vs temperatura ambiente.

Tablas

- Tabla 2.1.- Demanda industrial de gas natural por componente de proyección.
- Tabla 2.2.- Efecto de algunas acciones sobre las flamas.
- Tabla 2.3.- Límites óptimos de control del agua de la caldera.
- Tabla 4.1.- Comparación costo de generación de vapor para combustóleo.
- Tabla 4.2.- Comparación costo de generación de vapor para gas natural.

Nomenclatura

Símbolo	Definición	Unidades
A	Área	m ²
A ₂	Área del orificio	plg ²
C	Coeficiente de forma, 1.79 para superficies planas y 1.016 para tuberías	Adimensional
CC	Caballo caldera	-
C _p	Calor específico a presión constante	kJ/kg K
C _p _p	Calor específico ponderado	kJ/kg K
Emss	Emisividad de la superficie aislada	Adimensional
Esp	Espesor del material aislante	m
h	Entalpia	kJ/kg
haa	Entalpia del agua de alimentación	kJ/kg
hc	Coeficiente de transferencia de calor por convección	W/m ² K
hce	Entalpia del combustóleo a la entrada	kJ/kg
hcon	Entalpia del condensado	kJ/kg
hcs	Entalpia del combustóleo a la salida	kJ/kg
h _{fg}	Entalpia de vaporización	kJ/kg
hr	Coeficiente de transferencia de calor por radiación	W/m ² K
hs	Coeficiente global de transferencia de calor	W/m ² K
hv	Entalpia del vapor	kJ/kg
kais	Conductividad térmica del termoaislante	W/m K
M	Masa	kg
Magc	Masa de agua generada en la combustión	kg
Mc	Masa de combustóleo	kg
Mcon	Masa de condensado	kg
Mv	Masa de vapor	kg
Mva	Masa vapor de atomización.	kg
Mvs	Masa vapor de sopleo	kg

Símbolo	Definición	Unidades
n_i	Número de moles	-
n_p	Número total de moles de los gases de combustión	-
P	Presión	kPa
PCI	Poder calorífico inferior	kJ/kg
PCS	Poder calorífico superior	kJ/kg
PE	Peso específico	Adimensional
q	Flujo de calor por unidad de superficie	W/m ²
Q	Calor	kJ/kg
Q_{gc}	Calor generado por el combustóleo	kJ/kg
Q_{gg}	Calor generado por el gas natural	kJ/kg
T	Temperatura	K
t_a	Temperatura ambiente	K
t_{op}	Temperatura de operación	K
t_{sup}	Temperatura supuesta de la superficie del termoaislante	K
V	Velocidad	m/h
w	Cantidad de vapor generado	kg
X	Fracción molal	-
$\bar{h}_P$	Entalpía de los productos	kJ/kg
$\bar{h}_R$	Entalpía de los reactivos	kJ/kg
ΔH°	Entalpía de Combustión	kJ/kg
$\sum_P$	Sumatoria de los Productos	-
$\sum_R$	Sumatoria de los Reactivos	-

Subíndices

0	Condiciones de referencia
1	Condiciones iniciales
2	Condiciones finales
i	i-esima
m	Número de átomos de hidrógeno que contiene el hidrocarburo
n	Número de átomos de carbono que contiene el hidrocarburo.
P	Productos
R	Reactivos

1. INTRODUCCION.

1.1. Antecedentes.

En el pasado se ponía poca atención, en general, a la conservación y uso eficiente de la energía empleada por los sistemas de calefacción, vapor, ventilación, acondicionamiento de aire, agua caliente, iluminación, etc., debido al costo relativamente bajo del combustible esta situación ha cambiado. Los costos de la energía seguirán aumentando y dado que han llegado a ser un gasto muy significativo, es necesario mantenerlos a un nivel mínimo.

Fábrica de Papel San Francisco S.A. de C.V. (fapsa) es una empresa nacional dedicada a la elaboración de papel sanitario y servilletas principalmente, y consciente de que para aumentar su competitividad es necesario reducir al mínimo el costo de facturación de sus energéticos ha realizado innumerables esfuerzos para lograr la disminución de dicho costo.

Uno de los principales energéticos utilizados en fapsa son los combustibles fósiles, mismos que se requieren principalmente en la operación de las calderas donde se genera el vapor que es utilizado para el secado del papel. En la caldera Babcock & Wilcox ubicada en su planta molino tissue máquina 1 se puede emplear diesel, combustóleo y gas natural ya que cuenta con quemadores adaptados para el uso de cualquiera de estos combustibles, sin embargo por razones económicas son el combustóleo y el gas natural los más utilizados a partir del año 1999, año en que fapsa incorpora el gas natural a su planta molino. En un principio el uso del gas natural era más factible de utilizar ya que aunado a la obtención de una combustión más limpia se contaba además con una producción más económica del vapor.

A partir del año 2000 el gas natural sufre un incremento de aproximadamente el 186% [Secretaría de Energía, 2007], motivo por el cual fapsa decide alternar los combustibles a fin de poder obtener una generación de vapor lo más económica posible que le permita ser una empresa competitiva. Otros incrementos significativos se dieron entre el primer y

segundo trimestre del 2003 cuando se incremento el costo del gas natural en un 173% y en el tercer y cuarto trimestre del 2005 con un incremento del 167% ver anexo I.

La ecuación *generación calorífica = Consumo de combustible x Poder calorífico inferior del combustible*, ya no es suficiente para determinar el combustible a utilizar ya que esta no toma en cuenta entre otras variables la eficiencia en la generación del vapor, otra manera de poder determinar el combustible a utilizar es a través de indicadores energéticos como *kg de vapor generado / m³ de combustible consumido*, cabe señalar que para ello se requiere contar con información referente a los indicadores utilizados para todos los combustibles, para este caso el del combustóleo y el gas natural, sin embargo este indicadores son utilizados únicamente como referencia y no presentan las condiciones de operación para las cuales son válidos, por ello es imprescindible contar con una ecuación que permita determinar la factibilidad de la utilización de cualquiera de los dos combustibles en cuestión, mismos que son utilizados para la generación de vapor en fapsa y que ésta considere el mayor número de variables posibles.

1.2. Justificación.

La importancia y prioridad que el país ha dado al ahorro de energía primaria y eléctrica así como a la mitigación de impacto al ambiente han hecho del concepto *Optimización Energética* un compromiso nacional de interés económico, ecológico y cultural.

Ya que la ingeniería es en última instancia el uso óptimo de los recursos en beneficio del hombre, e implica economía, el interés del propietario de una instalación de generación de vapor será mayor en la medida en que lo sean las reducciones en la facturación de combustibles y energía eléctrica, el abatimiento de las emisiones contaminantes y el consumo de agua, la disponibilidad de mayor capacidad de generación y el incremento de la vida útil del equipo instalado.

La administración eficiente de una planta de vapor para aprovechamiento máximo de la energía disponible en un combustible requiere comprender cómo se transforma ésta en cada proceso y cuantificarla en los sistemas.

Con el combustible y el aire un proceso de combustión libera energía química y la transforma en energía térmica en alta temperatura, los productos resultantes de la combustión inician un proceso de transferencia a través de superficies metálicas al agua de alimentación que inyectada a presión suficiente para vencer todas las resistencias del sistema se calentará hasta su temperatura de saturación y cambio de fase a vapor saturado, en calderas de servicios generales o industriales, o posteriormente en otros elementos de intercambio elevará su temperatura para ser entregado, con el grado de sobrecalentamiento requerido al proceso o a un turbogenerador o máquina prima de accionamiento directo. [Ambriz y Romero, 1993].

El balance de masa y energía entrando y saliendo se mantendrá siempre si se desea una condición estable de operación. El régimen de combustión se mantiene en el punto requerido por la demanda de vapor mediante una transferencia que permita conservar las

condiciones de éste independientemente de la demanda, una variación en esta produce desviaciones en la presión de vapor y en función de éstas se regula el régimen de combustión para corregirla.

El uso eficiente de los energéticos en el medio industrial, es de vital importancia debido al aumento de los precios en los mismos, al menos a corto y mediano plazo. El costo tiene un interés inmediato para el gerente industrial, y este factor es el que probablemente incida con mayor influencia en la aceptación del uso correcto de la energía, y en aumento de la eficiencia.

La energía es la fuerza que mueve al moderno mundo industrial. Sin ella, nuestras fábricas se detendrían, y economías enteras entrarían en crisis. Por esto es vital saber administrarla ya que sólo aquellos que hacen el mejor uso de la energía, pueden prosperar en un mundo cada vez más competitivo. Ahorrar en los energéticos es una de las claves para abatir costos y poder competir a la par con industrias de todo el mundo.

La sustitución de combustibles responde a las necesidades competitivas en la industria, siendo los cambios tecnológicos y restricciones ambientales los principales factores que la impulsan. Por tanto, un estudio que permita determinar la factibilidad de utilizar diferentes combustibles para la generación de vapor está plenamente justificado ya que pretende encontrar oportunidades de ahorro en los costos de los energéticos, así como para contribuir a la protección del medio ambiente.

Los ahorros en los energéticos por lo tanto, se traducen en beneficios económicos directos para la empresa, ayudando a aumentar la competitividad o incrementando el margen de utilidades.

Este trabajo pretende determinar cual y bajo que condiciones se deberá usar combustóleo o gas natural en la generación de vapor como una de las vías posibles para afrontar el encarecimiento en los costos de los energéticos y aumentar la competitividad de la

empresa, para ello se desarrollará un programa de cómputo que facilite la toma de decisiones.

1.3. Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un estudio que permita determinar que combustible es más factible utilizar para la generación de vapor en la caldera de Fábrica de Papel San Francisco, S.A. de C.V. a fin de mejorar la competitividad basada en la optimización de recursos energéticos.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Mantener la producción, reduciendo el costo en los energéticos.
- Realizar una evaluación técnico-económica que permita cuantificar los ahorros obtenidos.
- Proponer una metodología para realizar un programa de cómputo que permita determinar el combustible idóneo para la generación del vapor, a partir de la evaluación técnico-económica.

1.4 Metas.

- Minimizar costos de producción basados en la optimización del uso de los recursos energéticos.
- Establecer una metodología guía para futuros estudios energéticos de diferentes combustibles no contemplados en el mismo.
- Desarrollar un software para determinar el combustible óptimo en la generación del vapor.

2 GENERALIDADES.

2.1 Situación energética.

El sector energético es parte fundamental de la política económica de la presente administración, en la búsqueda de lograr mejores condiciones para el crecimiento económico y el aumento de la calidad de vida de todos los mexicanos.

La energía siempre ha desempeñado un papel importante en el desarrollo humano y económico, así como en el bienestar de las sociedades. Es un elemento esencial para la calidad de vida del ser humano y un insumo básico en todas las actividades productivas, así que cualquier crecimiento de la economía global genera un aumento necesario en el consumo de energéticos. Al mismo tiempo, el consumo de energía es sensible a cualquier variación en los precios de los energéticos, ya que si éstos se elevan, el consumo de energía tiende a disminuir.

2.1.1. Situación energética del combustóleo.

La industria de la refinación en nuestro país presenta distintos retos, entre los que se encuentran la creciente demanda de los productos derivados del petróleo vinculada al desarrollo económico del país; el compromiso en el cuidado del medio ambiente a través de la elaboración de combustibles cada vez más limpios que logren reducir el número de emisiones a la atmósfera; y maximizar el valor del petróleo procesado mejorando eficiencias y rentabilidad.

Durante el periodo 1996 – 2006, los rendimientos de producción del combustóleo pasaron de 34.1% a 25.4%, por lo que su oferta se redujo a lo largo del mismo en 105.4 miles de barriles diarios (mbd). En el periodo 2006 – 2016 el combustóleo verá una disminución de 209.9 (mbd), como resultado de una estrategia de producción de combustibles de mayor valor agregado y al desplazamiento de este energético por gas natural [Secretaría de Energía, 2007].

Demanda mundial de petrolíferos.

Junto con el aumento en la demanda de petrolíferos, se encuentra un cambio en la tendencia en el consumo hacia los derivados ligeros (p.e. gasolinas), de tal modo que la demanda por los productos ligeros e intermedios crece mientras que para el combustóleo disminuye. Este último fue el único que presentó una disminución en su demanda entre 2005 y 2006, pasando de 10,119 mbd a 9,862. Durante el periodo 1996-2006 su demanda se contrajo 1,192 mbd, lo que representó una tasa promedio de crecimiento de -1.1 % para este periodo.

La reducción en el uso del combustóleo a escala mundial se debe, entre otros factores, a la sustitución de éste por otros energéticos más limpios (p.e. gas natural), tanto en el sector eléctrico como en el industrial. Esta situación persigue disminuir las emisiones a la atmósfera a la vez que aumenta la eficiencia en la generación de electricidad y en algunos procesos industriales.

La mayor reducción en la demanda de este combustible provino de los países desarrollados. En Europa la disminución que se alcanzó en el periodo 1996 – 2006 fue de 389 mbd (-1.9% en promedio anual), en Norteamérica su demanda se contrajo en 301 mbd de los cuales EUA presentó una reducción por 156 mbd. Japón es el país que más disminuyó el consumo de este producto con 401 mbd respecto a la demanda que éste tenía en 1996 (-4.6% en promedio anual). Los países que integraban la antigua Unión Soviética también disminuyeron su demanda 484 mbd producto del retiro de plantas ineficientes y una contracción económica en el periodo.

En contraste, los países en vías de desarrollo y aquellos en donde se poseen grandes reservas de petróleo, incrementaron su consumo de combustóleo a lo largo del periodo. Los primeros no poseen la capacidad económica para sustituir su parque de generación eléctrica con la misma rapidez que los países desarrollados, además de que buscan aprovechar los excedentes en los inventarios de este combustible que se traducen en menores precios. En el caso de los segundos, el incremento se debe a la abundancia que

se tiene de este combustible que les permite que su sistema eléctrico dependa fuertemente de derivados del petróleo [Secretaría de Energía, 2007].

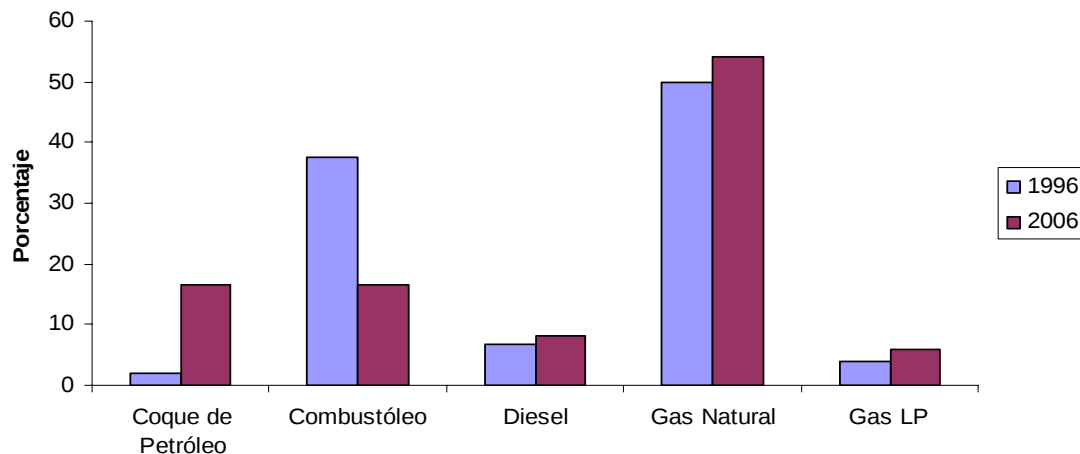
Calidad de los combustibles.

La Norma NOM-086 SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (NOM-086) es la única referida a la calidad de los combustibles. Esta norma ha evolucionado y fue derivada de la NOM-086-ECOL-1994, publicada el 2 de diciembre de 1994 en el Diario Oficial de la Federación (DOF), aunado al Acuerdo del 23 de abril de 2003, por el cual se reformó la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la SEMARNAT, que estaban identificadas con las siglas “ECOL” y “RECENAT” y que, en lo sucesivo, aparecen con las siglas “SEMARNAT”, lo que propició la NOM-086-SEMARNAT-1994.

Bajo el acuerdo de modificación de la norma NOM-086, publicado el 3 de octubre de 2006, se modificaron las tablas de especificaciones 5, 6 y 7 de la norma. En la NOM-086 se incluyeron los niveles máximos permisibles en peso de azufre en el gasóleo industrial que se consume por fuentes fijas en la Zona Metropolitana del Valle de México. Además, el contenido máximo de azufre permisible para el combustóleo se mantuvo en 4% en peso.

Consumo de combustibles

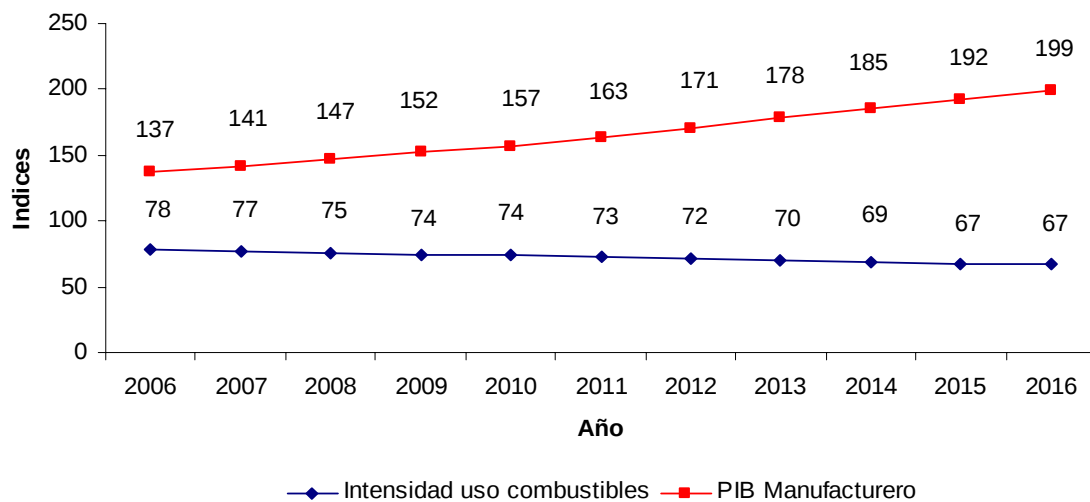
La estructura porcentual del consumo de combustibles en el sector industrial presenta cambios importantes. La demanda de combustóleo en 1996 representaba 37.4% de los combustibles usados en el sector. En 2006, su participación fue de 16.4 % del total de combustibles considerados (véase figura 2.1) [Secretaría de Energía, 2007].



Fuente: IMP con base en CRE, Pemex, Sener y empresas privadas.

Fig. 2.1.- Distribución de los combustibles en el sector industrial, 1996 y 2006.

La intensidad energética en el sector industrial mide la energía consumida por cada unidad producida; por esto, un avance tecnológico hará que la eficiencia sea mayor y, por ende, la intensidad energética menor. En este sentido, se espera que la intensidad energética en los próximos 10 años disminuya 1.6% en promedio (véase figura 2.2).



Fuente: IMP, con base en información de AIE, Banxico, CFE, CRE, EIA, EPA, INEGI, Pemex, Sener y empresas privadas.

Fig. 2.2.- Intensidad en el uso de combustibles en el sector industrial, 2006-2016 (índices, 1996=100)

En la región Noroeste se espera uno de los cambios más importantes en cuanto a la disminución en la intensidad energética derivado del avance tecnológico, la cual será de 2.8% en promedio en el periodo de estudio, pese a que su PIB manufacturero se estima se incremente en 3.9% [Secretaría de Energía, 2007].

La sustitución de combustibles en el sector industrial se deberá, principalmente, a los cambios tecnológicos y a la aplicación de las normas ambientales.

En lo que se refiere a la estructura porcentual del consumo de combustibles en el sector industrial, se esperan cambios importantes en la demanda de combustóleo, la cual pasará de 16.4 % de la demanda total de combustibles en 2006, a 10.6% en 2016, principalmente por la sustitución de éste por gas natural.

Impurezas de los combustóleos.

Con excepción del gas natural, todos los combustibles contienen ciertas cantidades de impurezas y contaminantes que durante el proceso de combustión se transforman en gases y cenizas que dan lugar a problemas de corrosión y depósitos en las calderas, siendo la materia inorgánica la que provoca estos problemas.

Metales como el hierro, níquel y vanadio, están presentes en formas de compuestos organometálicos, generalmente del tipo de la porfirina. El azufre está presente principalmente como sulfuros y sulfatos orgánicos complejos. El sodio, puede estar presente como complejos organometálicos o bien, como cloruros y sulfatos. Sin embargo, son el vanadio, el azufre y el sodio, los elementos que más problemas de depósitos y corrosión causan en las calderas [Central Termoeléctrica Tuxpan].

Con combustibles limpios (por ejemplo, el gas natural), los metales ferrosos rápidamente se oxidan formando una capa protectora contra toda oxidación posterior. El espesor relativo de la capa, depende de la temperatura y del medio circundante.

Durante el proceso de combustión, las partículas minerales se convierten (a través de una serie de reacciones complejas) a óxidos; constituyentes principales de las cenizas y depósitos. Las cenizas obtenidas, se pueden diferenciar en dos tipos:

- La ceniza de fondo ó escoria.
- La ceniza volátil.

Se estima que un 85% del total de cenizas la constituye la ceniza volátil. Por el volumen a manejar y por las características propias de los componentes de la ceniza, se convierte ésta en un factor vital en el diseño de la caldera y del equipo auxiliar. Es esta ceniza volátil, la que ocasiona los mayores problemas tanto de remoción como de erosión.

Debido a las impurezas del combustóleo, se forman escorias que se van acumulando, reduciendo el área de paso de los gases, ocasionando pérdidas de eficiencia y combustiones difíciles de controlar. Al irse reduciendo el área de paso por efecto de la incrustación, hay un incremento en la velocidad de los gases que transportan las cenizas con lo cual aumenta la fuerza de impacto y se atrapa un porcentaje de cenizas mayor de lo que normalmente se adheriría en los tubos limpios. Cuando una caldera no queda completamente limpia, los depósitos que no se eliminaron, actúan como base para la formación de nuevos depósitos una vez que la caldera se pone en servicio.

Programas de ahorro de energía en instalaciones industriales

Los sectores energético e industrial consumen prácticamente la totalidad del combustóleo. Por ello, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) concentra sus esfuerzos y recursos en la mejora de la eficiencia de estos usuarios intensivos en energía para reducir sus consumos energéticos.

En ambos sectores, se llevan a cabo programas para lograr un ahorro de energía en estas empresas, que pueda significar un aumento importante en su productividad, menores impactos al medio ambiente y la difusión de la cultura del cuidado de la energía.

Los potenciales detectados en estos sectores, tienen incidencia directa o indirecta en el ahorro de combustibles provenientes del petróleo; por ello, estos programas, aunque no han sido diseñados específicamente para reducir el consumo de un combustible en particular, si han logrado reducciones importantes.

Mediante el programa “Industria Eficiente”, la CONUEE pone al alcance de los usuarios de energía un conjunto de componentes conformados principalmente, por información técnica (protocolos para la realización de proyectos, metodologías, manuales y guías, casos exitosos y ligas de Internet, entre otros), herramientas de cálculo, cursos de capacitación, servicios de asistencia técnica y campañas de promoción, con el objetivo de proporcionar a los usuarios los elementos que les permitan identificar y evaluar sus potenciales de ahorro de energía y de energía renovable, así como para llevar a cabo acciones para su aprovechamiento.

Así, en términos cuantitativos, se espera que en los próximos años se logren ahorros de energía del orden del millón de barriles equivalentes de petróleo al año, al evitar el consumo de diversos combustibles. Cabe señalar que con la instrumentación de este nuevo programa se identifican potenciales de ahorro de energía, independientemente del combustible utilizado, lo que hace necesario la realización de estudios detallados que muestren la participación real del ahorro de petrolíferos.

2.1.2. Situación energética del gas natural.

En los últimos años el mercado de gas natural a nivel internacional se ha caracterizado por un mayor consumo, resultados de los beneficios ecológicos y económicos que ofrece respecto a otros combustibles.

Las regiones de mayor consumo de gas natural en el mundo son Europa-Euroasia, Norteamérica y Asia-Pacífico, que en conjunto representan el 82.6% de la demanda global. Si bien, el consumo creció en todas las regiones durante la última década, el incremento fue notable en regiones como Asia-Pacífico y Europa-Euroasia, cuyo crecimiento en volumen entre 1996 y 2006 fue de 19,468 millones de pies cúbicos diarios

(mmpcd) y 16,698 mmpcd, respectivamente. Durante 2006, el consumo mundial de gas natural fue de 275,826 mmpcd, mayor en 2.5% respecto a 2005 y 27.2% superior al de hace una década [Secretaría de Energía, 2007].

El fortalecimiento del mercado de gas natural en México ha respondido al impulso de políticas, encaminadas al fomento del uso de combustibles más limpios y eficientes, en virtud de una conciencia de protección al medio ambiente.

Ante la creciente demanda del hidrocarburo durante la última década, el reto es muy claro, asegurar un suministro confiable, de calidad y a precios competitivos que demandan los consumidores.

El gas natural esta ganando importancia rápidamente en el mercado energético global, convirtiéndose en un combustible de usos diversificados, principalmente porque su combustión es eficiente y limpia.

En la región de Norteamérica, el valor del gas se determina libremente en el mercado y ha resultado en precios altamente volátiles, particularmente en los últimos años. Estados Unidos al ser el mercado más grande de consumo, tiene una incidencia importante en los precios del mercado regional.

Consumo de gas natural.

La creciente utilización del gas natural se encuentra sustentada en los beneficios, ambientales, energéticos y económicos, respecto a otros combustibles. El crecimiento de la demanda de gas natural es sensible a cualquier variación en la actividad económica del país, ya que este hidrocarburo participa directa o indirectamente en el quehacer de toda la población debido a la versatilidad que presenta para ser utilizado como materia prima o combustible.

Si bien, hay una relación directamente proporcional entre estas variables, no llega a ser lineal debido a que la demanda del combustible también es función de los precios

relativos del gas natural respecto a otros combustibles sustitutos, según el sector de uso final [Secretaría de Energía, 2007].

Los precios relativos de gas con otros combustibles sustitutos, tuvieron un impacto positivo y considerable en el consumo de gas natural debido a que, el alza de los precios del petróleo generó incrementos en los precios de los derivados que compiten con el gas natural en los sectores de uso final. Adicionalmente, las referencias internacionales del gas natural disminuyeron su cotización promedio anual, lo que se reflejó en los precios del mercado interno, donde el promedio de los precios nacionales de los sectores industrial, residencial y de servicios disminuyó 8.7% en 2006 respecto al 2005.

El sector industrial no ha presentado una tendencia de crecimiento definida desde 1999, ya que ha enfrentado la volatilidad del precio del hidrocarburo en los últimos años, aunado a lo anterior, existe una insuficiencia de inversiones que ha deprimido el consumo de aquellas industrias intensivas en el uso del gas natural.

En el sector industrial, el mayor consumo en 2006 entre los combustibles industriales, la presentó el gas natural, con un grado de participación de 54.3%. A lo largo del periodo 1996-2006, este combustible fue desplazando al combustóleo como insumo energético del sector, derivando menos emisiones contaminantes, aunado a regulaciones ambientales cada vez más estrictas que han ido restringiendo el uso de combustibles formulados con alto contenido de azufre (como el combustóleo) en algunas zonas del país densamente pobladas y llamadas críticas en términos ambientales, donde se encuentran los corredores industriales mas grandes el país [Secretaría de Energía, 2007].

Consumo de la región Noroeste.

Durante el periodo 1996-2006, la demanda de gas natural de la región Noroeste presento un crecimiento medio anual de 42.1% que significó el mas rápido para una región en los últimos 10 años, hasta alcanzar un volumen de 391 mmpcd. El consumo regional se concentra en los estados de Baja California y Sonora, debido a que estos cuentan con

infraestructura de suministro del hidrocarburo. En ambos casos la demanda es abastecida por gas natural importado a través de gasoductos interfronterizos con los Estados Unidos.

El Estado de Baja California presentó el mayor desarrollo del mercado regional en el período, pese que comenzó en 1997 demandando un volumen poco significativo de 1 mmpcd, para 2006 consumió 283 mmpcd, registro que significó 72.2% del consumo regional [Secretaría de Energía, 2007].

Oferta de gas natural del sector privado.

Con el objeto de impulsar una política de aprovechamiento del gas natural, un combustible limpio, eficiente y seguro, en 1995 el gobierno mexicano emprendió una reforma estructural de esta industria. Dicha reforma buscaba maximizar los beneficios ligados a este combustible y desarrollar una infraestructura de gasoductos acorde con las necesidades del país. En esencia, dicha reforma estructural permitió la participación privada en actividades que previamente estaban reservadas al Estado a través de PEMEX, tales como el transporte, el almacenamiento, distribución por medio de ductos, así como el comercio exterior y comercialización de gas en territorio nacional.

Demanda de gas natural del sector industrial.

Se estima que la demanda de gas natural en el sector industrial crezca a una tasa media anual de 2.6% en el periodo 2006-2016. Esta expectativa se explica principalmente por la actividad económica del sector industrial que se espera mostrará una tasa de crecimiento de 3.4% en los próximos 10 años [Secretaría de Energía, 2007].

La tabla 2.1 indica la estimación de la demanda por componente de estimación, y se observa que la preferencia de sustituir gas LP y combustóleo por gas natural se va incrementando en el sector industrial paulatinamente hasta alcanzar 28.8 mmpcd en 2016. Cabe señalar que, este volumen podría ser mayor en la medida en que los precios relativos y el desarrollo de infraestructura favorezcan el acceso al gas natural.

Tabla 2.1
Demanda industrial de gas natural por componente de proyección, 2006-2016
(millones de pies cúbicos diarios)

Año	Tendencial	Sustitución*	Total
2006	1,014.0	-	1,014.0
2007	990.9	6.7	997.6
2008	1,019.3	10.7	1,030.0
2009	1,050.1	11.0	1,061.1
2010	1,091.4	16.8	1,108.2
2011	1,116.0	21.9	1,137.9
2012	1,174.3	22.0	1,196.3
2013	1,202.8	25.5	1,228.3
2014	1,226.1	28.6	1,254.7
2015	1,249.4	28.7	1,278.1
2016	1,282.7	28.8	1,311.5

* Se refiere a la sustitución de combustóleo y gas LP por la entrada de nueva infraestructura de distribución industrial de gas natural.

Fuente: IMP con base en información de la CRE, Pemex, Sener y empresas privadas.

De acuerdo con datos del Balance Nacional de Energía, emitido por la Secretaría de Energía, los sectores energético e industrial utilizan más de 90% del gas natural que se consume en el país.

Durante los últimos años el sector industrial ha sido el segundo consumidor de gas natural en el país, con una participación promedio de 29% del total nacional, debido a las diversas acciones de fomento en el uso de este combustible en el proceso de sustitución de diesel y combustóleo en la mayoría de sus procesos productivos.

Precio nacional de gas natural.

La directiva sobre la determinación de precios y tarifas para las actividades reguladas en materia de gas natural, emitida por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), tiene por objeto establecer las metodologías que, conforme el Reglamento de Gas Natural, deberán utilizar las empresas reguladas para determinar los precios y tarifas en la industria del gas natural.

El artículo 8 del Reglamento de gas natural, establece que la metodología de cálculo del precio máximo del gas natural objeto de las ventas de primera mano debe reflejar los costos de oportunidad y condiciones de competitividad del gas respecto al mercado internacional y al lugar donde se realice la venta. En febrero del 2006, se expidió la resolución RES/049/2006 por la cual se actualizaron las reglas establecidas en el Capítulo 13 de la Directiva de Precios y Tarifas, relativas a la sustitución de índices de referencia cuando éstos sean omitidos en la publicación Gas Daily. Con base a la última resolución (RES/089/2007), cuando el índice diario del HSC (Houston Ship Channel) no fuera publicado, se sustituirá por el índice correspondiente a Tetco (Texas Eastern Transmission Corporation) más un diferencial de 0.307 dólares por Gigacaloría. Asimismo, cuando no se cuente con el índice de Tetco, éste se sustituirá por el precio de Tennessee, zone o, menos un diferencial de 0.193 dólares por Gigacaloría.

En cada zona geográfica de distribución, las compañías distribuidoras agregan al precio de adquisición del gas, cargos específicos por distribución, por tipo de cliente, servicio y rango de consumos, con base en la autorización de la CRE, y construyen su precio al público.

2.2 Combustión.

El fuego ha representado, desde los tiempos más remotos, la fuente principal de energía para la humanidad; todavía hoy las aplicaciones del proceso físico-químico conocido con el nombre de combustión, del que el fuego y la flama son manifestaciones visibles, pueden considerarse como las estructuras que sostienen el desarrollo de la técnica moderna.

Es bastante extraño que un proceso aplicado en tan largo tiempo, a tan gran escala y con modalidades tan diversas, sea todavía hoy parcialmente desconocido en algunas de sus facetas más significativas; en realidad, la correcta interpretación del conjunto del fenómeno presenta aspectos dudosos, que se derivan de su extremada complejidad, así como de la enorme rapidez con que suceden las distintas etapas. [Salvi, 1975].

2.2.1 Definición y clasificación de los principales fenómenos relacionados con la combustión.

Una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de combustión. El oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el aire, por obvias razones: es gratis y se consigue fácilmente. El oxígeno puro se emplea como oxidante solo en algunas aplicaciones especializadas, como el corte y la soldadura, donde no se puede utilizar el aire.

La quema controlada de un combustible en el aire atmosférico es una reacción química exotérmica acompañada de un incremento sustancial en la temperatura. Como todos los procesos termodinámicos, tiene que ser eficiente. Deben ser correctos cuatro factores (entre otros) para que un proceso de combustión se lleve a cabo adecuadamente; tales factores se indican por la palabra mnemónica MATT. La M señala que debe haber una *mezcla* eficaz de combustible y comburente (oxidante); la A, el *aire* suficiente para suministrar el oxígeno adecuado; la T, la *temperatura* de ignición apropiada para iniciar y mantener el proceso de combustión, y la segunda T, el *tiempo* justo que permita la quema o combustión completa [Faires y Simmang, 1993].

En una base molar o de volumen, el aire seco está compuesto por 20.9 % de oxígeno, 78.1 % de nitrógeno, 0.9 % de argón y pequeñas cantidades de dióxido de carbono, helio, neón e hidrógeno. En el análisis de los procesos de combustión, el argón en el aire se trata como nitrógeno, en tanto que los gases que existen en cantidades muy pequeñas se descartan. De modo que el aire seco puede considerarse aproximadamente como 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno en números molares. Por consiguiente cada mol de oxígeno que entra a una cámara de combustión será acompañado por 3.76 moles de nitrógeno. Es decir 4.76 moles de aire [Cengel y Boles, 2000].

A temperaturas de combustión ordinarias el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos. Pero aun en ese caso la presencia del nitrógeno influye de manera considerable en el resultado de un proceso de combustión,

pues el nitrógeno suele entrar a una cámara de combustión en grandes cantidades a temperaturas bajas y salir a temperaturas considerablemente altas, absorbiendo una gran proporción de la energía química liberada durante la combustión. Para fines prácticos se supondrá que el nitrógeno permanecerá inerte. Sin embargo, a temperaturas muy altas, una pequeña fracción del nitrógeno reacciona con oxígeno, formando los NO_x .

Si la mezcla destinada a la combustión fluye dentro de un tubo hacia un extremo libre del mismo, en condiciones definidas de flujo, la flama puede quedar aparentemente inmóvil en el extremo libre. Si la velocidad del gas aumenta mas allá de un cierto límite, la flama languidece, apagándose por completo; por el contrario, si la velocidad del flujo de la mezcla disminuye sensiblemente, puede producirse el llamado retorno de flama dentro del tubo.

Para que se produzca una flama es necesario tanto la presencia del combustible y del comburente como la de un iniciador; pudiendo ser una chispa o una fuente de calor, como un hilo incandescente o una flama piloto.

Para la combustión de una mezcla inflamable la cantidad mínima de energía necesaria, en el caso de igniciones instantáneas (chispas) debe ser proporcional a $1/P^2$ (siendo P la presión del gas); en el caso de fuentes de calor permanentes (hilo incandescente, flama piloto) debe tenerse en cuenta el factor tiempo y la geometría del local [Gaydon y Wolfhard, 1960].

Una mezcla inflamable puede encenderse por si misma si se conduce a una temperatura a la cual la reacción entre el combustible y el comburente alcanza una velocidad suficientemente elevada. La ignición visible está precedida por un intervalo de temperaturas en el que se verifican reacciones preliminares de oxidación, a velocidad más lenta. La temperatura límite, más allá de la cual se produce siempre la ignición, se denomina de autoencendido. Para valores en torno a esta temperatura se verifica un cierto retardo en la ignición, llamado periodo de inducción, que tiende a ser menos duradero a medida que crece la temperatura. Esta, a su vez, depende de la naturaleza de las paredes

del recipiente, de la presión y de la presencia de catalizadores o inhibidores de la combustión.

2.2.2 Temperatura de flama.

En la combustión de un determinado material pueden conseguirse flamas de temperaturas diversas, según las condiciones experimentales utilizadas; ejercen una influencia determinante en ello el poder calorífico del combustible y su composición, el tipo de comburente (aire, oxígeno o mezcla de ambos) y la velocidad global de combustión. Este último dato depende a su vez de la reactividad del combustible, de la forma y eficacia del sistema de combustión y de la temperatura inicial de los reactivos. El cálculo teórico de la temperatura de flama (temperatura ideal) se basa normalmente en el supuesto de que la reacción se produzca de un modo completo, en proporciones estequiométricas, con mezcla perfectamente homogénea y un tiempo brevísimo (de modo que no se produzcan pérdidas de calor por el ambiente). Debe tenerse en cuenta, además del calor unitario de la reacción, el calor sensible de los reactivos, de manera que pueda determinarse el contenido térmico global de los productos que intervienen: en consecuencia, se calcula la temperatura de flama (temperatura adiabática) multiplicando el calor específico medio de los gases quemados por su cantidad, y dividiendo el contenido térmico global por este valor. Las temperaturas que se obtienen mediante este cálculo son siempre más altas que las reales. Hasta temperaturas de flama de 1800°C puede hacerse caso omiso del fenómeno de disociación de los gases quemados; a partir de 2000°C este fenómeno cobra mucha importancia condicionando los resultados de la combustión (debido a elevadas características endotérmicas de las reacciones de disociación).

Por consiguiente, las combustiones perfectamente estequiométricas son de difícil realización en la práctica: generalmente se necesitan excesos de aire, que contribuyen a la vez a una mezcla deficiente de los reactivos, y a una reducción posterior de la temperatura de flama.

El cálculo de la temperatura según el método antes mencionado debe tener en cuenta por lo menos dos factores limitadores: la disociación de los productos de la combustión y los

excesos de aire necesarios para completar la reacción. Dicho cálculo se obtiene por aproximaciones sucesivas, o más cómodamente utilizando gráficos especialmente preparados. El valor que se alcanza, aún siendo más exacto que el anterior, sólo tiene todavía un significado teórico, en tanto no considera las pérdidas de calor por irradiación, cuya influencia sólo puede determinarse cuando se conocen las condiciones reales del ambiente.

La importancia de alcanzar altas temperaturas de combustión proviene del hecho bien conocido de que el calor se transmite solamente de un cuerpo caliente a uno más frío; es indispensable, por tanto, que los gases estén a un nivel térmico muy elevado si quiere conseguirse que un gran porcentaje del calor liberado se transfiera a los cuerpos que se quieren calentar (especialmente si estos se encuentran ya a una temperatura elevada).

2.2.3 Forma y apariencia de la flama.

La forma y dimensiones de la flama vienen determinadas por la potencia del quemador; pueden recibir influencias, dentro de algunos límites, por las condiciones del proyecto y de las variables de funcionamiento.

Respecto a las condiciones del proyecto, una buena mezcla de los componentes de la misma lograda por medio de una fuerte turbulencia y altas velocidades, da lugar, con condiciones de igualdad de potencia, a una flama corta e intensa, mientras que una mezcla incompleta a bajas velocidades originan flamas largas y suaves.

Por lo que respecta a las variables de funcionamiento, se puede producir un efecto muy sensible sobre la flama variando el exceso de aire sin sobrepasar unos límites: a igualdad de otras condiciones, un aumento del exceso de aire tiende a acortar la flama, mientras que una disminución del mismo tiende a producir una flama larga. Por otra parte, también se puede conseguir una flama corta e intensa incluso con cantidades reducidas del exceso de aire; pero esto supone la adopción de instalaciones especiales que sean capaces de conseguir una enorme turbulencia y una recirculación parcial de los gases quemados.

Los cambios en la presión del aire comburente modifican la forma de la flama. Un aumento de la presión del aire tiende a acortarla, puesto que a este aumento le corresponde un incremento de la energía cinética y en definitiva un aumento de la turbulencia y de la velocidad.

Los métodos para aumentar la turbulencia y, por tanto, la mezcla, suponen la utilización de deflectores fijos a los conductos del aire comburente y al propio quemador, de tal manera que el flujo de aire que llega del ventilador reciba un movimiento giratorio del tipo vortiginoso.

Desde el punto de vista térmico, siempre es preferible disponer de una flama corta para lograr en cada punto del horno una diferencia máxima de temperatura entre la flama y las paredes o tubos que absorben el calor. En la práctica, la utilización de flamas cortas esta limitada por el costo de las instalaciones necesarias para aumentar la presión del combustible y del aire, así como por el costo también elevado de los refractarios y de las otras partes que constituyen el horno.

En el caso de quemadores de combustibles líquidos, adquiere gran importancia el mayor o menor tamaño de las gotitas del aceite subdividido; a un tamaño menor le corresponde una evaporación y combustión mas rápidas y, por tanto, la flama será más corta.

La apariencia de la flama del quemador, o quemadores, de una caldera es una buena indicación preliminar de las condiciones en que se realiza la combustión en el hogar. Hay patrones de apariencia definidas para considerar que una flama es buena en sus características, términos como “viva”, “corta”, “brillante” o de alta turbulencia define una buena condición de flama, para el caso de combustóleo, otros combustibles líquidos o pulverizados. Si en cambio sus características son “casi invisible”, “azul” o “ligeramente rayada y coloreada”, estas son propias de una buena combustión en gas natural [Plauchú, 1995].

Visibilidad de la flama:

Para una cantidad dada de combustible quemado una flama corta significa combustión rápida y completa, una flama larga indica combustión retardada y una gran longitud de la flama denota una combustión imperfecta o falta de combustión.

Condición de una flama ideal (fig. 2.3).

La flama escasamente libra la garganta del quemador, la flama es brillante y suave con trazas ligeras de humo en las puntas.

Problemas que pueden ocurrir en una flama con geometría ideal:

La flama presenta chispas esto puede deberse a:

- Exceso de aire muy alto.

- Temperatura de combustible muy alta.

- Ceniza en el combustible.

- Si la flama presenta apariencia humeante, la causa puede ser exceso de aire muy bajo.

La flama presenta apariencia oscura, color del combustible, no muestra combustión cerca de la garganta:

- Registros de aire muy cerrados.

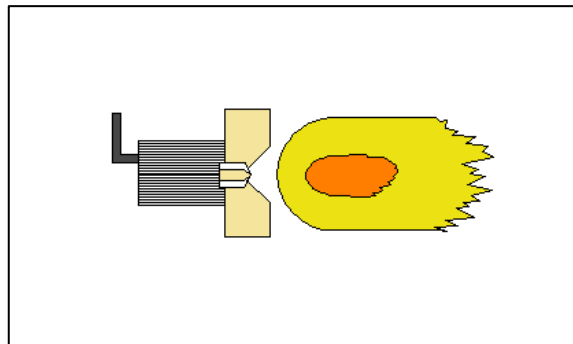


Fig. 2.3.- Flama con geometría cercana a la ideal

La flama es angosta y no llena la garganta, posibilidad de una corriente delgada de combustible en el centro (fig. 2.4).

Causas probables:

Baja presión diferencial de combustible o taponamiento en la línea de retorno.

Registros de aire demasiado abiertos.

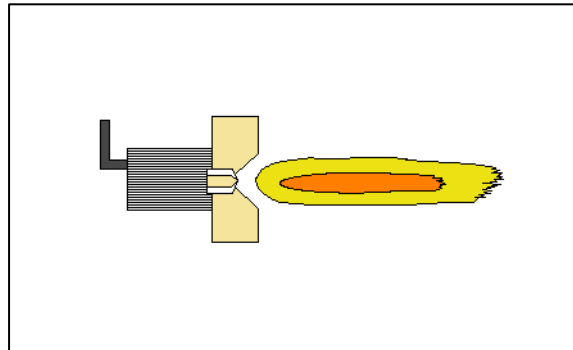


Fig. 2.4.- Flama angosta. No llena la garganta.

El patrón de la flama presenta manchas de combustible intermitentes saliendo de la boquilla (fig. 2.5).

Causas probables:

Problema de atomización.

Boquilla parcialmente obstruida.

Boquilla desgastada o algún otro problema con la boquilla del quemador.

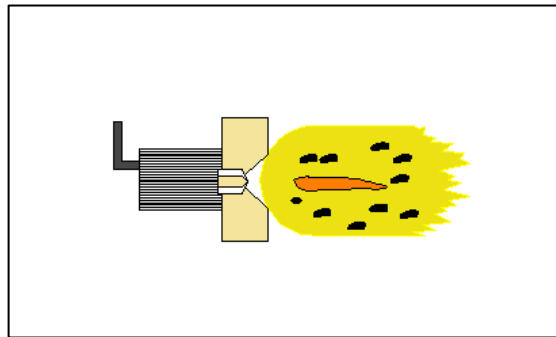


Fig. 2.5.- Flama con manchas en su coloración.

La flama tiende a soplarse o alejarse de la garganta (fig. 2.6).

Causas probables:

Registros de aire demasiado abiertos.

Posición del cañón del quemador demasiado alejado hacia el interior del hogar.

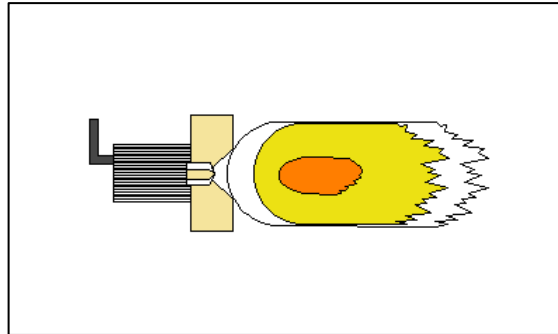
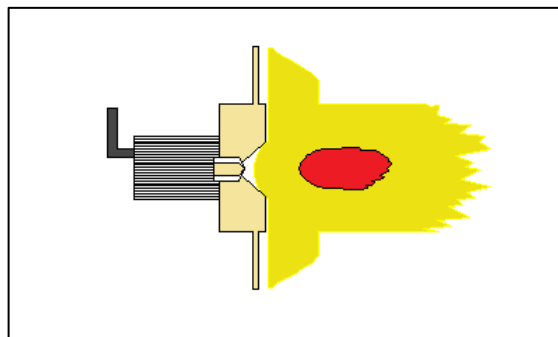


Fig. 2.6.- Flama inestable.

La flama libra la garganta pero más adelante “lame” las paredes del horno (fig. 2.7).

Causas probables:

Registros de aire demasiado cerrados.



**Fig. 2.7.- Flama con tendencia y retroceso
y adherencia a las paredes**

La flama incide sobre la garganta del quemador (fig. 2.8).

Causas probables:

El cañón del quemador no se ha introducido hasta la posición de operación.

Boquilla inapropiada u orificios desgastados.

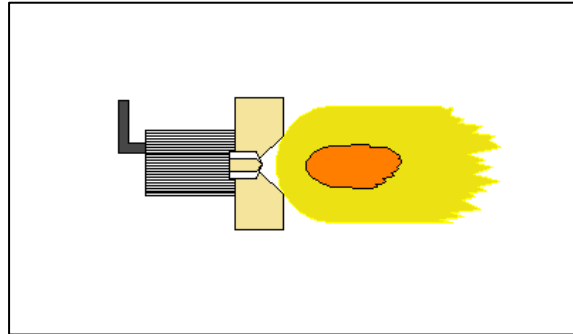


Fig. 2.8.- Flama con incidencia en la garganta del quemador

En la tabla 2.2 se presenta un resumen de los comentarios arriba mencionados.

Tabla 2.2.- Efecto de algunas acciones sobre las flamas.

Acción en la operación	Efecto sobre la flama			Pulsante
	Temperatura	Longitud	Posición respecto al quemador	
Exceso de aire alto	↓	↓	→	Más brillante
Exceso de aire bajo	↓	↑	→	Humeante
Más tiro en el hogar	↓	↑	→	Menos brillante
Mayor turbulencia de mezcla aire-combustible	↑	↓	←	Más limpia brillante
Incremento en temperatura del aire de combustión	↑	↓	←	Más brillante
Registros de aire muy cerrados	↓	↑	↔	Oscura floja
Registros de aire demasiado abiertos	↓	↓	↔	Angosta
Mayor temperatura en la cámara de combustión	↑	↓	←	Más limpia
Mayor temperatura en el combustible	↑	↓	←	Chispas
Incremento de presión del combustible	↑	↑	→	Menos brillante
Baja presión diferencial	↓	↑	→	Angosta oscura al centro
Alta presión diferencial	↓	↑	¿	Densa menos brillante
Atomización deficiente	↑	↓	←	Manchas intermitentes
Boquillas de quemador sucias	↓	↑	←	Manchas intermitentes
Mayor ángulo de descarga en el inyector del quemador	↓	↓	←	Tendencia a pegarse a la garganta
Mayor desgaste de orificios	↑	↑	←	Semitransparente "lame" las paredes
Obstrucción o suciedad en garganta del quemador	↓	↑	↔	Con manchas cambiantes
Desplazamiento del quemador hacia el hogar	↑	↓	→	Puede presentar pulsaciones
↑ Incremento	↓ Reducción	→ Más alejada	← Más próxima	↔ Pulsante

2.2.4 La estequiometría de la combustión.

Para que un combustible arda completamente, es necesario que el hidrógeno y el carbono contenidos en él después de la reacción con el oxígeno se transformen en agua y en anhídrido carbónico. Si la transformación se realiza parcialmente, la combustión se denomina incompleta: el carbono da lugar en este caso, aparte del CO_2 a una cierta cantidad de CO , y parte del hidrogeno puede encontrarse entre los gases libres o en forma de hidrocarburos.

Para lograr una combustión completa, es necesario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, o mejor de oxígeno. Como es prácticamente imposible efectuar una mezcla de los dos reactivos, hay que suministrar generalmente una cantidad de aire superior a la prevista en teoría, es decir, trabajar con exceso de aire.

Como es obvio, cuanto más elevado es el grado de mezcla obtenido, menor es la cantidad de aire que se necesita para completar la combustión: por esta razón, los combustibles gaseosos, a causa de su naturaleza que facilita la mezcla, necesitan menor exceso de aire que los combustibles líquidos. Un exceso de aire demasiado alto produce efectos negativos, ya que hace bajar la temperatura de combustión y consiguientemente reduce el rendimiento de los aparatos. En la figura 2.9 se observa la cantidad de oxígeno y CO_2 generado con respecto al exceso de aire para diferentes combustibles, y en la figura 2.10 se muestra la cantidad de CO generado en base al porcentaje de oxígeno a la salida de los gases de combustión [Plauchú, 1995].

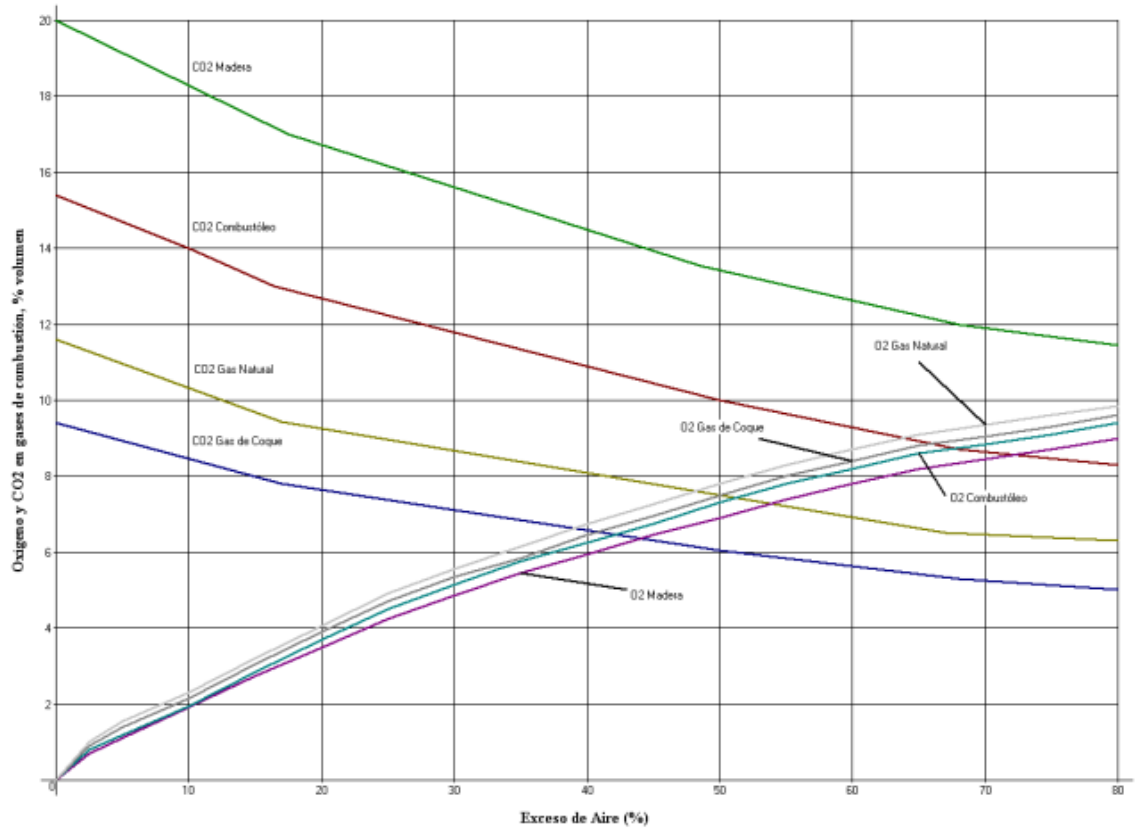


Fig. 2.9.- Oxígeno y CO₂ generado con respecto al exceso de aire para diferentes combustibles.

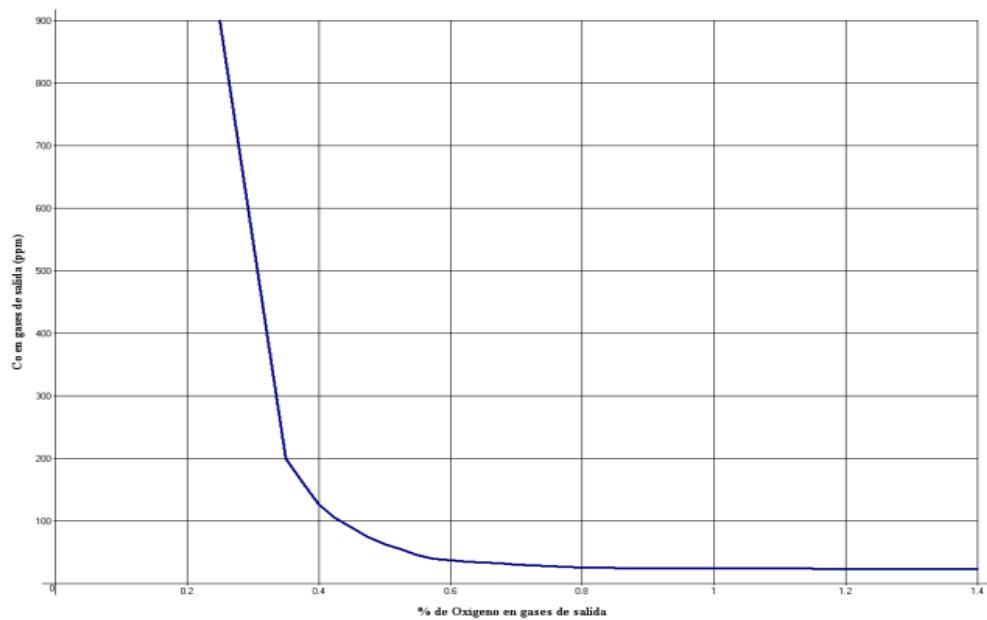


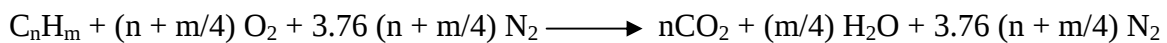
Fig. 2.10.- Cantidad de CO generado en base al porcentaje de oxígeno a la salida de los gases de combustión.

Cuanto mayor es la temperatura de combustión, más rápida es la vaporización y la gasificación del combustible y menor es la probabilidad de que los gases o vapores no ardan o lo hagan solo parcialmente; a estos efectos positivos hay que añadir los fenómenos de descomposición de los productos de la combustión y la obtención de productos de oxidación parcial. Junto a los gases sin quemar pueden encontrarse en los humos partículas sólidas (hollines) que en parte se vierten al exterior junto con los gases y en parte quedan en el interior, depositándose en los puntos de menor velocidad del gas.

Una de las consideraciones básicas en el análisis de los procesos de combustión es la reacción teórica o estequiométrica para un combustible dado.

Por definición ocurre una reacción teórica o estequiométrica cuando la reacción es completa y perfecta y en los productos de la combustión no hay oxígeno excedente.

La ecuación de combustión para cualquier hidrocarburo es:



En esta ecuación se ha supuesto que tiene lugar una combustión completa y perfecta partiendo de un mol de combustible y una cantidad desconocida de moles de aire.

En la realidad, aún si se lograra un mezclado perfecto del combustible y el oxígeno la combustión completa no tendría lugar, por lo que durante la combustión se forman CO y NO_x.

En la práctica, generalmente se introduce en la zona de combustión más oxígeno del necesario según la ecuación de la reacción química balanceada. Este exceso de aire permite completar la reacción de combustión aún cuando no se logre un mezclado perfecto; sin embargo, aún se forman cantidades mínimas de CO y NO_x; pero estas cantidades son tan pequeñas que se ignoran. No obstante el CO y los NO_x representan problemas de contaminación importantes, incluso en las proporciones relativamente pequeñas que se forman [Ambriz y Romero, 1993].

2.2.5 La combustión de hidrocarburos.

Se puede estudiar la combustión de los hidrocarburos, por lo que respecta al desarrollo del proceso, de un modo generalizado; en las combustiones a presiones casi atmosféricas no se observan diferencias sustanciales entre el mecanismo de reacción de los hidrocarburos simples y el de los hidrocarburos con mayor peso molecular, independientemente del tipo al que pertenezcan.

Si se estudia la combustión en flama libre de un hidrocarburo cualquiera, tanto aromático como alifático, se observa desde el punto de vista cinético, que la zona de reacción puede dividirse en dos fases; en la primera el hidrocarburo se transforma en CO y en H₂O, mientras que en la segunda el CO se convierte en CO₂.

Esta teoría, enunciada por Friedman y Burke se apoya en el hecho, observado experimentalmente, que en la zona caracterizada por una intensa luminosidad, se produce solamente el 55 % del calor. Puesto que la luminosidad se debe al C₂ y CH que se originan del cracking del hidrocarburo, parece obvio relacionar la desaparición del hidrocarburo con la de la luminosidad. Y ya que todavía queda disponible el 45 % del calor, es evidente que en la zona restante de la flama se deben producir reacciones más lentas, como puede ser la conversión del CO en CO₂ [Salvi, 1975].

Todos los combustibles que contienen hidrogeno tienen dos potencias caloríficas, la superior y la inferior. La combustión del hidrogeno produce vapor de agua, el cual en los hogares ordinarios se escapa a la temperatura de los gases de la chimenea. La potencia calorífica inferior es el calor liberado por el combustible por unidad de peso o de volumen después de deducir el necesario para vaporizar el agua formada por la combustión del hidrogeno. La potencia calorífica superior de un combustible es la obtenida mediante un calorímetro de volumen constante en el cual el vapor producido se condensa y se recupera su calor [Severns, Degler y Miles, 1991].

2.2.6 Efectos de la turbulencia sobre la flama.

De los diversos procesos físicos que intervienen en la combustión, la turbulencia es, con mucho, el más importante. Corresponde a un movimiento desordenado de los fluidos, con formación de un gran número de torbellinos que interfieren unos con otros, dispersos en todo el medio en reacción, de volumen y características cinéticas muy diversas entre si.

Un movimiento turbulento tiene inicialmente su energía distribuida en torbellinos de grandes dimensiones, que se forman a la salida de los dispositivos que controlan el flujo de los gases; esta energía se degrada con el movimiento de los fluidos, produciendo la formación de una serie de torbellinos de dimensiones cada vez más pequeñas, hasta ser completamente absorbida por fricción viscosa.

Los movimientos turbulentos ejercen una acción determinante sobre la combustión, ya que los fluidos en agitación desordenada transportan porciones de flama, encrespando y ondulando la superficie: de este modo la superficie del frente de flama sufre una gran ampliación, y se obtiene un aumento neto en la liberación del calor. El movimiento turbulento provoca además un avance más rápido de la onda en dirección de la mezcla inflamable que no ha reaccionado aun; esta particularidad se aprovecha a fondo en las aplicaciones industriales ya que permite obtener producciones de calor más intensivas y localizadas.

Sin embargo, el aumento indiscriminado de la turbulencia puede producir efectos negativos y llevar a disminuciones de rendimiento térmico, y aún, en el caso extremo, a la extinción de la flama.

2.2.7 Eficiencia de combustión.

La energía total contenida en la unidad de masa de combustible menos la que transportan fuera de la caldera los gases de combustión, expresada en %, es lo que en la práctica se designa como eficiencia de combustión y es una parte de la eficiencia total. Las pérdidas por radiación, purgas, pérdidas eléctricas en equipos de bombeo de agua y combustible y manejo de aire deben contabilizarse al determinar la eficiencia total, sin embargo ya que

el potencial mayor de reducción de combustible desperdiciado está en mejorar la eficiencia de combustión es fundamental poner énfasis en este proceso. En el anexo II y III se observan las pérdidas de calor con base en el exceso de aire y la temperatura a la salida de los productos de combustión para el combustóleo y gas natural respectivamente [Plauchú, 1995].

2.2.8 Contaminación atmosférica.

Es de todos conocido que las empresas de clase mundial ya no basan sus estrategias competitivas en los antiguos conceptos de precio, calidad y servicio, vigentes hasta principios de los años ochentas. En la actualidad, ya se ha superado ese concepto y ahora se habla de un cuarto componente, la protección del medio ambiente. Las empresas altamente competitivas incluyen, como parte integral de su filosofía empresarial y de sus estrategias de mercadotecnia, el cuidado y la conservación de su entorno, obteniendo una ventaja competitiva más, con la cual incursionan con mayor fuerza en los modernos mercados internacionales [Oropeza, 1996].

La contaminación progresiva del aire en las grandes ciudades, y la elevación de la altura media de los edificios de nueva construcción, impone que las descargas de los humos y de las sustancias nocivas en la atmósfera se hagan en partes tales, que garanticen la segura dispersión de los contaminantes. Debe operarse de modo que la concentración a nivel de las habitaciones sea muy baja, prácticamente inocua.

En la próxima década, cualquier acción para disminuir las emisiones de los gases de efecto invernadero podría afectar el uso de energía primaria alrededor del mundo y alterar el nivel y la composición de emisiones de bióxido de carbono (CO_2) según la fuente de energía. Sin duda, el CO_2 es uno de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera que causan mayor preocupación en el mundo.

Las emisiones de CO_2 principalmente son resultado de la combustión de un combustible fósil para obtener energía, y esto ha generado un gran debate respecto al cambio climático. De acuerdo con el DOE (Departamento de energía de los EUA), las emisiones

del bióxido de carbono del mundo en 2006, provenientes de combustibles fósiles, fueron de 28.3 miles de millones de toneladas anuales (mmmmta) y aumentaran a 36.8 mmmmta en 2020 [Secretaría de Energía, 2007].

Pese a que el carbón no es el combustible fósil mas demandado, se estima que durante 2005, sus emisiones de CO₂ superaron a las del petróleo y sus derivados. Para 2006 las emisiones de cada combustible se estimaron en: carbón 11.4 mmmmta, petróleo y sus derivados 11.2 mmmmta y gas natural 5.7 mmmmta. El efecto ecológico que el gas natural tiene al participar en el uso de energía como combustible, podría valorarse considerando que, hacia 2020 se espera participe con 24.2% del consumo de energía primaria, y su contribución a las emisiones será de 21.0%, mientras que el carbón cubrirá 27.5% de la energía primaria, pero sus emisiones del gas invernadero representarán 42.1% [Secretaría de Energía, 2007].

En México existe la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente la cual fue publicada el 28 de Enero de 1988. En ella se establecen los lineamientos generales para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio nacional y a las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

De acuerdo a esta ley, las actividades y servicios que originen emanaciones, emisiones, descargas o depósitos, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico, producir daño al ambiente o afectar los recursos naturales, la salud, el bienestar de la población, o los bienes propiedad del Estado o de los particulares, deberán observar los límites y procedimientos que se fijen en las normas técnicas.

Las normas ecológicas más generales en su aplicación que establecen límites a la emisión de contaminantes a la atmósfera son:

NOM-043-ECOL-1993.- Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

NOM-085-ECOL-1994.- Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxidos de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes fijas.

Las calderas y hornos industriales son fuentes fijas e importantes de emisión de contaminantes. El impacto que cualquier planta de calderas impone al ambiente debe mitigarse manteniéndolo al nivel más bajo posible.

Las emisiones de una planta que afectan directamente el ambiente [Plauchú, 1995], son las siguientes:

- Productos de combustión.
- Calor de desperdicio.
- Ruido.

Productos de combustión.

Los productos en la descarga de chimeneas incluyen los siguientes componentes: H_2O , N_2 , O_2 , NO , NO_2 , CO_2 , CO , C_nH_m (hidrocarburos no quemados), SO_2 , SO_3 , partículas (polvo, cenizas volátiles, metales pesados, etc).

Los tres primeros componentes no son realmente dañinos, los demás si tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Su concentración en los gases de escape depende de la composición del combustible que se quema y del tipo de instalación que se analiza, sin embargo una alta eficiencia de operación siempre opera positivamente ya que la proporción de emisiones por unidad de vapor se reduce. Los gases de escape de todos los sistemas de combustión contienen una variedad de subproductos algunos de los cuales están considerados como *contaminantes ambientales*. Algunos de esos contaminantes tienen efecto tóxico inmediato mientras otros representan riesgos a la salud por su capacidad de reaccionar con otros contaminantes en el aire para formar componentes de riesgos mayores. Adicionalmente estos contaminantes también son distintos por la forma en que se generan en los procesos de combustión, algunos están más relacionados con la composición del combustible mismo mientras otros son dependientes de las

características del proceso de combustión al quemarse dicho combustible y como tales son sensibles al diseño y a las variables de operación de los sistemas de combustión.

Calor de desperdicio.

Otro de los problemas ambientales generados por las calderas en general es el calor disipado por pérdidas en los procesos de transformación de la energía, parte de ellas inherentes a los procesos de transformación y otras producto de ineficiencias y prácticas inadecuadas de operación y mantenimiento. Además de la cantidad de calor de desperdicio, o de pérdidas es importante la forma en que ese calor se disipa al ambiente. Su efecto es menor si el medio receptor es el aire y no otro como puede ser el agua de un río o mar.

Ruido.

Otro producto final como contaminación al ambiente de instalaciones de calderas es el ruido generado por la caldera propiamente o por sus equipos auxiliares.

2.3 Quemadores.

El quemador es un equipo generalmente compuesto de los siguientes componentes: caja de aire, damper o compuerta de aire, registro, atomizador, anillo o cañón de gas, piloto de gas y garganta de refractario. Aunque el ventilador de aire de combustión no es un componente del quemador propiamente dicho, hay que señalar que es uno de los componentes individuales que mayor influencia tiene en la adecuada operación del quemador [Chávez, 2000].

2.3.1 Principales funciones del quemador.

Las principales funciones del quemador son dos:

- 1) Acondicionar tanto el combustible como el aire de combustión y mezclarlos en la forma más eficiente posible para lograr una combustión óptima, manteniendo estabilidad en la flama.
- 2) Ajustar la forma de la flama, para lograr la más adecuada al hogar o la aplicación específica.

La capacidad de los quemadores es regulada desde un mínimo hasta un máximo, por la acción de la válvula de control de combustible principal a quemadores y la acción de la compuerta de control de aire a quemadores, instalada generalmente en la succión o en la descarga del ventilador de tiro forzado manteniendo la relación aire-combustible en todo el rango de operación.

La determinación de la relación aire-combustible, se logra mediante análisis de gases de combustión con un analizador de gases Orsat, un analizador de oxígeno o algún otro instrumento debidamente calibrado. La presión de combustible en los quemadores, no deberá ser llevada a un valor debajo del punto donde la combustión puede ser perdida.

El registro de aire no debe ser usado para regular el aire a los quemadores. Los ajustes deberán ser hechos por la acción de la válvula de control general de combustible a quemadores y la compuerta de regulación de flujo de aire principal y nunca por las válvulas individuales de combustible de un quemador.

En calderas equipadas con un control de combustión automático, podrá ser puesto en servicio una vez de que se haya caracterizado mediante pruebas en operación manual.

2.3.2 Principales puntos de evaluación del quemador.

Principales puntos de evaluación del quemador:

Rangeabilidad.

Forma de la flama.

Confiabilidad.

Mantenimiento.

Exceso de aire.

Rangeabilidad:

La rangeabilidad o turndown como también se le conoce, es el rango de operación estable del quemador, expresado como una relación de la capacidad máxima a la capacidad

mínima. Esto es, cuando un quemador es capaz de operar establemente desde el 20% de su capacidad hasta plena carga, se dice que el quemador tiene una rangeabilidad de 5 a 1.

Al punto de capacidad máxima y capacidad mínima estable de los quemadores, se le conoce como fuego máximo y fuego mínimo respectivamente.

La estabilidad del quemador a bajas cargas, así como la rangeabilidad depende de su habilidad para mantener la reacción de combustión, misma que se mantiene cuando se logra estabilizar la base de la flama, es decir el punto donde se inicia la combustión, para lo cual se requiere satisfacer dos condiciones:

- a) Debe haber en la base de la flama una mezcla aire-combustible dentro de los límites de inflamabilidad, aunque los flujos de aire y combustible no lo estén.
- b) La mezcla debe calentarse a su temperatura de inflamación, para lo cual se utilizan dos métodos:
 - 1) Re-radiación de calor de la garganta de refractario, utilizando gargantas de refractario divergentes.
 - 2) Creación de una zona de recirculación de gases calientes hacia la zona fría de la base de la flama, lo cual se logra con el difusor o estabilizador en sus diferentes tipos.

Forma de flama:

- Fundamental, para la mejor eficiencia en la combustión.
- El quemador debe ser capaz de ajustar la longitud y diámetro de la flama para adaptarse al hogar, generalmente reducido en las calderas paquete, sin dañar a los tubos de las paredes del hogar.
- Muy importante también en aplicaciones de quemadores múltiples.
- Determinada por el registro, la garganta de refractario y barrenado del atomizador de combustóleo o quemador de gas.
- Afectada por la calidad del combustible y el exceso de aire.

Exceso de aire:

- Es la cantidad de aire por sobre la requerida, según relación estequiométrica, necesaria para alcanzar una combustión completa.
- Determina la eficiencia del quemador, pues es proporcional a la pérdida de calor vía aire caliente, enviado a la atmósfera.
- Depende de la habilidad del registro para mezclar el aire de combustión con el combustible y del tiempo de residencia en el hogar.
- Excesos de aire típicos.

Gas natural	5 a 10 %
Combustóleo	10 a 15 %
Carbón pulverizado	15 a 20 %

2.3.3 Principales componentes del quemador.

Principales componentes del quemador:

Caja de aire.

Compuerta de aire (damper).

Registro.

Cañón atomizador.

Garganta de refractario.

Difusor o estabilizador.

Caja de aire:

Además de su función de conectar y soportar al quemador, cumple la importantísima función de distribuir uniformemente el aire de combustión a los quemadores.

Para cumplir lo anterior la caja de aire deberá ser diseñada con una forma y dimensiones tales que la velocidad del aire no sea mayor de alrededor de 2300 pies/min. en ningún punto de la misma y estar provista de divisores de flujo con arreglos de malla perforada, según se requieran para corregir cualquier desbalance de diseño en el flujo de aire de combustión.

Compuerta de aire (damper):

Es la parte del quemador que controla la cantidad de aire de combustión a los quemadores y se puede instalar a la succión o a la descarga del ventilador o en ambas partes.

Las compuertas de aire deberán ser del tipo aletas múltiples, de apertura lenta y diseñadas para proporcionar una característica lineal de flujo de aire contra apertura.

El diseño de las compuertas deberá ser tal, que a posición totalmente cerrada, permita una fuga de aire mínima que sea compatible con la rangeabilidad de la caldera y con las curvas de exceso de aire de los quemadores.

Esta última característica es primordial para garantizar la rangeabilidad de la caldera y el exceso de aire de la misma a fuego mínimo.

Registro:

Es la parte del quemador encargada de acondicionar el aire de combustión para ser mezclado con el combustible.

Este acondicionamiento consiste básicamente en dos funciones:

Distribuir adecuadamente el flujo de aire de combustión a través de la garganta.

Imprimir al flujo de aire el movimiento giratorio necesario para el formado de la flama y la estabilidad de la misma.

Como puede observarse, este es uno de los componentes más importantes del quemador, al grado de que sus características de diseño y operación son determinantes en todos los puntos de evaluación del mismo, como son: rangeabilidad, forma de la flama, exceso de aire y emisión de contaminantes.

Cañón atomizador:

Es la parte del quemador encargada de acondicionar los combustibles líquidos para ser mezclados con el aire de combustión.

Este acondicionamiento consiste no solo en descomponer los combustibles líquidos y particularmente el combustóleo en gotas lo más pequeñas posibles para que puedan ser mezcladas con el aire de combustión en forma eficiente, sino además en introducir el chorro de combustible atomizado dentro de la corriente de aire en una forma óptima y congruente con las necesidades de formado de flama y rangeabilidad.

Garganta de refractario:

La garganta de refractario también es un componente importante del quemador, cuya función es proveer una zona caliente para la estabilización de la base de la flama, y su geometría es determinante en la forma de la flama.

El diámetro de la garganta de refractario determina y limita la capacidad del quemador y su caída de presión, dado que no es recomendable que la velocidad del aire al pasar por ella sea mayor de 4100 pies/min.

En atención a su perfil, las gargantas de refractario pueden dividirse en rectas y divergentes, mientras que en atención a su sección transversal se dividen en circulares y elípticas.

La principal diferencia operativa entre las gargantas rectas y las divergentes, estriba en que mientras en las primeras la base de la flama se establece siempre afuera, a la salida de la garganta, en las segundas esto ocurre dentro de la garganta, proveyendo una mayor estabilidad al quemador, por lo tanto, las gargantas con perfil divergente son las más recomendadas para usarse en calderas.

Las gargantas con sección transversal elíptica o con entrada circular y salida elíptica se utilizan para producir flamas asimétricas, cuando así lo requiera la aplicación específica.

Como regla general, la garganta deberá tener una profundidad tal, que la relación de profundidad a diámetro de la misma, nunca sea menor a 0.4 con el objeto de no perder efectividad en el formado de la flama.

Difusor o estabilizador:

Uno de los componentes menos apreciados pero más importantes del quemador, es precisamente el difusor.

Su función primordial es la de producir una zona de recirculación de gases calientes en el interior de la flama que sujete y estabilice la base de esta.

El método para lograr que la flama se adapte a la forma de la garganta, es el de imprimir un giro de aire.

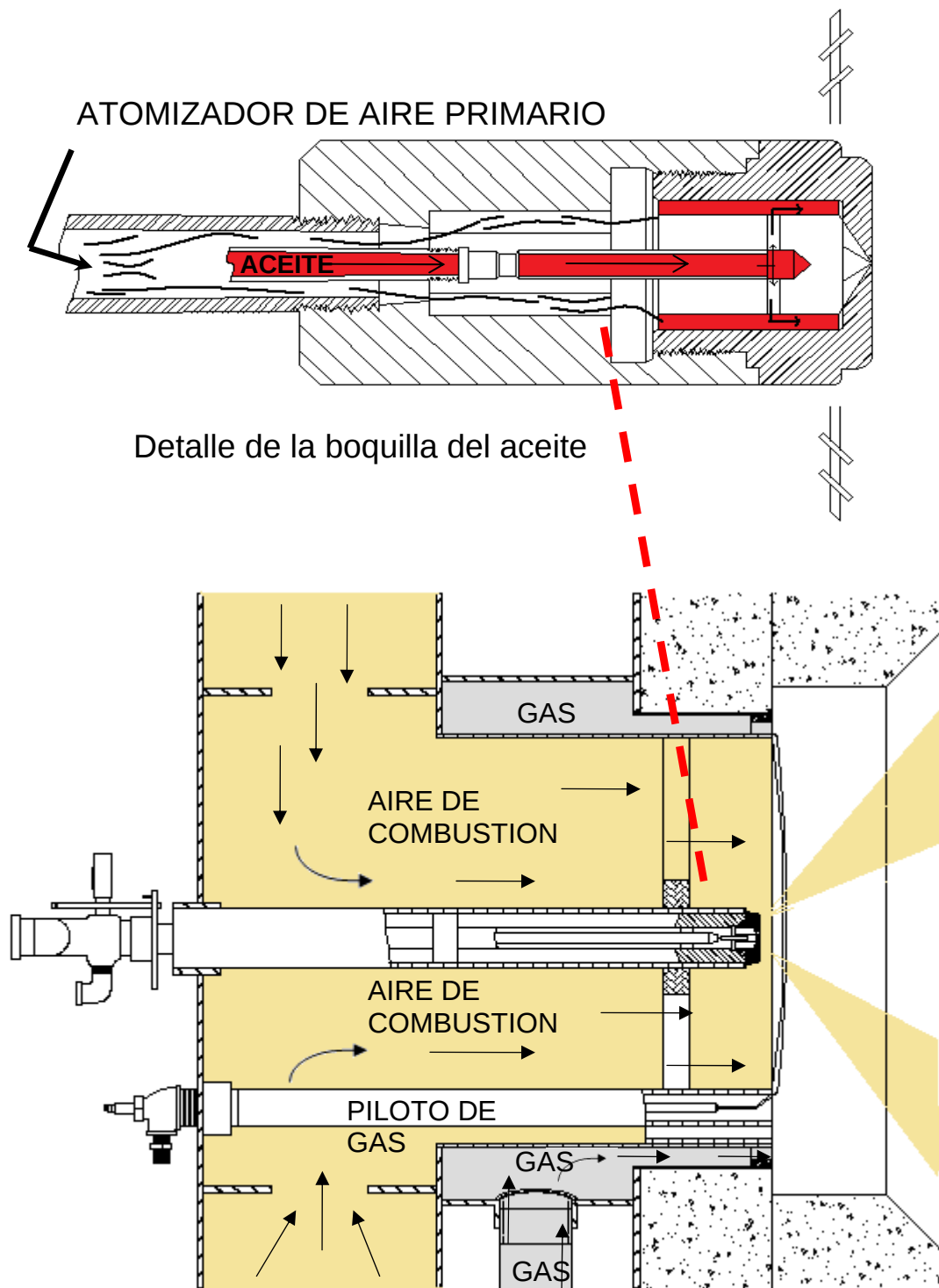


Fig. 2.11.- Corte de un quemador dual

2.4 Calderas.

El vapor es ampliamente utilizado para calefacción, para secar pastas, para evaporar disoluciones químicas, para procesos de calentamiento, para mover turbinas, máquinas y bombas, para realizar los miles y miles de procesos en todas las ramas de la industria.

El vapor es utilizado en estos casos, simplemente porque existe una necesidad de calor y energía al mismo tiempo y el vapor es la manera más adecuada y económica de transportar grandes cantidades de calor y energía.

El vapor es fácil de producir ya que se obtiene del agua y generalmente se requiere de un recipiente adecuado para producirlo industrialmente, este recipiente es una *caldera* o un *generador de vapor*.

Vapor es una fase intermedia entre la líquida y la de gas. Los vapores tienen características semejantes a los gases, puesto que llenan por completo los recipientes que los contienen, pero no siguen las leyes de los gases perfectos.

El vapor de agua es un "Transportador de energía térmica" que tiene las siguientes ventajas:

- 1°- Se produce con agua, la cual es relativamente abundante y barata.
- 2°- Es limpio y no tiene sabor ni olor.
- 3°- Por sus propiedades termodinámicas, su control es relativamente sencillo.
- 4°- Es una de las formas más económicas de transporte de calor ya que su capacidad de transporte de calor por unidad de peso es muy alta.
- 5°- Entrega su calor a una temperatura constante.
- 6°- En muchos casos, después de que se ha utilizado su calor, se vuelve a calentar pudiendo usarse varias veces.

A continuación se describen algunos términos comunes a las calderas [Selmec, 1976].

Generador de vapor.

Es la serie de dispositivos que aprovechando el poder calorífico de un combustible producen vapor. Un generador de vapor está compuesto básicamente, por cuatro transmisores de calor que son: La caldera propiamente con su hogar, el precalentador de aire, el economizador y el sobrecalentador.

Superficie de calefacción.

Es la superficie de metal que está en contacto al mismo tiempo con los gases de combustión y con el agua o vapor, es decir, es toda la superficie de una caldera que está en contacto por un lado con el agua y por el otro está expuesta al fuego o a la corriente de los gases de la combustión. Se mide del lado de los gases en m^2 o $pies^2$, en las calderas de tubos de humo y por el lado del agua en las calderas de tubos de agua.

Caballo caldera.

Se dice que una caldera tiene una capacidad de un caballo caldera, cuando es capaz de producir 15.65 kg/hr (34.5 lbs/hr.) De vapor saturado de $100^{\circ}C$ ($212^{\circ}F$), utilizando agua de alimentación de la misma temperatura. Cuando esta cantidad de vapor se produce por cada m^2 de superficie de calefacción (aproximadamente 10 pies^2) se dice que la caldera está trabajando con 100% de carga.

2.4.1 Tipos de calderas.

1.- Calderas de tubos de humo.- Llamadas también ignotubulares y se distinguen por que los gases de combustión pasan por el interior de los tubos y el agua circula por el exterior de ellos. En la figura 2.12 se muestra una caldera de tubos de humo.

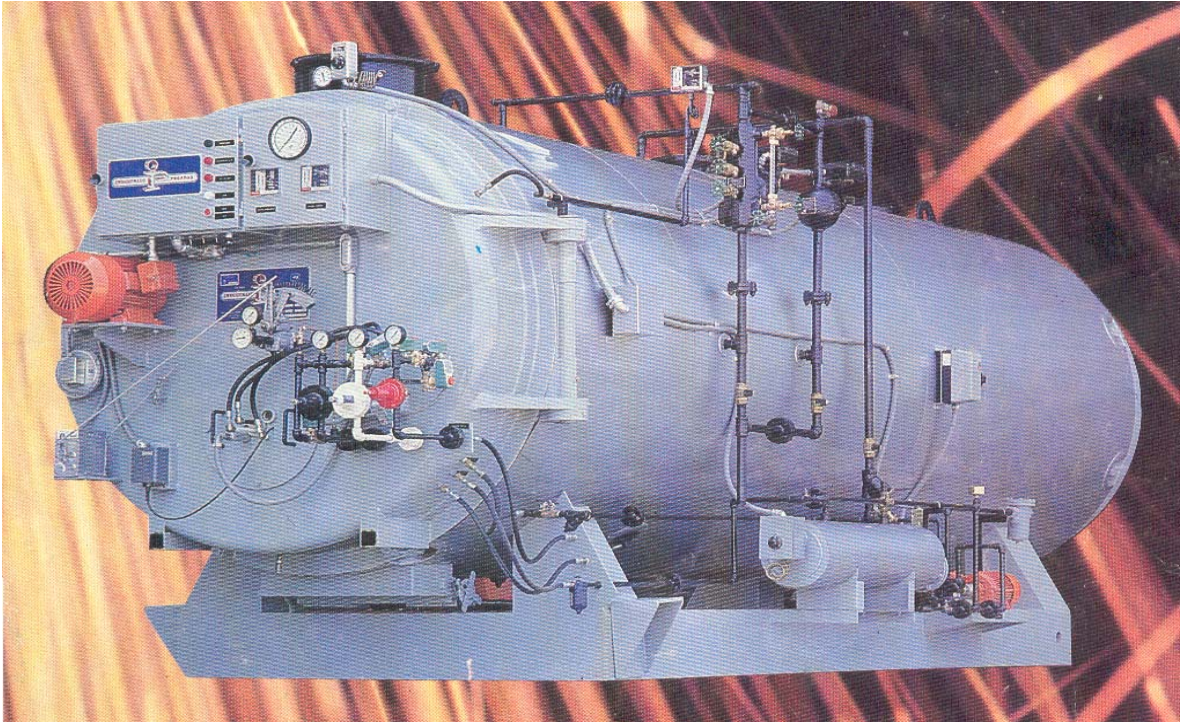


Fig. 2.12.- Caldera de tubos de humo tipo escocés (pirotubular).

2.- Calderas de tubos de agua.- Llamadas también acuotubulares, se distinguen principalmente porque el agua circula por el interior de los tubos y el fuego y los gases de combustión pasan por el exterior de los mismos. En la figura 2.13 se muestra una caldera de tubos de agua.

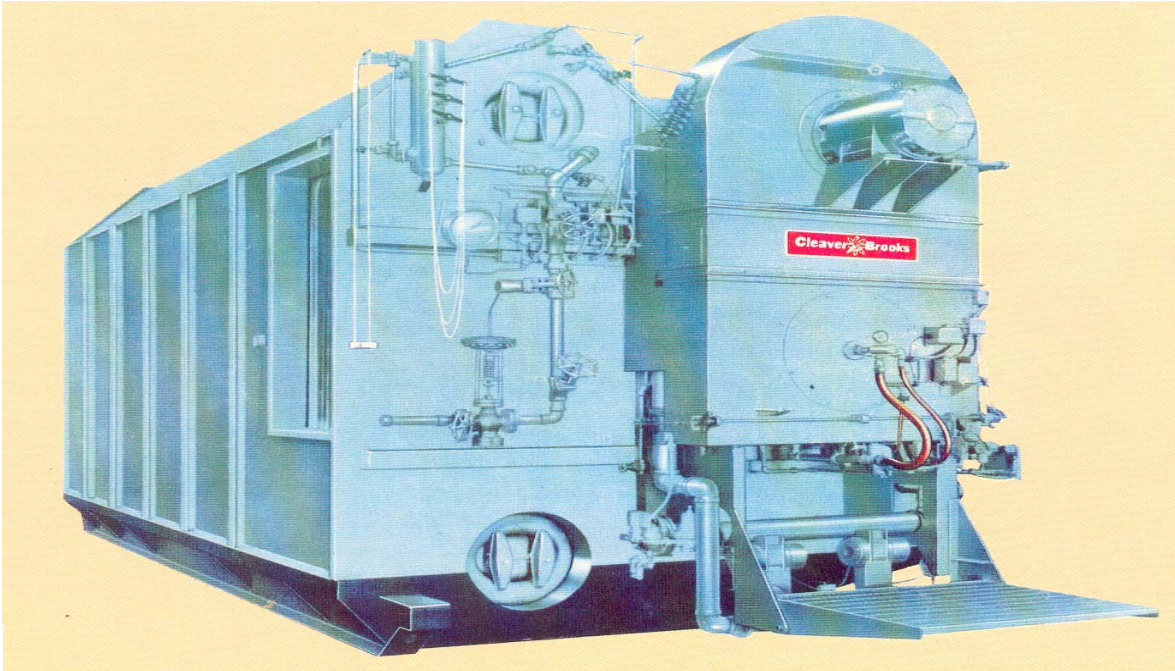


Fig. 2.13.- Caldera de tubos de agua (acuotubular).

2.4.2 Componentes principales.

En la figura 2.14 se muestran esquemáticamente las partes esenciales y algunas opciones necesarias para producir vapor por medio del calor liberado durante la combustión de un combustible. Estos elementos son los siguientes:

- I. - Un equipo para liberar calor del combustible.
- II. - Una cámara de combustión
- III. - Un medio para absorber el calor liberado.
- IV. - Un sistema para producir el tiro.
- V. - Un medio de reposición del agua.
- VI. - Un medio para capturar el vapor generado.

VII. - Un medidor de la presión del vapor y un indicador de nivel del agua.

VIII. - Un medio o medios para coordinar el funcionamiento.

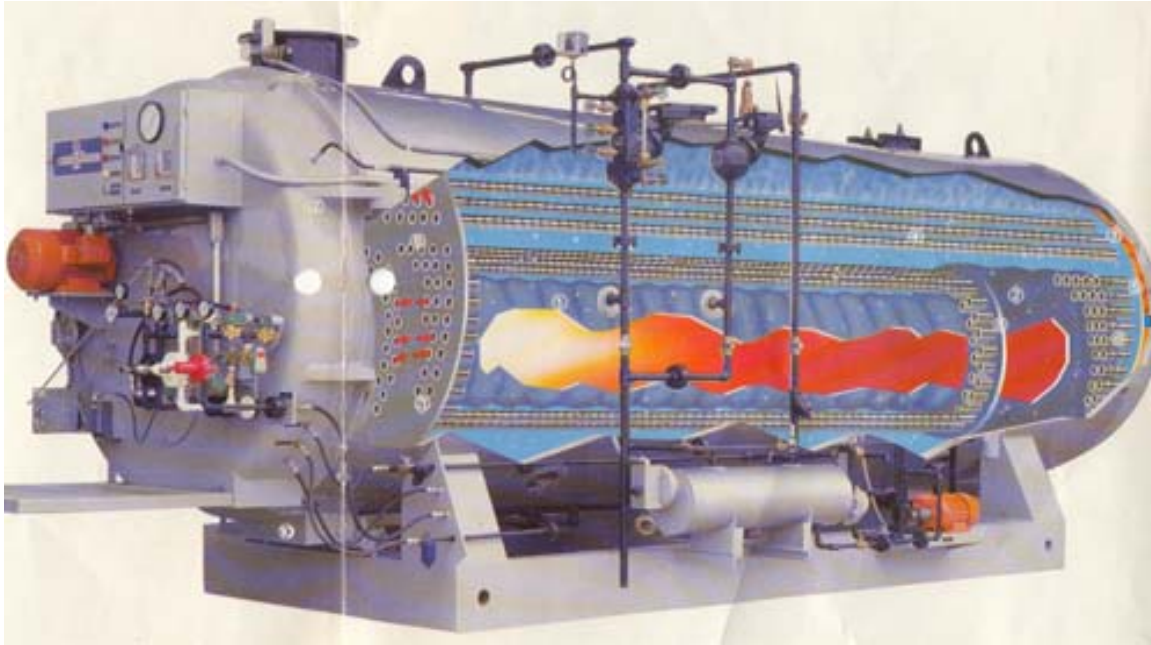


Fig. 2.14.- Partes esenciales y algunas opciones necesarias para producir vapor por medio del calor liberado durante la combustión de un combustible.

I.- Equipo para liberar el calor del combustible.- Este equipo es básicamente el quemador, del cual se habló ampliamente con anterioridad.

II.- Una cámara de combustión.- Es el espacio en donde se efectúa la oxidación del combustible o sea la reacción química entre el combustible y el oxígeno del aire, con desprendimiento de luz y calor. Esta cámara asume diferentes formas según el tipo de caldera.

III.- Un medio para absorber el calor liberado.- El calor liberado durante la combustión debe pasar al agua para producir su vaporización pero sin que exista en ningún momento contacto directo entre los productos de la combustión y el agua o el vapor, ambos medios

se encuentran separados por tubos, placas y otras superficies metálicas que constituyen los que se llama *superficie de calefacción*. Formando una variedad de intercambiador de calor.

IV.- Un sistema para producir el tiro.- El aire necesario para suministrar el oxígeno para efectuar la combustión así como los productos de dicha combustión deben desplazarse adecuadamente a través de la caldera y ser desalojados a la atmósfera, esto se logra creando una corriente de aire a la que se denomina "Tiro", la cual puede obtenerse por medios naturales o mecánicos.

V.- Un medio de reposición del agua.- En la medida en que se va produciendo el vapor, el nivel del agua va bajando, como el nivel del agua en la caldera debe conservarse dentro de límites definidos, es necesario suministrar agua nueva a la caldera para mantener el agua dentro de los límites definidos de operación pues si no se hace así pueden presentarse riesgos graves, los que pueden llegar hasta producir una explosión súbita.

VI.- Un medio para capturar el vapor generado.- Este medio es básicamente el domo de vapor en las calderas de tubos de humo y el espacio existente entre el nivel de agua y la parte superior del casco en las calderas de tubos de humo.

VII.- Un medidor de la presión de vapor y un indicador del nivel de agua.- Todas las calderas deben tener un manómetro que permita determinar la presión existente en el interior de la caldera, así como una mirilla de cristal que permita verificar el nivel de agua con el que cuenta la caldera.

VIII.- Un medio o medios para coordinar su funcionamiento.- Existen diferentes medios para coordinar su funcionamiento, sin embargo el más importante es el programador, aunque también se cuenta con diversidad de instrumentación que de una manera coordinada permiten operar con seguridad y eficiencia las calderas.

2.4.3 Funcionamiento de las calderas.

En las calderas modernas se pueden llegar a generar de 0.028 a 0.084 m³ (1 a 3 pies³) de vapor por minuto en un tubo de 0.0635 m (2 ½”) de 1.324 m (5 pies) de longitud del hogar de la misma. Para hacer esta generación de vapor constante se debe suministrar agua continuamente y normalmente este suministro se hace en exceso para proteger los tubos de la caldera de un sobrecalentamiento [Moreno, 2000].

El movimiento del agua y vapor (dentro de la caldera) que proporciona el suministro de agua y remueve vapor generado se le conoce como circulación y esta puede ser natural y forzada. El proceso de circulación natural que ocurre en un circuito de caldera tiene lugar como resultado de los efectos diferenciales de la gravedad que afectan al fluido más denso que se encuentra en la trama del circuito que no se calienta (el ramal de descenso) y al fluido menos denso que se encuentra en el tramo que si se calienta (el ramal de ascenso) de un circuito de tubo en U [Haywood, 1999]. Un incremento en flujo es resultado del incremento en la diferencia de densidades de los fluidos que se encuentran en los tubos de bajada y subida respectivamente conforme se incrementa la absorción de calor. Al mismo tiempo la fricción y otras pérdidas en los tubos de bajada y subida también se incrementa. Cuando la relación de incremento en estas pérdidas (causada principalmente por el incremento en volumen específico en los circuitos de subida) se hace mayor que la ganancia por el incremento en la diferencia de densidades, la relación de flujo comienza a descender. En las unidades de circulación forzada el agua es suministrada a los circuitos que absorben calor a través de bombas de circulación [Moreno, 2000].

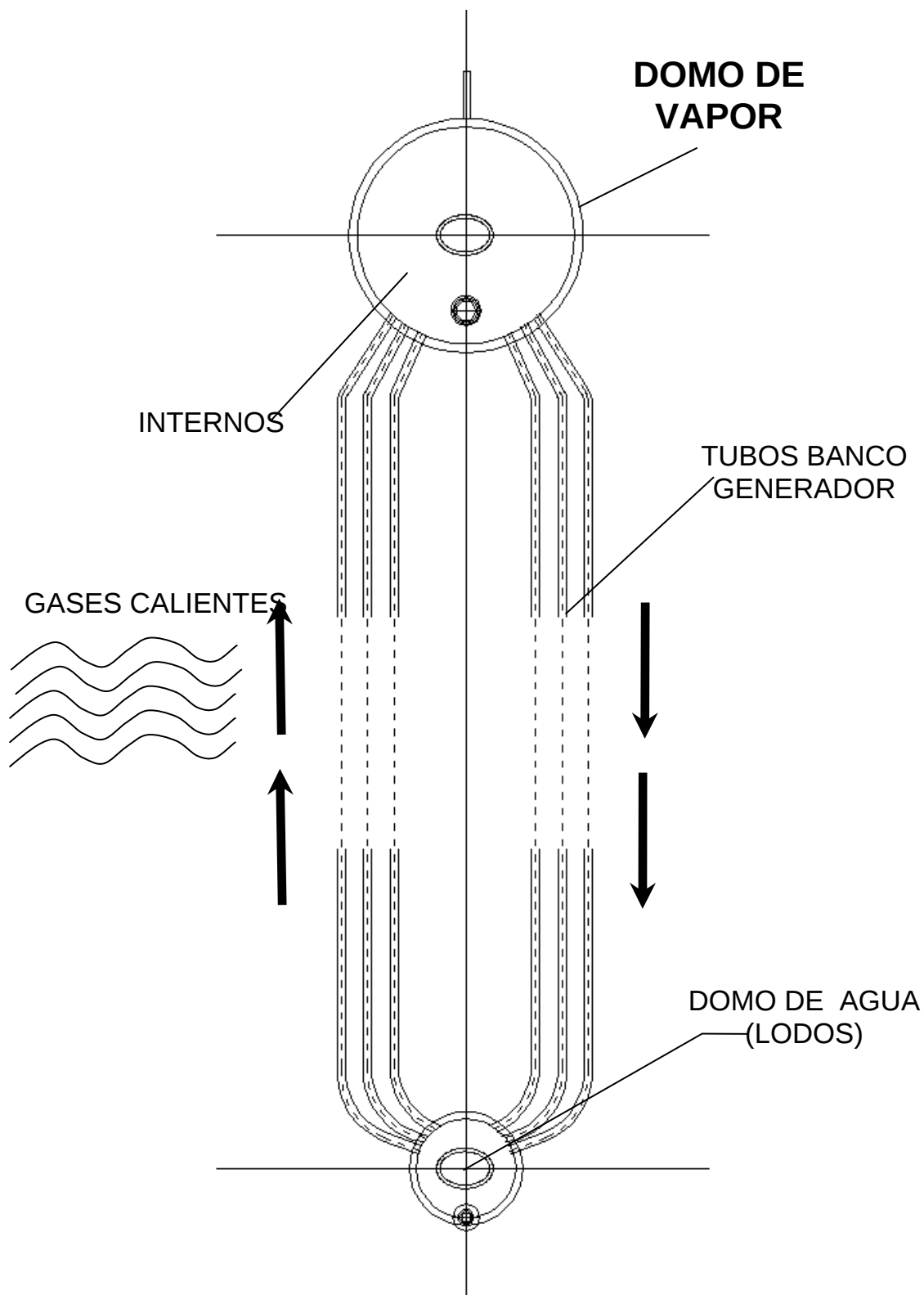


Fig. 2.15.- Circulación natural en una caldera de tubos de agua.

¿Qué se debe controlar en un generador de vapor?

En los generadores de vapor hay que regular:

- La presión del vapor.
- La temperatura del vapor.
- La relación aire/combustible.
- El nivel de agua de la caldera.
- La presión diferencial fluido auxiliar/combustible.
- La temperatura media de aire (entrada)/gases (salida) en el precalentador.
- Temperatura agua de alimentación.

Existiendo una serie de parámetros auxiliares y de seguridad que hay que supervisar:

- Temperatura del aceite combustible.
- Presión del combustible.
- Presión llegada fluido auxiliar.
- Temperatura gases de combustión.
- Temperatura aire de combustión.
- Características agua de alimentación.
- Presión agua de alimentación.
- Presión caldera.
- Presión aire combustión.

E incluso existen parámetros cuyo valor real fuera de límites deben producir una alarma y, a veces la parada de la caldera; tales como:

- Presión del combustible (baja).
- Presión fluido auxiliar de pulverización (alta y baja).
- Presión aire de combustión (baja).
- Presión del vapor (alta).
- Temperatura del aceite combustible (baja).

3 DESARROLLO DEL PROGRAMA.

3.1 Generalidades.

Para realizar un análisis termoeconómico del combustóleo y gas natural utilizado en calderas, y que involucre el mayor número de variables posibles se requiere realizar un programa de cómputo que permita realizar los cálculos de una manera rápida, las variables que a juicio propio inciden mayormente en el consumo del combustible (combustóleo y gas natural) son las siguientes:

- Generación de vapor en el mes.
- Presión de operación de la caldera.
- Días de operación de la caldera en el mes.
- Temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea.
- Temperatura del cuarto de calderas.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.
- Temperatura del agua de alimentación a la caldera.
- Temperatura del combustóleo en el intercambiador de la caldera.
- Temperatura del combustóleo en el tanque de almacenamiento.
- Presión de vapor en el tanque de combustóleo.
- Presión de sopleo.
- Número de veces que se realiza el sopleo al día.
- Tiempo de duración del sopleo en ambos lados
- Presión del vapor en el intercambiador caldera.
- Presión del vapor de atomización.
- Precio del combustóleo y gas natural.
- Precio del aditivo.
- Razón de aditivo (cantidad de aditivo por litro de combustóleo).
- Exceso de aire con combustóleo y gas natural.
- Poder calorífico superior del combustóleo.
- Poder calorífico superior del gas natural.

Sin embargo cabe señalar que el programa desarrollado en el presente no contempla ciertas variables que aunque no influyan de manera significativa, si es preciso tener en cuenta la falta de ellas, ya que en caso de ser muy poco el ahorro obtenido al utilizar combustóleo estas pudieran ser un factor para tomar la decisión del combustible a utilizar. Entre ellas destacan:

- El vapor utilizado por el combustóleo en el precalentamiento, en la atomización y en el sopleo, es un vapor que no se retorna, por lo tanto, el agua de reposición, misma que se tiene que tratar es mayor al utilizar este combustible.
- Para el suministro del combustóleo a la caldera se requiere el uso de una bomba, la cual demanda cierta cantidad de energía eléctrica, así mismo para recircular el combustóleo en el tanque (si cuenta con recirculación) y para la descarga del mismo. Este costo por concepto de energía eléctrica no se obtiene con el uso del gas natural.
- El costo de mantenimiento al utilizar combustóleo se espera sea mayor, ya que al utilizar éste se tiene un mayor ensuciamiento por el lado de fuego, así mismo cuenta con una mayor cantidad de equipos para el suministro y control del mismo.

El lenguaje utilizado para el desarrollo del programa fue el Csharp (C#), y los requerimientos mínimos son:

- Procesador Pentium IV.
- Windows XP.
- Microsoft. Net, versión 2.0.

3.2 Balance termodinámico utilizando combustóleo como combustible.

Análisis termodinámico en el lado de fuego de la caldera utilizando combustóleo.

Utilizando una temperatura de descarga de los gases de combustión de 583°F se tiene:

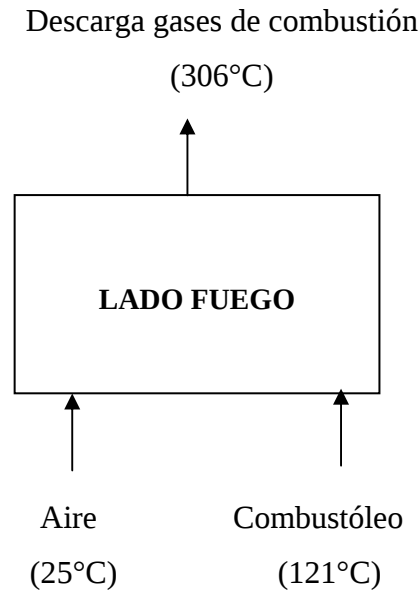


Fig. 3.1.- Diagrama esquemático de la caldera utilizando combustóleo.

Despreciando los cambios de energía cinética y potencial se tiene:

$$Q = \sum_P n_i (\bar{h}_{P2} - \bar{h}_{P0})_i - \sum_R n_i (\bar{h}_{R2} - \bar{h}_{R0})_i + \Delta H^\circ \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

Q = Calor Generado

n_i = Número de moles

$\bar{h}_P$ = Entalpía de los productos

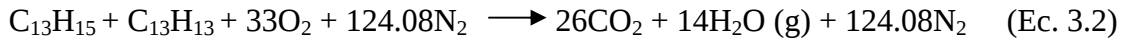
$\bar{h}_R$ = Entalpía de los reactivos

ΔH° = Entalpía de Combustión

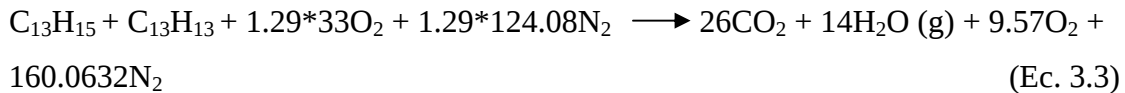
$\sum_P$ = Sumatoria de los Productos

$\sum_R$ = Sumatoria de los Reactivos

El combustóleo es un hidrocarburo que contiene aproximadamente 26 átomos de C por molécula (C_{26}) y su composición es del tipo $C_{n/2}H_{n+2} + C_{n/2}H_n$ entonces podemos decir que es un hidrocarburo del tipo $C_{13}H_{15} + C_{13}H_{13}$ [Chow, 1998], por lo que su ecuación de combustión es:



Considerando un 29% de exceso de aire en la combustión se obtiene:



Para el combustóleo:

$$\sum_R n_i (h_{R1} - h_{R0})_i = X_i (Cp)_R (T_1 - T_0) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

X_i = Número de moles del reactivo.

$(Cp)_R$ = Calor específico a presión constante del reactivo.

T_1 = Temperatura a la que se encuentra el reactivo.

T_0 = Temperatura ambiente.

Determinación del Cp promedio del combustóleo

La industria del aceite expresa las densidades en grados de la escala **API** (*American Petroleum Institute*). La densidad **API** indica el peso de aceite por galón. Las densidades específicas y las densidades **API** se relacionan según la expresión:

$$\text{Peso Específico (PE)} = 141.5 / (131.5 + \text{grados API}) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Despejando **API** y dado que el PE del combustóleo es 0.982

$$\text{API} = (141.5 / \text{PE}) - 131.5$$

$$\text{API} = (141.5 / 0.982) - 131.5$$

$$\text{API} = 12.59$$

Entonces el Cp del combustóleo (ver anexo IV) a 394 K y 298 K es 1.91 y 1.57 kJ/kg K respectivamente, por lo tanto:

$$\sum_R n_i (h_{R1} - h_{R0})_i = (1)((1.91 \cdot 394) - (1.57 \cdot 298))$$

$$= 284.68 \text{ kJ/kg}$$

Tomando como base un mol de combustóleo:

$$n_p = 26 + 14 + 9.57 + 160.0632$$

$$n_p = 209.6332 \text{ moles}$$

$$\sum_P n_i (h_{P2} - h_{P0})_i = X_i (Cp)_P (T_2 - T_0) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

X_i = Número de moles del producto.

$(Cp)_P$ = Calor específico ponderado de la mezcla de los gases de combustión

T_2 = Temperatura a la que se encuentran los gases de combustión.

T_0 = Temperatura ambiente.

Determinando un calor específico promedio de la mezcla $(Cp)_P$:

$$(Cp)_P = X_{CO_2} (Cp)_{CO_2} + X_{H_2O} (Cp)_{H_2O} + X_{O_2} (Cp)_{O_2} + X_{N_2} (Cp)_{N_2} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$(Cp)_P = (1/209.6332) \left[(26)(46.61) + (14)(36.19) + (9.75)(32.14) + (160.0632)(30.15) \right]$$

$$(Cp)_P = 32.69 \text{ kJ/kgmol K}$$

Por lo tanto:

$$\sum_P n_i (h_{P2} - h_{P0})_i = X_i (Cp)_P (T_2 - T_1)$$

$$= (209.6332)(32.69)(579 - 298)$$

$$= 1'925,667.52 \text{ kJ/kgmol}$$

$$= 5,663.73 \text{ kJ/kg}$$

El poder calorífico superior esta dado por la ecuación:

$$PCS = PCI + Magc * h_{fg} \quad (Ec. 3.8)$$

Donde:

PCS = Poder calorífico superior del combustible (kcal/kg).

PCI = Poder calorífico inferior del combustible (kcal/kg).

Magc = Masa de agua generada en la combustión (kg de agua/ kg de comb.)

h_{fg} = Entalpía de vaporización del agua (kcal/kg)

Despejando PCI de la ecuación anterior tenemos:

$$PCI = PCS - Magc * h_{fg} \quad (Ec. 3.9)$$

Para el combustóleo y según la ecuación de combustión determinada con anterioridad se procederá a obtener la masa de agua generada en la combustión (Magc)

$$Magc = (\text{Número de moléculas de agua} * \text{Peso molecular del agua}) / \text{Peso molecular del combustible} \quad (Ec. 3.10)$$

$$Magc = (14 * 18) / 340$$

$$Magc = 0.7412 \text{ kg de agua/ kg de comb.}$$

Si el PCS del combustóleo es de 43,543 kJ/kg y si la entalpía de vaporización del agua a 25°C es de 2,444.589 kcal/kg se obtiene:

$$PCI = 43,543 - (0.7412 * 2,444.589)$$

$$PCS = 41,731.07 \text{ kJ/kg}$$

Por lo que el calor generado por el combustóleo según la ecuación 3.1 y haciendo ΔH° positiva

$$Q_{gc} = 41,731.07 + 284.68 - 5,663.73$$

$$Q_{gc} = 36,352.02 \text{ kJ/kg}$$

3.3 Balance termodinámico utilizando gas natural como combustible.

Análisis termodinámico en el lado de fuego de la caldera utilizando gas natural.

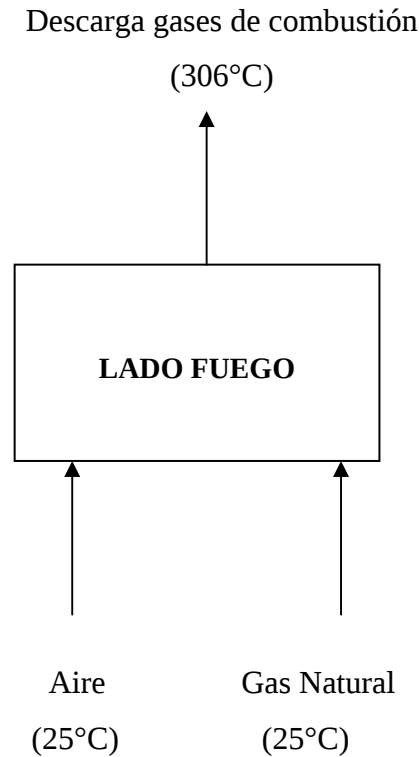
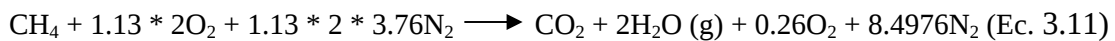


Fig. 3.2.- Diagrama esquemático de la caldera utilizando gas natural.

Considerando un 13% de exceso de aire en la combustión y una temperatura en la chimenea de 583°F se obtiene para el metano:



Considerando que tanto el aire como el combustible entran a 25°C:

$$\sum_R n_i (h_{R1} - h_{R0})_i = 0 \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\sum_P n_i (h_{P2} - h_{P0})_i = n_P (C_p)_P (T_2 - T_0) \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde :

n_P = Número total de moles de los gases de combustión

$(Cp)_p = \sum X_i (Cp)_i$ es el calor específico ponderado de la mezcla de los gases de combustión siendo X_i la fracción molal de la especie i-esima en los gases de combustión.

Tomando como base un mol de metano:

$$n_p = 1 + 2 + 0.26 + 8.4976$$

$$n_p = 11.7576 \text{ moles}$$

Aplicando la ecuación 3.7 se obtiene:

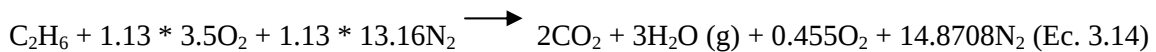
$$(Cp)_p = (1/11.7576) \left[(1)(46.61) + (2)(36.19) + (0.26)(32.14) + (8.4976)(30.15) \right]$$

$$(Cp)_p = 32.62 \text{ kJ/kgmol K}$$

Por lo tanto al aplicar la ecuación 3.6 se tiene:

$$\begin{aligned} \sum_p n_i (h_{p2} - h_{p0})_i &= X_i (Cp)_p (T_2 - T_1) \\ &= (11.7576)(32.62)(579 - 298) \\ &= 107,772.75 \text{ kJ/kgmol} \\ &= 6,735.80 \text{ kJ/kgCH}_4 \end{aligned}$$

Para el etano:



Tomando como base 1 mol de etano:

$$n_p = 2 + 3 + 0.455 + 14.8708$$

$$n_p = 20.3258 \text{ moles}$$

Análogamente, aplicando la ecuación 3.7 tenemos:

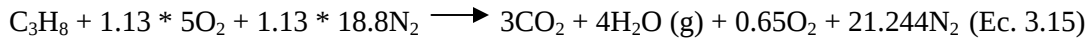
$$(Cp)_p = (1/20.3258) \left[(2)(46.61) + (3)(36.19) + (0.455)(32.14) + (14.8708)(30.15) \right]$$

$$(Cp)_p = 32.71 \text{ kJ/kgmol K}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}\sum_P n_i (h_{P2} - h_{P0})_i &= X_i (Cp)_P (T_2 - T_1) \\ &= (20.3258)(32.71)(579-298) \\ &= 186,824.8 \text{ kJ/kgmol} \\ &= 6,227.49 \text{ kJ/kgC}_2\text{H}_6\end{aligned}$$

Para el propano:



Tomando como base 1 mol de propano:

$$n_P = 3 + 4 + 0.65 + 21.244$$

$$n_P = 28.894 \text{ moles}$$

De la misma forma, aplicando la ecuación 3.7 tenemos:

$$(Cp)_P = (1/28.894) \left[(3)(46.61) + (4)(36.19) + (0.65)(32.14) + (21.244)(30.15) \right]$$

$$(Cp)_P = 32.74 \text{ kJ/kgmol K}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}\sum_P n_i (h_{P2} - h_{P0})_i &= X_i (Cp)_P (T_2 - T_1) \\ &= (28.894)(32.74)(579-298) \\ &= 265,823.07 \text{ kJ/kgmol} \\ &= 6,041.43 \text{ kJ/kgC}_3\text{H}_8\end{aligned}$$

Determinación del poder calorífico inferior del gas natural.

Para determinar el poder calorífico inferior del combustible es necesario conocer la masa de agua que se forma al llevarse a cabo la combustión, misma que se obtiene según la ecuación 3.9.

Para el gas natural que se encuentra constituido principalmente por 85.6% de metano, 7.8% etano y 1.4% propano y según las ecuaciones de combustión determinadas con anterioridad para cada uno de los combustibles se tiene:

$$\text{Magc} = [((2*18)/16)*0.856] + [((3*18)/30)*0.078] + [((4*18)/44)*0.014]$$

$$\text{Magc} = 2.09 \text{ kg de agua/ kg de combustible}$$

Si el poder calorífico del gas natural es de 46,739.42 kJ/kg y si la entalpía de vaporización del agua a 25°C es de 2,444.589 kJ/kg se obtiene:

$$\text{PCI} = 46,739.42 - (2.09*2,444.589)$$

$$\text{PCI} = 41,630.23 \text{ kJ/kg}$$

Determinación del calor generado utilizando gas natural:

Como ya se menciona anteriormente el gas natural esta compuesto por 85.6% metano, 7.8% etano y 1.4 % propano, entonces:

$$Q_{gg} = 41,630.23 - [(0.856)(6,735.8) + (0.078)(6,227.49) + (0.014)(6,041.43)]$$

$$Q_{gg} = 35,294.06 \text{ kJ/kg}$$

3.4 Vapor requerido por servicios propios al usar combustóleo.

Determinación de la masa de vapor de atomización (Mva).

Según la ecuación de Napier para descargas de vapor en orificios [Baumeister y Avallone, 1987].

$$M = A_2 P_1 / 70 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

M = Descarga de vapor saturado (lb/s).

A₂ = Área del orificio (plg²).

P₁ = Presión de vapor (lb/plg²).

Si se tienen seis orificios de 0.112 pulgadas de diámetro cada uno, correspondiente a un área de 0.00985 plg², en los seis orificios se tendría un área de 0.0591 plg². y la presión de atomización es de aproximadamente 100 lb/pulg² entonces:

$$M = 0.0591 (100 / 70)$$

$$M = 0.0844 \text{ lb/s}$$

$$M_{va} = 137.9 \text{ kg/hr}$$

$$M_{va} = 3,309.69 \text{ kg/día}$$

Determinación de la masa de vapor de sopleo (Mvs).

Si el vapor sale a través de 18 orificios de 0.250 pulgadas de diámetro cada uno, cuya área es de 4.91×10^{-2} pulgadas cuadradas y se utiliza vapor a 100 psig, utilizando la ecuación 3.16:

$$M = 4.91 \times 10^{-2} (100 / 70)$$

$$M = 7.01 \times 10^{-2} \text{ lb/s}$$

$$M = 1.26 \text{ Lb/s}$$

$$M_{vs} = 75.75 \text{ lb/min}$$

Si la duración del sopleo es de aproximadamente un minuto y se realiza 3 veces al día se tiene un consumo de

$$M_{vs} = 103.11 \text{ kg/día}$$

Determinación del vapor para el calentamiento del combustóleo (Mvte).

Tanque de combustóleo

Pérdidas de calor en el tanque de combustóleo suponiendo una temperatura ambiente de 17°C, una temperatura del combustóleo de 118°F y una velocidad del viento de 360 m/h (tomada con un anemómetro).

Para el cálculo de la pérdida o ganancia de calor y la temperatura de la superficie en superficies planas o tuberías de diámetro mayor a 610 mm, se emplearán las siguientes relaciones [NOM-009-ENER-1995]:

1.- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección natural o forzada, desde la superficie aislada hacia el ambiente h_c (w/m² K).

$$h_c = 3.0075 * C * [1.11/(t_{sup} + t_a - 510.44)]^{0.181} * [1.8 * (t_{sup} - t_a)]^{0.266} * (1 + 7.9366 \times 10^{-4} * V)^{0.5} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

2.- Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación, h_r (w/m² K)

$$h_r = 0.9824 \times 10^{-8} * \text{Emss} * ((t_a^4 - t_{sup}^4) / (t_a - t_{sup})) \quad (\text{Ec. 3.18})$$

3.- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, h_s (w/m² K)

$$h_s = h_c + h_r \quad (\text{Ec. 3.19})$$

4.- Cálculo del flujo de calor por unidad de área, q (w/m²)

$$q = (t_{op} - t_a) / [(esp/k_{ais}) + (1/h_s)] \quad (\text{Ec. 3.20})$$

5.- Verificación de la temperatura de superficie, t_{sc} (K)

$$t_{sc} = t_a + (q / h_s) \quad (\text{Ec. 3.21})$$

6.- Convergencia de la temperatura de superficie.

Si $t_{sup} = t_{sc}$, entonces las pérdidas de calor son igual a q y la temperatura en la superficie aislada es t_{sc} . En caso contrario, hacer $t_{sup} = t_{sc}$ y regresar al punto No.1 del procedimiento de cálculo para superficies planas.

Nomenclatura:

C = Coeficiente de forma, 1.79 para superficies planas y 1.016 para tuberías, adimensional.

esp = Espesor del material aislante, m.

top = Temperatura de operación, K.

tsup = Temperatura supuesta de la superficie del termoaislante, K.

ta = Temperatura ambiente, K.

kais = Conductividad térmica del termoaislante, W / (m K)

V = Velocidad del viento, m / h

Emss = Emisividad de la superficie aislada, adimensional.

Para nuestro caso de estudio:

$$hc = 3.0075 * 1.79 * [1.11 / (321 + 290 - 510.44)]^{0.181} * [1.8 * (321 - 290)]^{0.266} * [1 + ((7.9366 \times 10^{-4}) * 360)]^{0.5}$$

$$hc = 7.87 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$hr = (0.9824 \times 10^{-8}) * 0.21 * ((290^4 - 321^4) / (290 - 321))$$

$$hr = 0.24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$hs = hc + hr$$

$$hs = 7.87 + 0.24$$

$$hs = 8.11 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$q = (321 - 290) / (1 / 8.11)$$

$$q = 251.44 \text{ W/m}^2$$

Si el tanque tiene unas dimensiones de 9 m de diámetro y 6 m de altura, tiene un área superficial total de 233.26 m² por lo tanto

$$q = 58,643.9 \text{ W}$$

$$q = 211,118.04 \text{ kJ/hr}$$

Si se utiliza vapor de 206.85 kPa (30 psig) para el calentamiento del tanque de combustóleo con una entalpía de vaporización de 2151.55 kJ/kg, entonces se requerirá una masa de vapor de:

$$M_{vtc} = 211,118.04 / 2,151.55$$

$$M_{vtc} = 98.12 \text{ kg/hr}$$

$$M_{vtc} = 2,354.88 \text{ kg/día}$$

Determinación del vapor para el calentamiento del combustóleo en el intercambiador de calor de la caldera (M_{vic}).

Realizando un balance de materia y energía

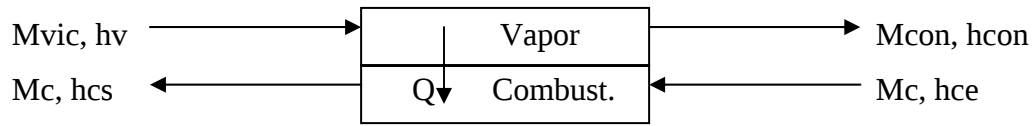


Fig. 3.3.- Diagrama esquemático del intercambiador de calor de la caldera.

Donde:

M_{vic} = Masa de vapor en el intercambiador de la caldera (kg/hr)

M_{con} = Masa de condensado (kg/hr)

M_c = Masa de combustóleo (kg/hr)

h_v = Entalpía del vapor (kJ/kg)

h_{con} = Entalpía del condensado (kJ/kg)

h_{ce} = Entalpía del combustóleo a la entrada (kJ/kg)

h_{cs} = Entalpía del combustóleo a la salida (kJ/kg)

Q = Calor (kJ/kg)

C_p = Calor específico a presión constante (kJ/kg K)

El C_p del combustóleo (ver anexo IV) a 394 K y 320 K es 1.91 y 1.65 kJ/kg K respectivamente.

$$M_{vic} = M_{con} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

$$M_{vic} (h_v - h_{con}) = M_c (h_{cs} - h_{ce}) \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$M_{vic} (h_v - h_{con}) = M_c C_p (T_s - T_e) \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$M_{vic} = (M_c C_p (T_s - T_e)) / (h_v - h_{con}) \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$M_{vic} = ((23,837.97 \text{ kg/día}) * ((752.54 - 528) \text{ kJ/kg}) / 2121.32 \text{ kJ/kg})$$

$$M_{vic} = 2523.23 \text{ kg/día}$$

No se consideran las pérdidas por convección y radiación ya que el intercambiador se encuentra aislado y se suponen mínimas.

3.5 Análisis económico.

El costo del combustóleo empleado para producir 10'897,709 kg/mes de vapor saturado a proceso a 1,310 kPa es de:

$$\text{Costo del combustible} = \text{Consumo de combustible} * \text{precio del combustible} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$\text{Costo del combustible} = (733,227 \text{ lt/mes}) * (1.84530 \text{ m.n./lt})$$

$$\text{Costo del combustible} = 1'353,023.78 \text{ m.n./mes}$$

Además al combustóleo se le agrega un aditivo a razón de 1:2500 cuyo costo por litro es de 137.5 m.n., por lo tanto en 733,227 lt/mes de combustóleo se le agregan en promedio 293.29 lt/mes de aditivo (40,327.38 m.n./mes), lo cual modifica el costo del combustóleo

$$\text{Costo} = \text{Costo del combustible} + \text{Costo del aditivo} \quad (\text{Ec. 3.27})$$

$$\text{Costo} = 1'353,023.78 + 40,327.38$$

$$\text{Costo} = 1'393,351.16 \text{ m.n./mes}$$

Si se utiliza gas natural para generar los mismos 10,897,709 kg/mes de vapor saturado a proceso a 1,310 kPa, aplicando la ecuación 3.26 se tendría:

$$\text{Costo del combustible} = (8,094.26 \text{ Gcal/mes}) * (166.11 \text{ m.n./Gcal})$$

$$\text{Costo del combustible} = 1'344,537.53 \text{ m.n./mes}$$

Es decir al utilizar gas natural se obtendría un ahorro de

$$\text{Ahorro} = 1'393,351.16 - 1'344,537.53$$

$$\text{Ahorro} = 48,813.63 \text{ m.n./mes}$$

3.6 Diagrama de flujo.

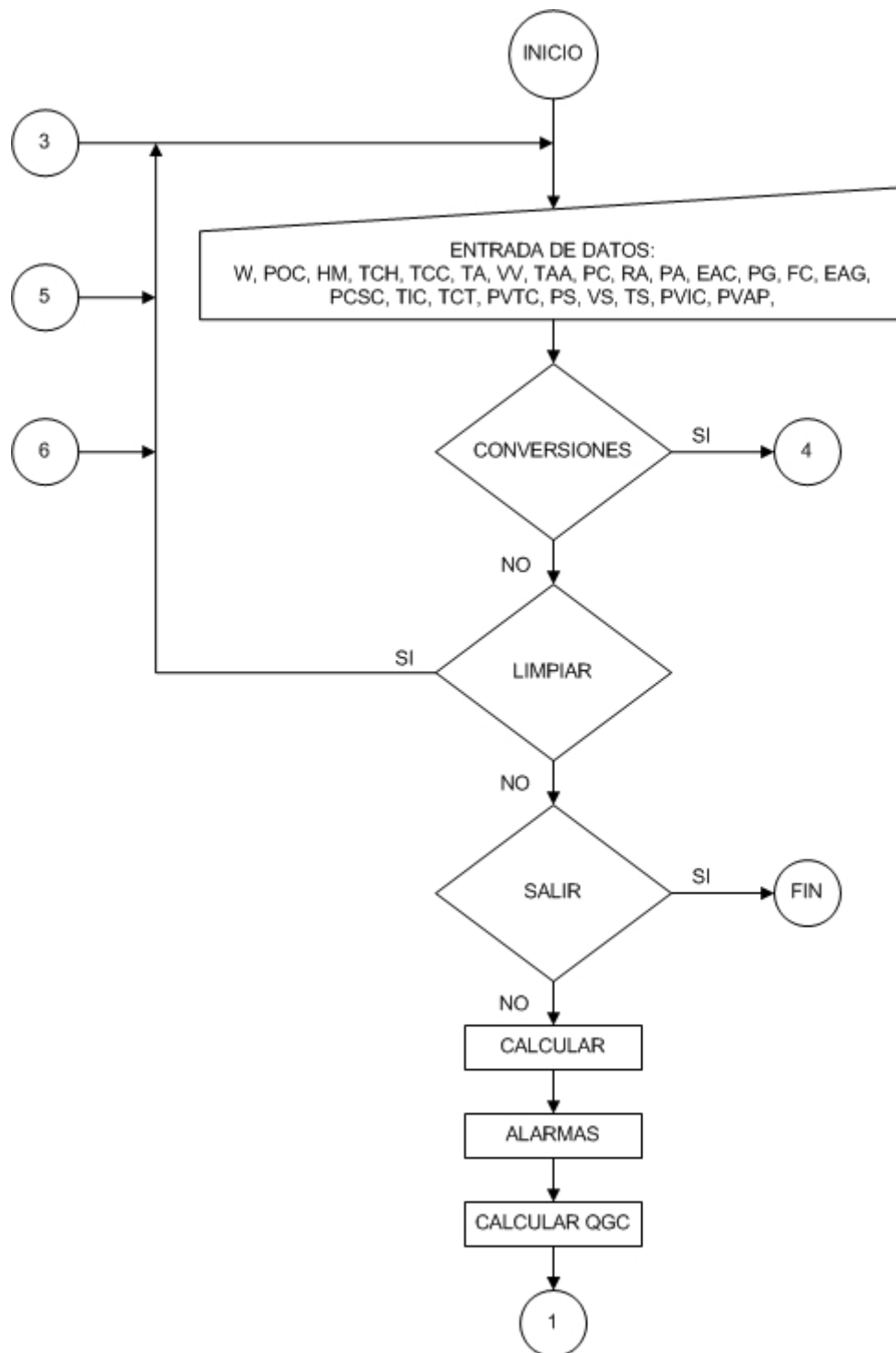


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo.

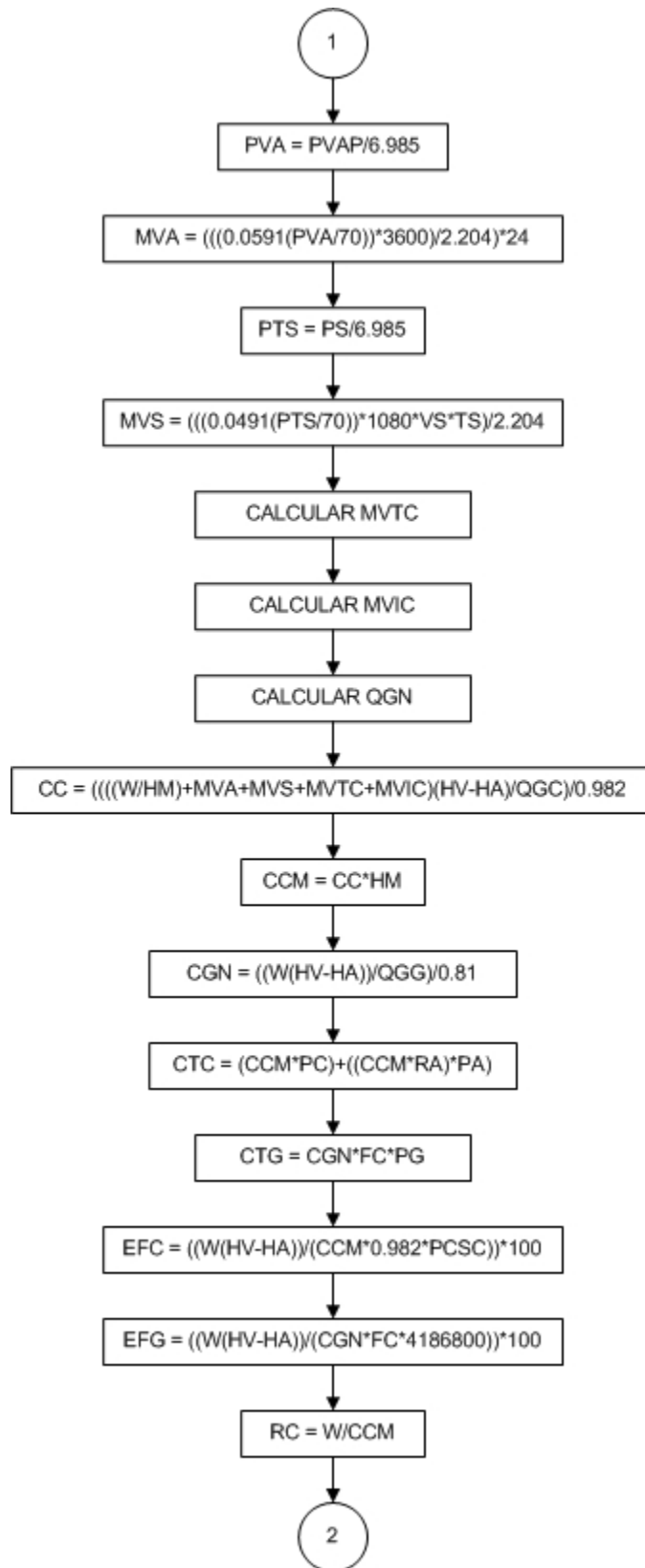


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

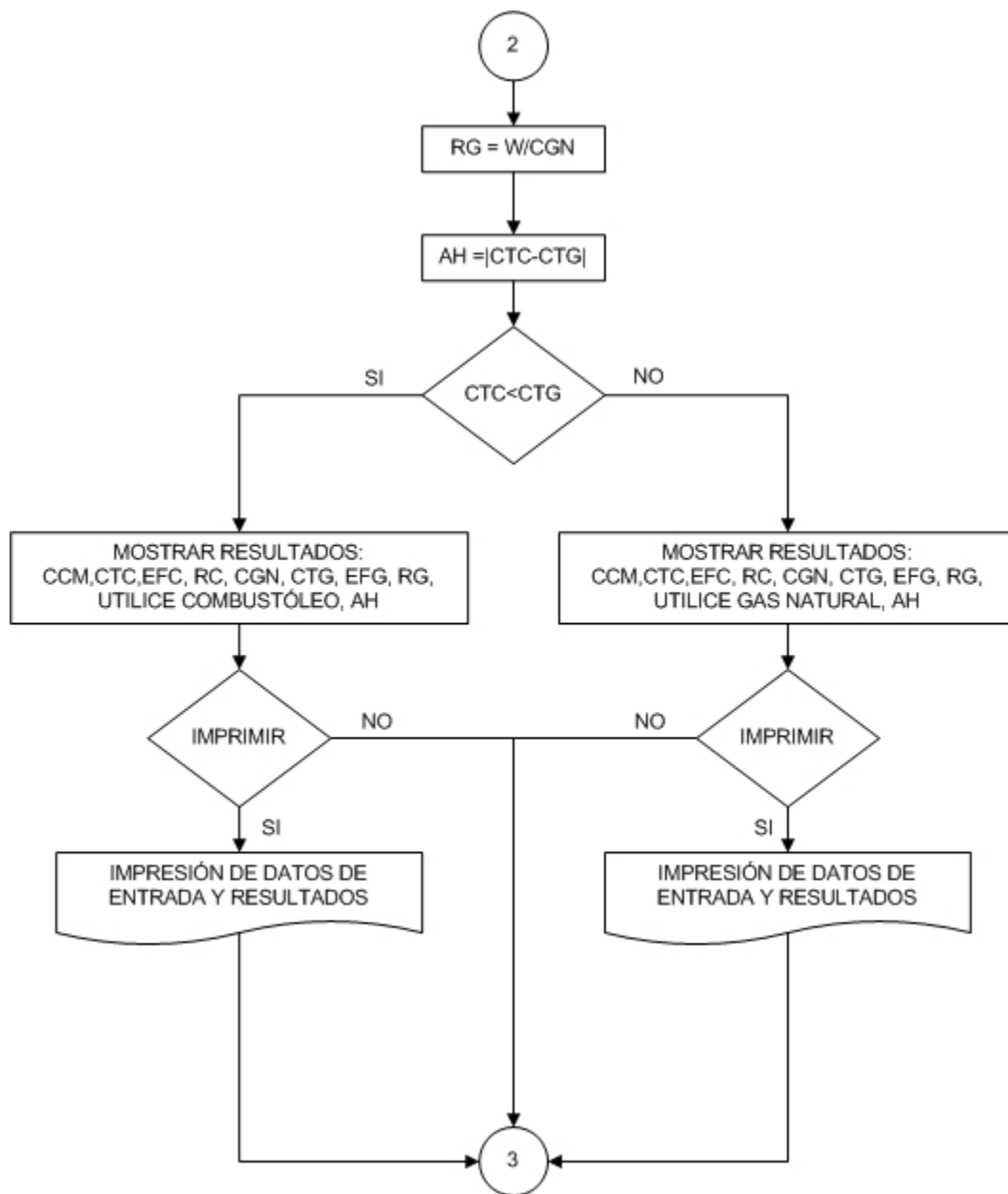


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

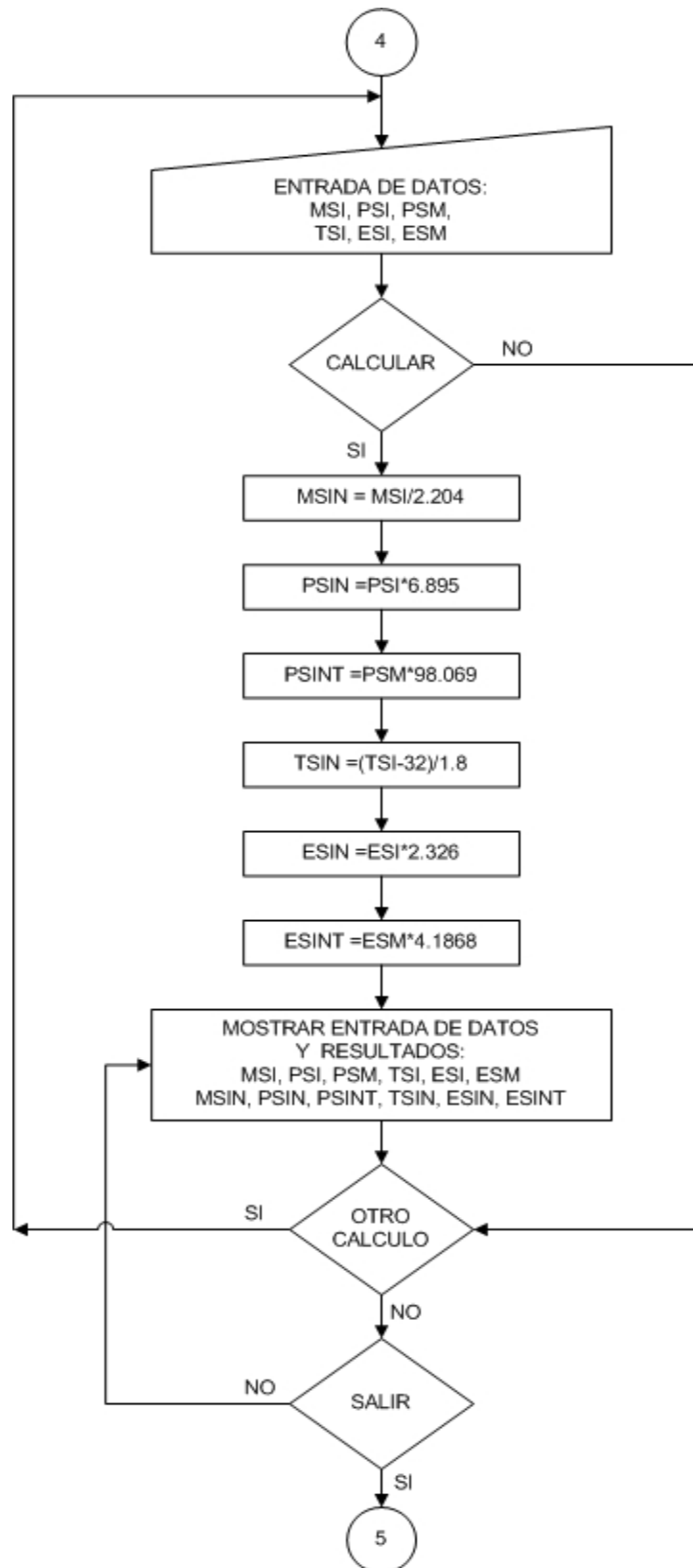


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

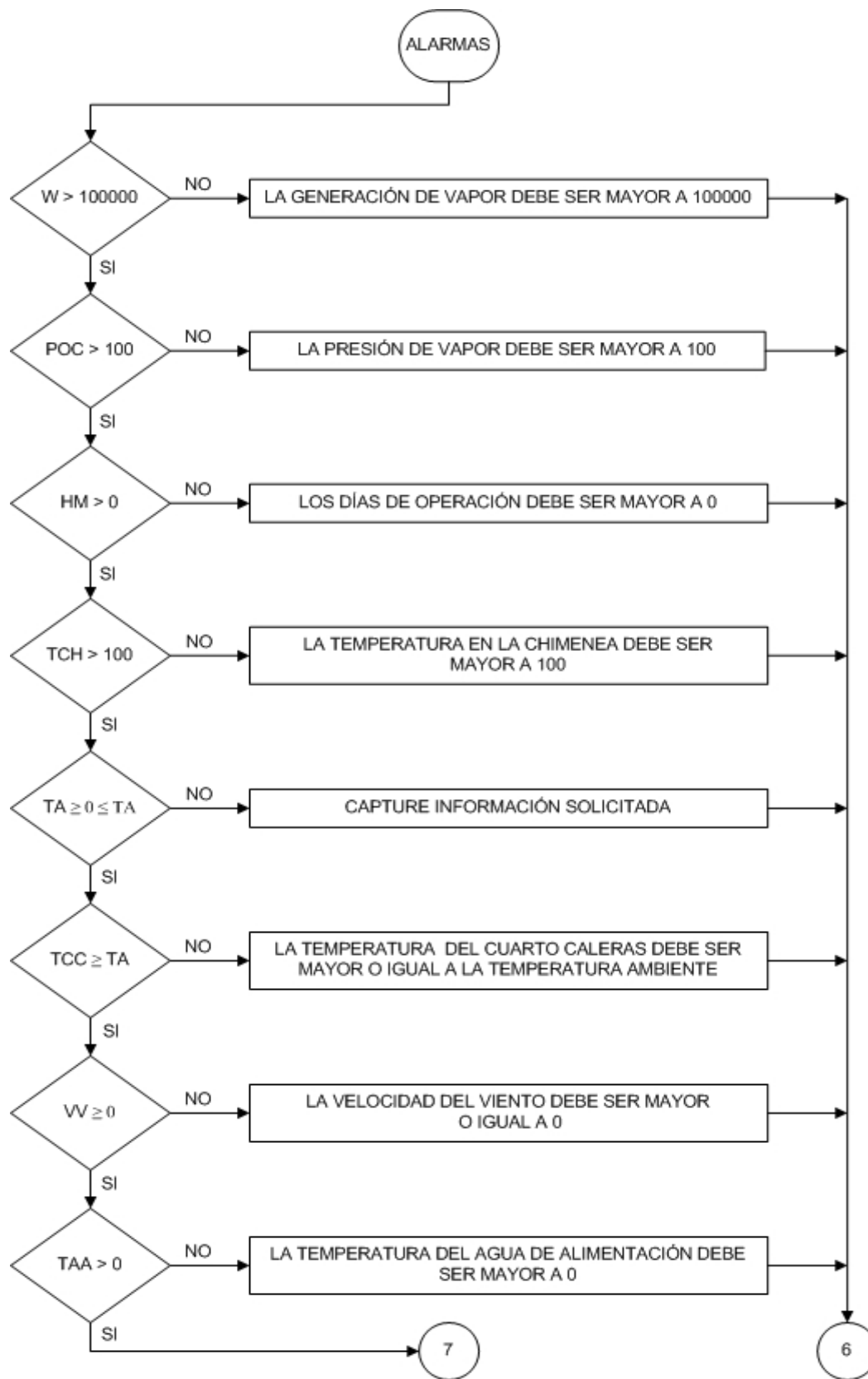


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

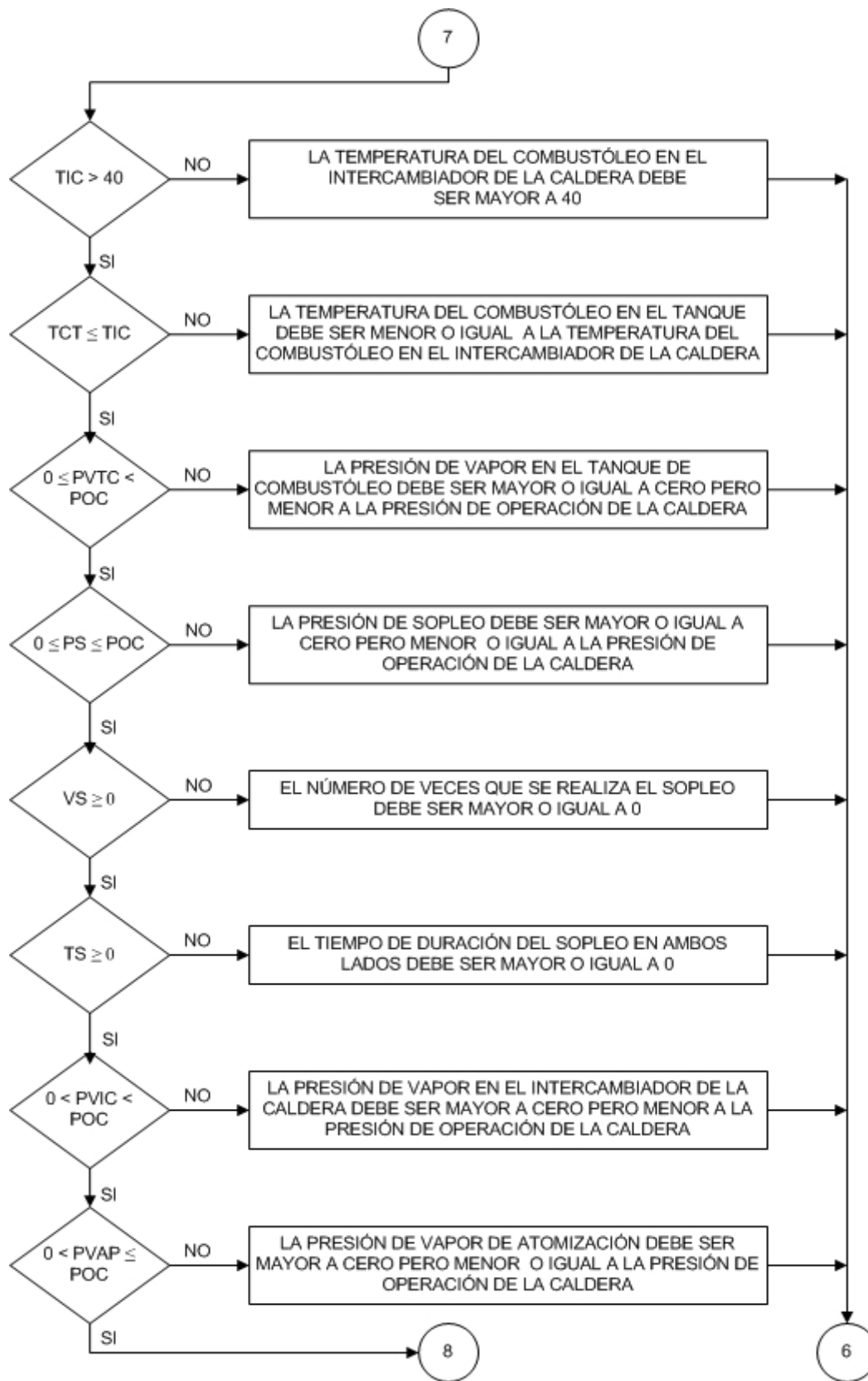


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

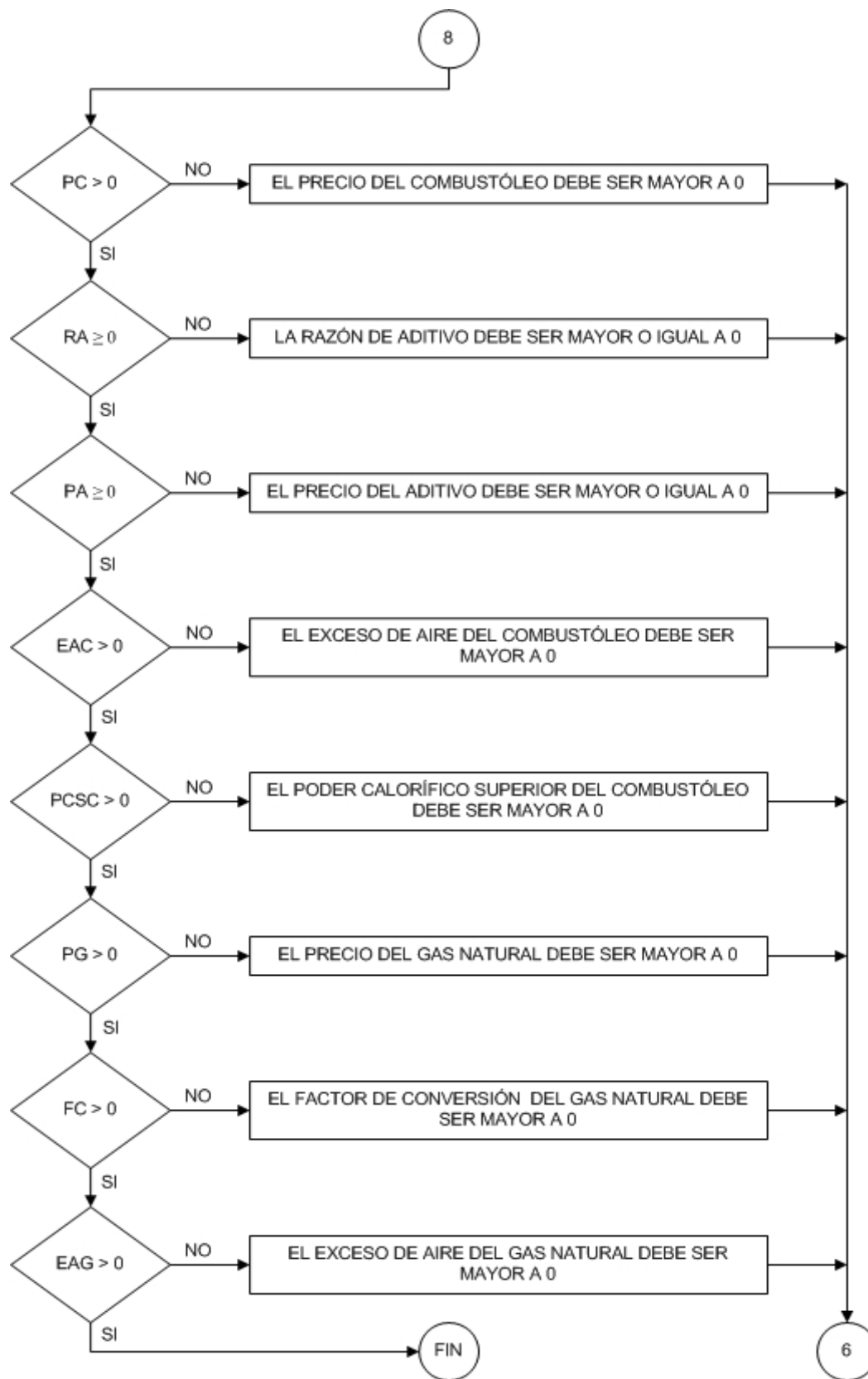


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

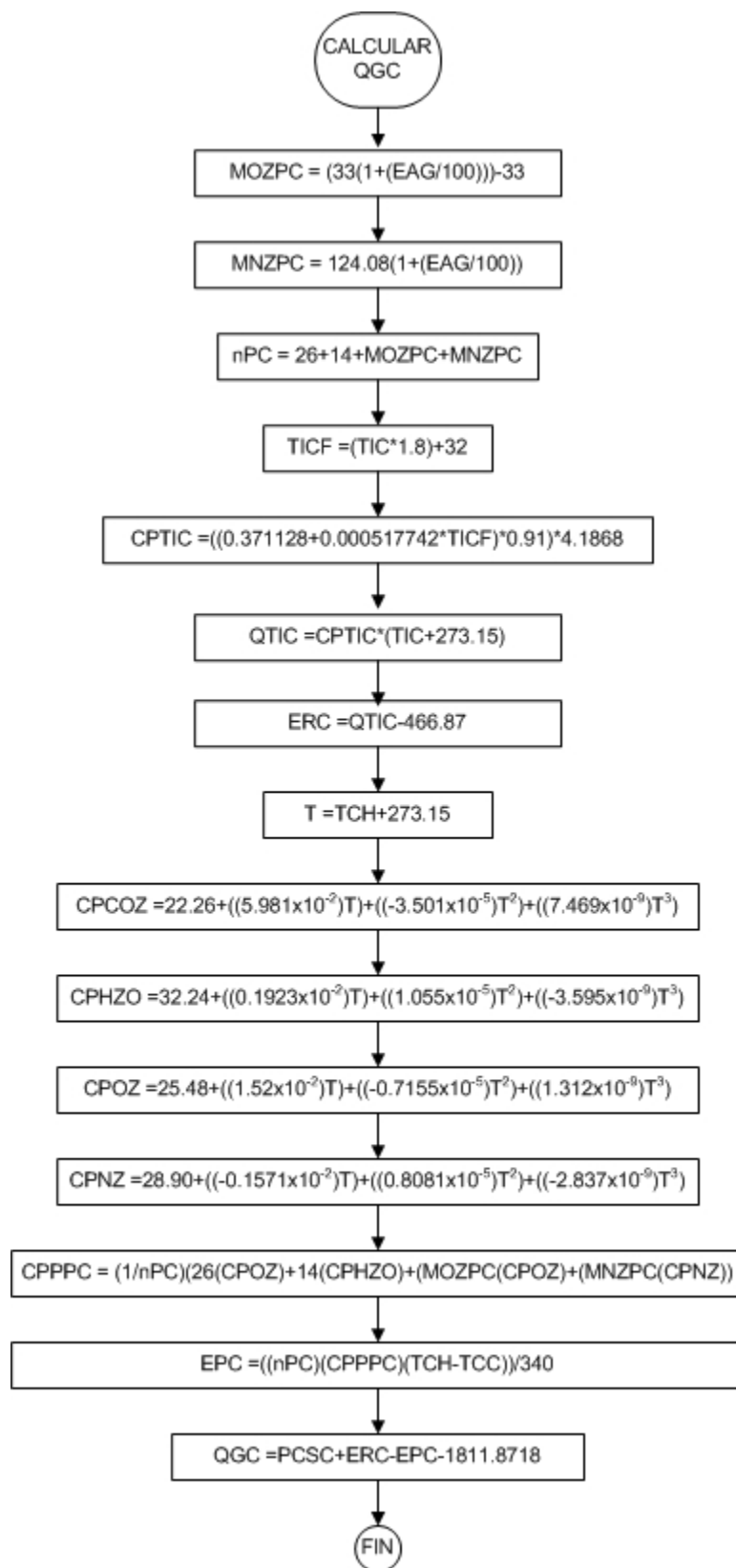


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

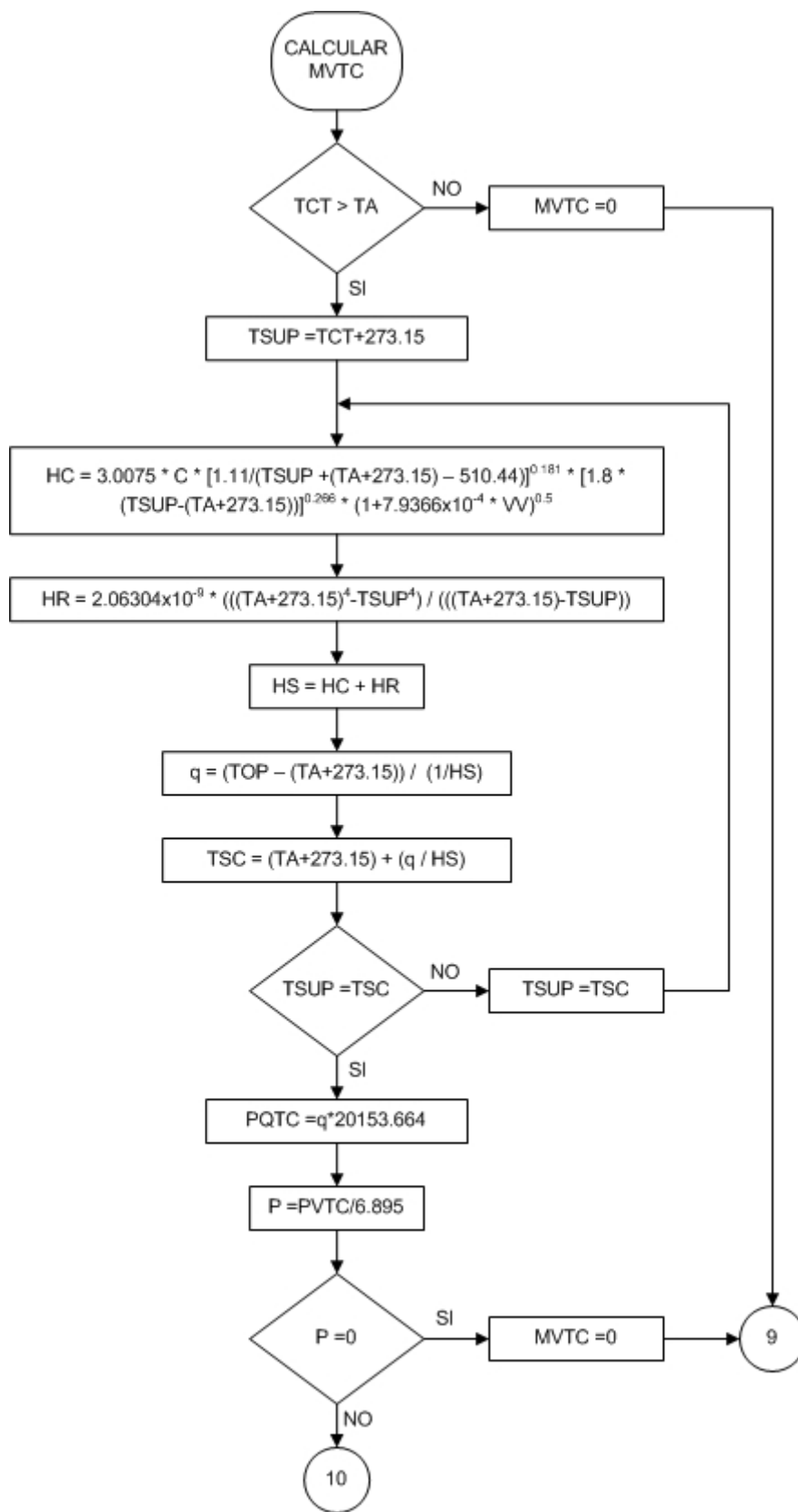


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

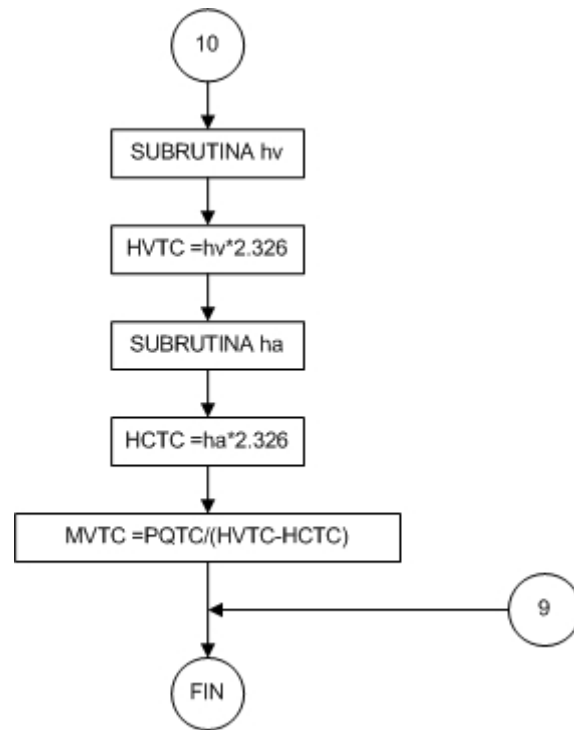


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

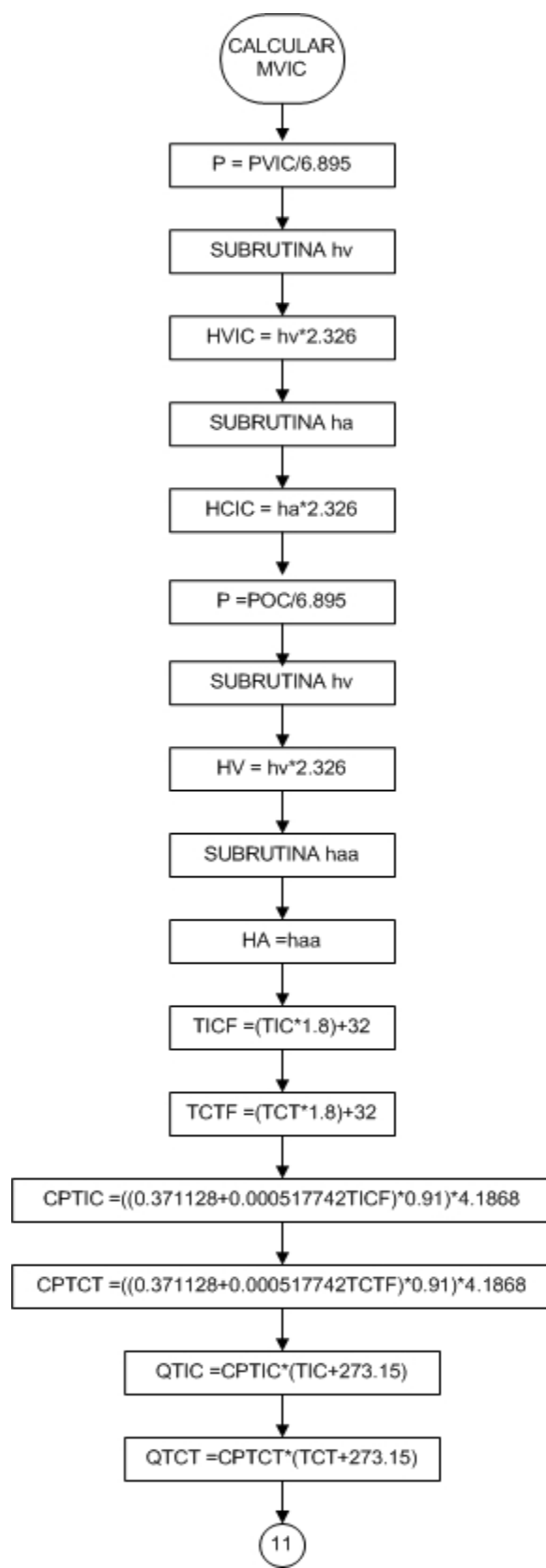


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

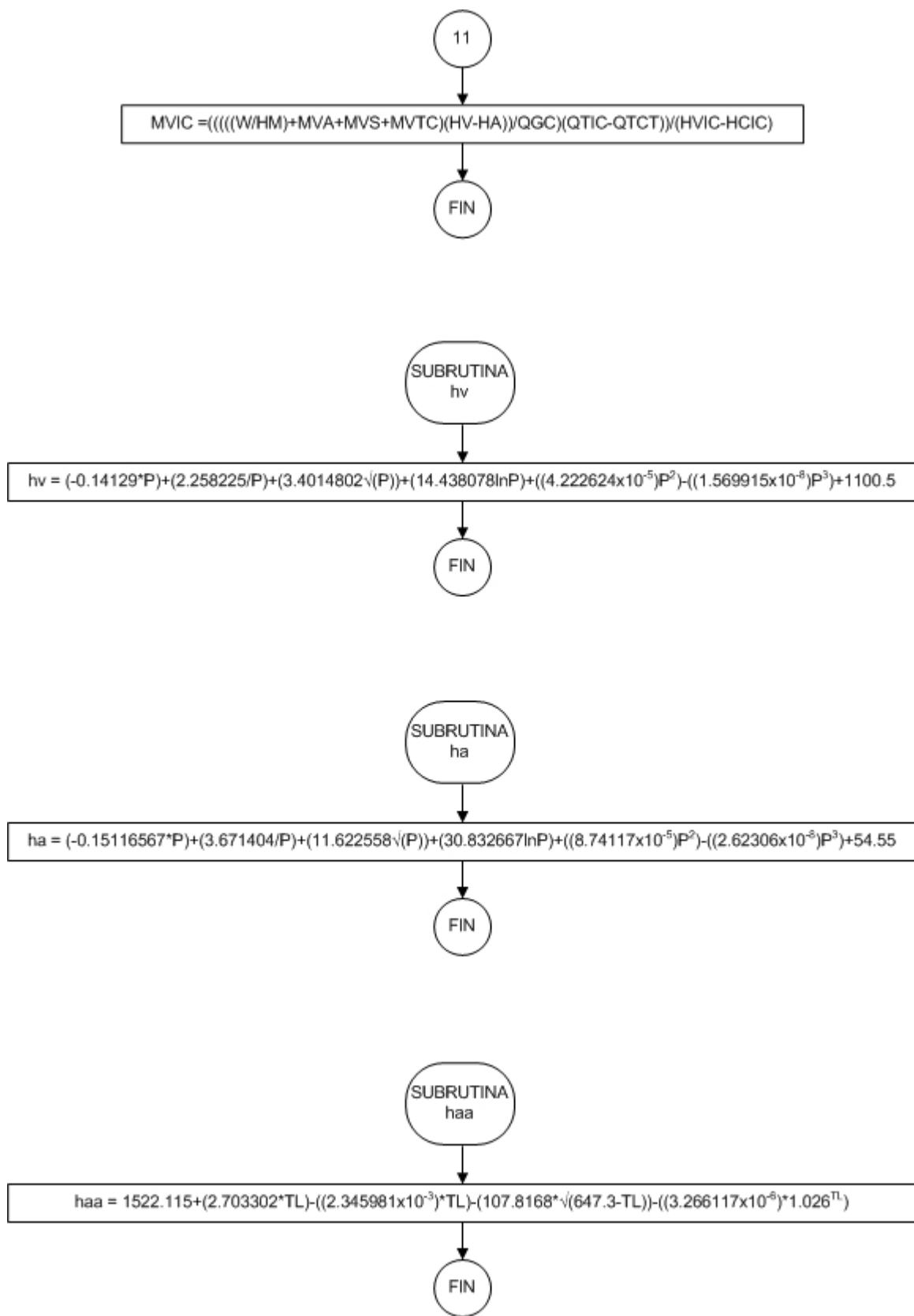


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

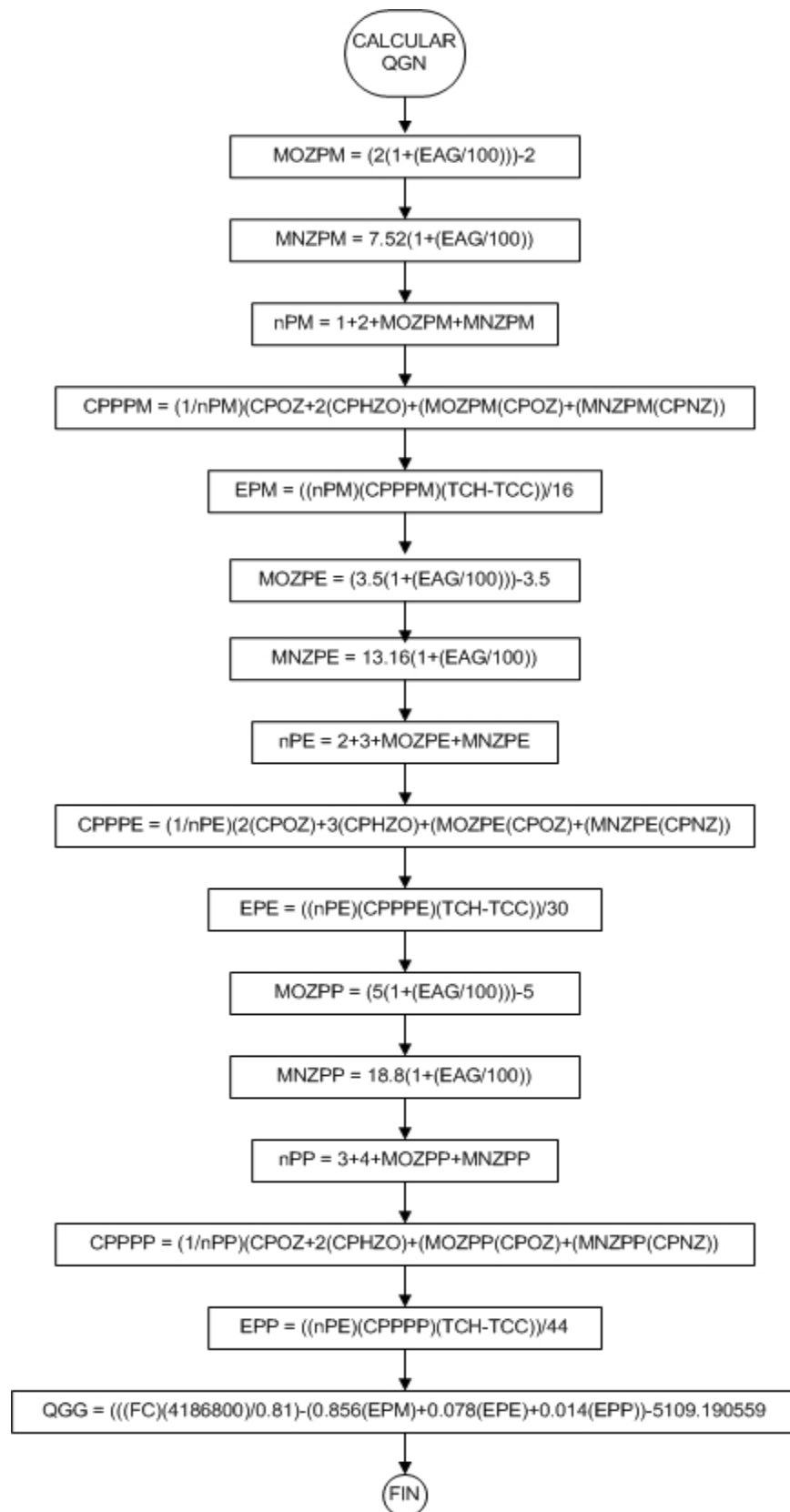


Fig. 3.4.- Diagrama de flujo del programa de cómputo (cont.)

4 DESARROLLO DEL PROYECTO.

4.1 Generalidades.

El presente trabajo fue desarrollado con la finalidad de obtener una valoración más certera en cuanto al combustible más idóneo para generar vapor en la caldera de Fábrica de Papel San Francisco, planta molino.

Los combustibles de estudio son el combustóleo y el gas natural, por lo que a través del programa el usuario tendrá la posibilidad de tomar la decisión de utilizar combustóleo o gas natural para la generación del vapor utilizado en el proceso, obteniendo con ello un ahorro en los energéticos. Lo que permitirá, que aunado a otras medidas de ahorro de energía que se realicen, la empresa se vuelva más competitiva.

A continuación se encuentra una breve descripción del proceso que se deberá seguir para la operación del programa:

Al ingresar usted al programa se presentará primeramente la siguiente pantalla:



Fig. 4.1.- Pantalla de inicio.

Posteriormente al dar un “click” en la parte gris de la figura 4.1 aparecerá la siguiente pantalla:



Fig. 4.2.- Pantalla principal.

Una vez que se encuentre en esta pantalla si usted selecciona la opción de “datos” se desplegará lo siguiente (ver fig. 4.3):

Fig. 4.3.- Pantalla de ingreso de datos.

El programa le solicitara los siguientes datos de entrada, mismos que en su mayoría están en los reportes generados día a día por el operador, por lo cual es sencillo determinar el total en el mes ó el promedio en el mismo según sea el caso, para el caso de la temperatura ambiente una buena aproximación se puede obtener del anexo V, y para las velocidades del viento en el anexo VI [Gallegos, et al, 2008]:

- Mes y año.
- Generación de vapor en el mes.
- Presión de operación de la caldera.
- Días de operación de la caldera en el mes.
- Temperatura gases de combustión a la salida de la chimenea.
- Temperatura cuarto de calderas.
- Temperatura ambiente (Predeterminada según anexo V pudiéndose modificar).
- Velocidad del viento (Predeterminada según anexo VI pudiéndose modificar).
- Temperatura agua de alimentación caldera.
- Temperatura combustóleo en el intercambiador de la caldera.
- Temperatura combustóleo en el tanque de almacenamiento.

- Presión de vapor al tanque de combustóleo.
- Presión de sopleo.
- Número de veces que se realiza el sopleo al día.
- Tiempo de duración del sopleo en ambos lados
- Presión de vapor intercambiador caldera.
- Presión vapor de atomización.
- Precio del combustóleo y gas natural.
- Precio del aditivo.
- Razón de aditivo.
- Exceso de aire con combustóleo y gas natural.
- Poder calorífico superior del combustóleo.
- Factor de conversión para el gas natural.

Si desconoce el valor solicitado en las unidades que se le piden, seleccione la opción “conversiones” lo cual lo llevará al programa de conversiones (véase figura 4.4)

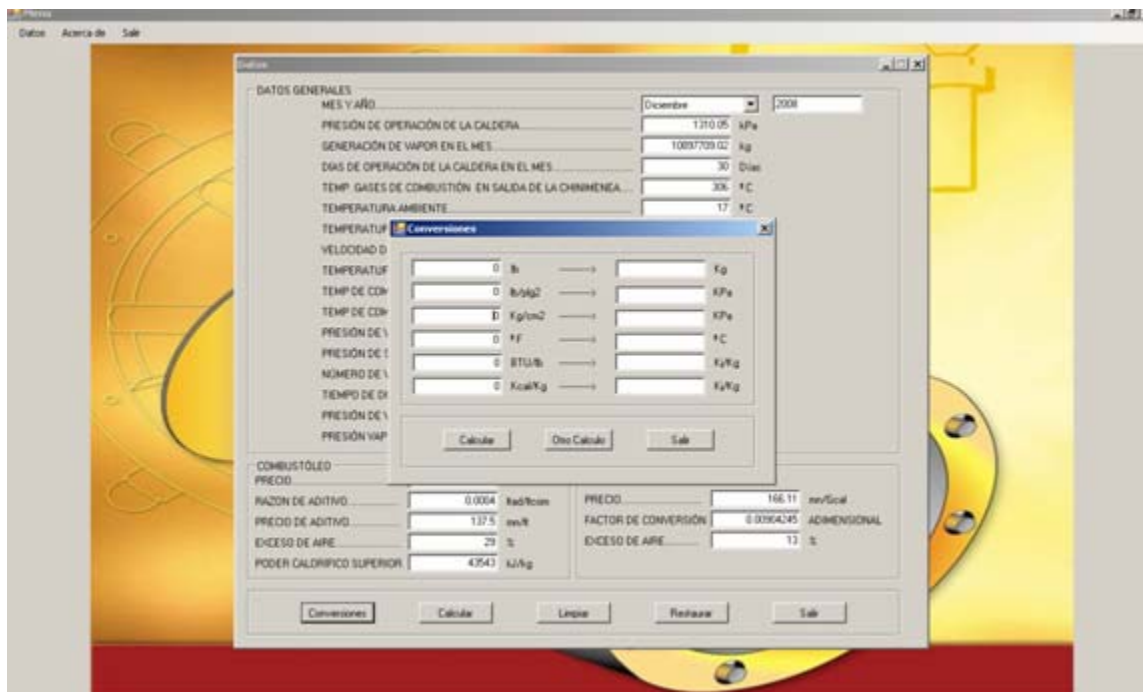


Fig. 4.4.- Pantalla de conversiones.

Las conversiones que se pueden realizar en el programa son las siguientes:

Unidades actuales	Unidades deseadas
lb	Kg
lb/plg ²	kPa
kg/cm ²	kPa
°F	°C
BTU/lb	kJ/kg
kcal/kg	kJ/kg

Usted puede ingresar al programa de conversiones tantas veces como lo requiera, al salir de este programa se regresa a la captura de datos, una vez que haya terminado de capturar la totalidad de los datos deberá seleccionar la opción “Calcular”, al realizar esto el programa valida los datos proporcionados y si estos son erróneos, desplegará una alarma proporcionando el error, dando el valor máximo ó mínimo que es valido para que el programa pueda continuar, de ser estos datos correctos se presentarán los resultados (ver fig. 4.5).

Resultados

COMBUSTÓLEO		GAS NATURAL	
CONSUMO DE COMBUSTÓLEO	733025 Lts/mes	CONSUMO GAS NATURAL	806147 m3/mes
COSTO DE COMBUSTÓLEO	1362570 m.n./mes	COSTO GAS NATURAL	1344540 m.n./mes
EFICIENCIA	81.64 %	EFICIENCIA	75.51 %
RELACION	14.67 Kg vap/lt comb	RELACION	12.17 Kg vap/lt comb

SE RECOMIENDA UTILIZAR GAS NATURAL

AHORRO MENSUAL: 48422 M. N.

Impresión Salir

Conversiones Calcular Limpiar Reiniciar Salir

Fig. 4.5.- Pantalla de resultados.

Una vez que se encuentre en esta pantalla usted podrá seleccionar la opción imprimir o salir, según sean sus requerimientos.

4.2 Resultados del programa.

En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se aprecia el costo de generación de 10'897,709 kg/mes de vapor saturado a 1,310 kPa para diferentes precios del combustóleo y gas natural. En la fig. 4.6 se puede determinar el costo de los combustibles para el cual se tendría el mismo costo de generación de vapor, por ejemplo de esta gráfica se deduce que para un precio de \$2.00 m.n./lt de combustóleo se tiene el mismo costo de generación de vapor que para el gas natural a un precio aproximado de \$186.20 m.n./Gcal.

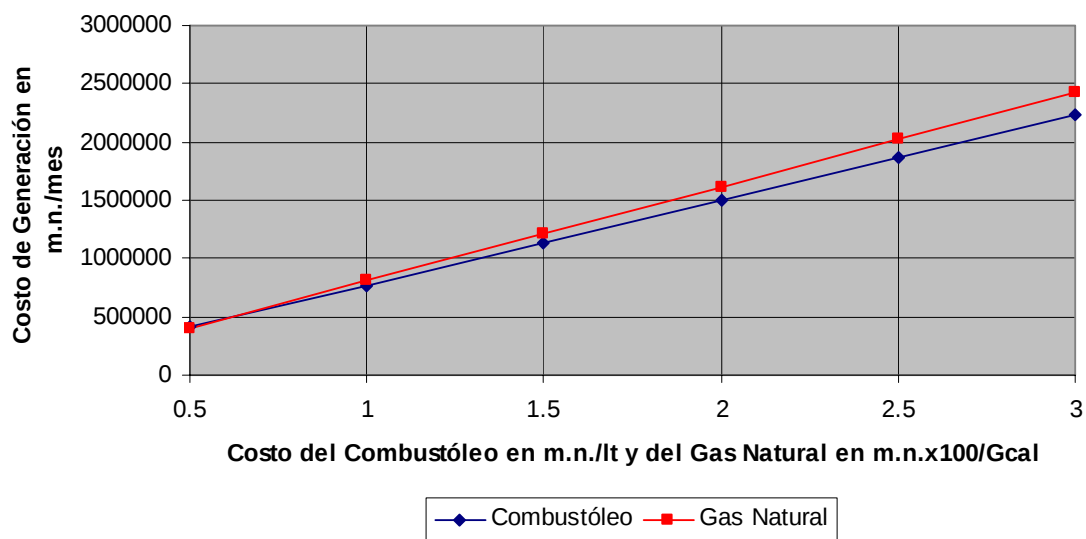


Fig. 4.6.- Costo de generación de vapor con combustóleo y gas natural.

La fig. 4.7 corresponde a la tabla 4.1 y se observa que el costo de generación es muy similar al utilizar el programa o la fórmula de *generación calorífica*, sin embargo en la tabla 4.1 se aprecia que es mayor el costo de generación resultante al utilizar la fórmula que con el programa, esto se debe principalmente a que en la determinación de la cantidad de combustóleo a utilizar para la generación del vapor a través de la fórmula se

parte del consumo de gas natural, y al tener esté una eficiencia menor se espera que el consumo de combustóleo sea mayor.

Tabla 4.1.- Comparación costo de generación de vapor para combustóleo.

Costo combustóleo (m.n./lt)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Costo generación simulador (m.n./mes)	407047	773756	1140464	1507173	1873882	2240591
Costo generación formula (m.n./mes)	408793	777074	1145356	1513637	1881919	2250200

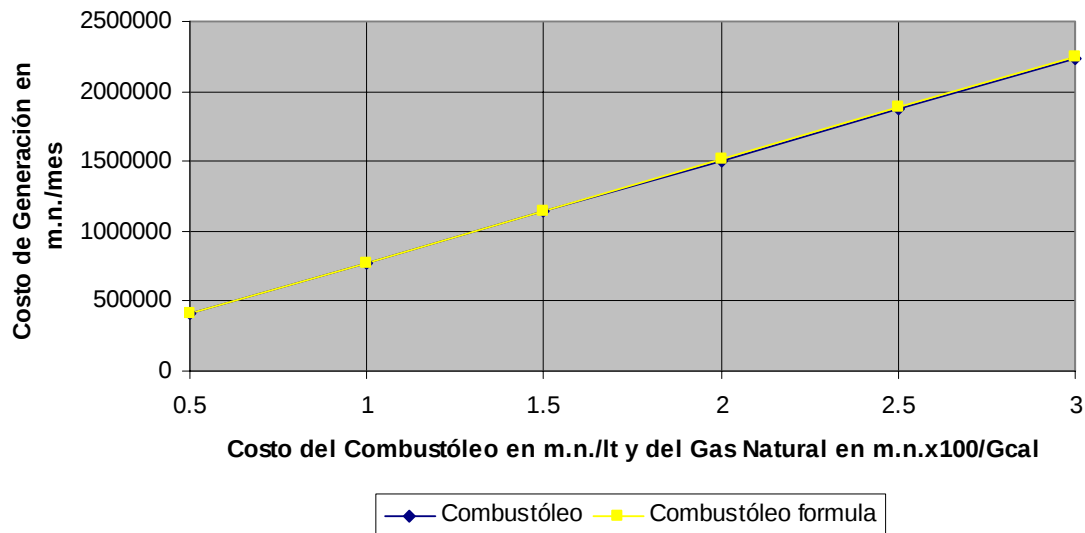


Fig. 4.7.- Costo de generación de vapor con combustóleo.

La fig. 4.8 corresponde a la tabla 4.2 y se observa que el costo de generación es muy similar al utilizar el programa o la fórmula de *generación calorífica*, sin embargo en la tabla 4.2 se aprecia que es menor el costo de generación resultante al utilizar la fórmula que con el programa, esto se debe principalmente a que en la determinación de la cantidad de gas natural a utilizar para la generación del vapor a través de la fórmula se parte del consumo de combustóleo, y al tener esté una eficiencia mayor se espera que el consumo de gas natural sea menor.

Tabla 4.2.- Comparación costo de generación de vapor para gas natural.

Costo gas natural (m.n./Gcal)	50	100	150	200	250	300
Costo generación simulador (m.n./mes)	404716	809432	1214148	1618864	2023580	2428296
Costo generación formula (m.n./mes)	403000	806000	1209000	1612000	2015000	2418000

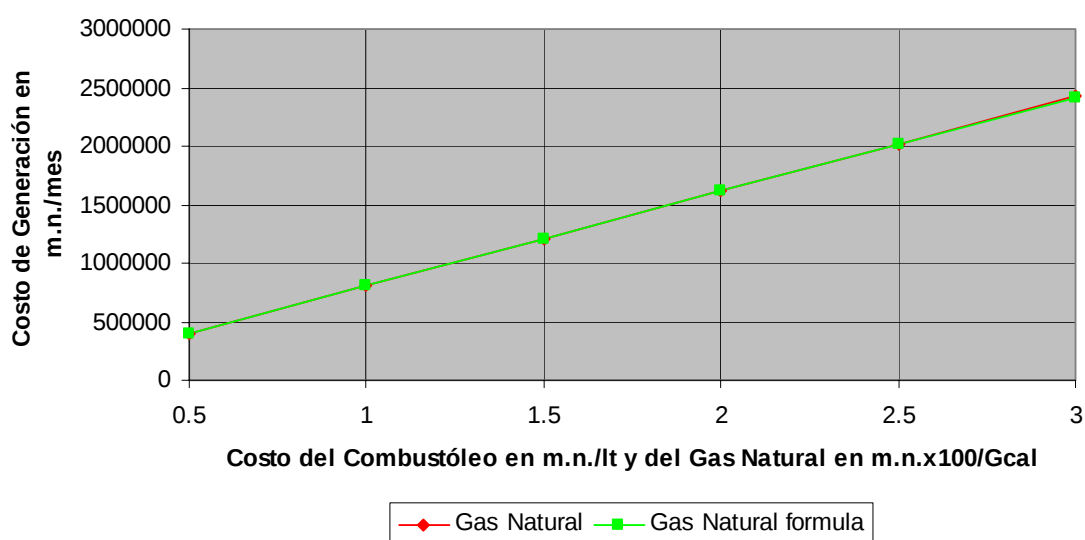


Fig. 4.8.- Costo de generación de vapor con gas natural.

En las figuras 4.9, 4.12, 4.15 y 4.18 se presentan los consumos de combustóleo y en las figuras 4.10, 4.13, 4.16 y 4.19 los del gas natural, todas ellas para una generación de 10'897,709 kg/mes de vapor saturado a 1,310 kPa. Así mismo en las figuras 4.11, 4.13, 4.17 y 4.20 las eficiencias al utilizar estos combustibles.

Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran los consumos mensuales del combustóleo y gas natural, así como la eficiencia de estos con respecto al incremento del exceso de aire respectivamente. En la fig. 4.9 se puede apreciar que existe un incremento en el consumo de combustóleo de 1.1% por cada 10% de incremento en el exceso de aire, mientras que

para el gas natural el incremento es del 1.4% (ver fig. 4.10). Las eficiencias de ambos combustibles se presentan en la fig. 4.11 y se deduce que existe una disminución del 0.9 y 1.03% para el combustóleo y el gas natural respectivamente para los mismos incrementos de exceso de aire. Lo anterior se debe a que al incrementar el exceso de aire se aumenta la cantidad de masa de aire existente en el proceso de combustión, misma que se debe llevar hasta la temperatura de combustión, necesitando para ello más energía, que es tomada de la energía liberada por el combustible.

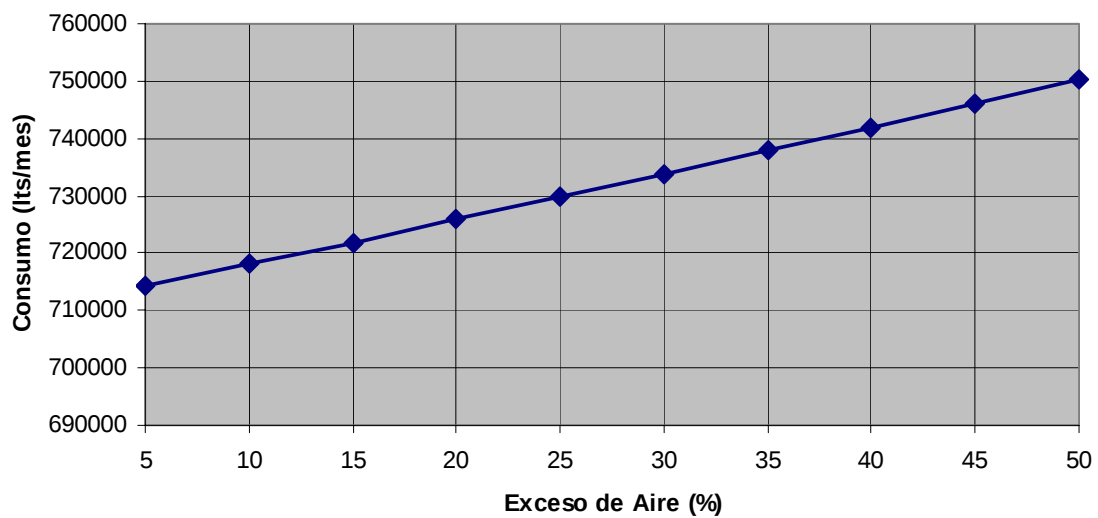


Fig. 4.9.- Consumo de combustóleo vs exceso de aire.

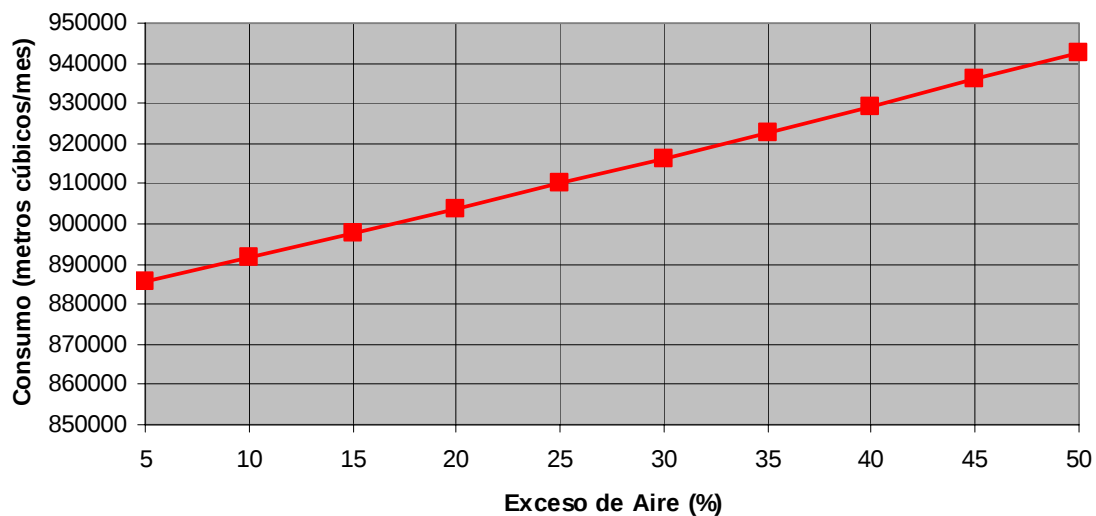


Fig. 4.10.- Consumo de gas natural vs exceso de aire.

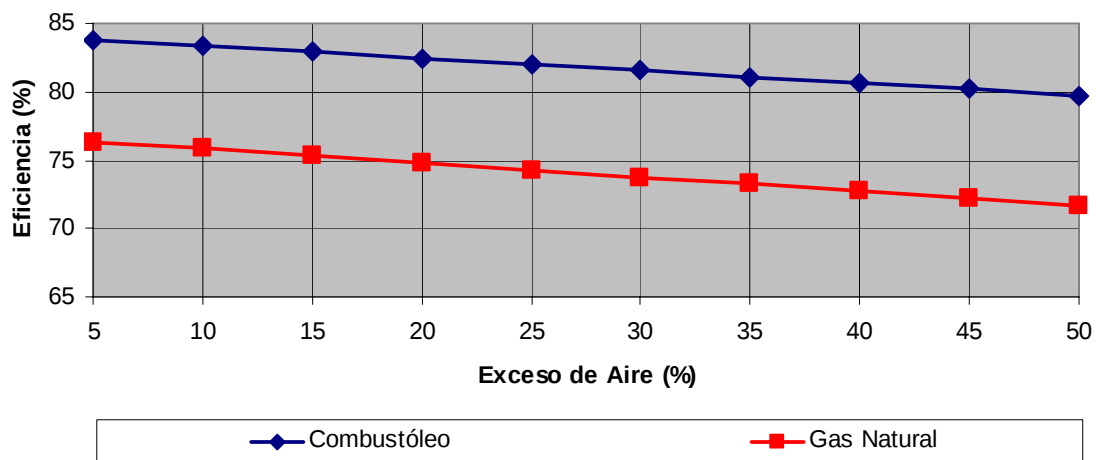


Fig. 4.11.- Eficiencia vs exceso de aire

Las figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran los consumos mensuales del combustóleo y gas natural, así como la eficiencia de estos con respecto al incremento en la temperatura de los gases de combustión en la chimenea respectivamente. En la fig. 4.12 se puede apreciar que existe un incremento en el consumo de combustóleo de aproximadamente 1.25% por cada 20°C de incremento en la temperatura de los gases de combustión a la

salida de la chimenea, mientras que para el gas natural el incremento es del 1.4% (ver fig. 4.13). Las eficiencias de ambos combustibles se presentan en la fig. 4.14 y se observa que existe una disminución de aproximadamente el 1% para el combustóleo y el gas natural respectivamente por cada 20°C de incremento en la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, concordando con la “regla de dedo” que dice que se puede incrementar 1% la eficiencia por cada reducción de 22°C de los gases en la chimenea [Plauchú, 1995]. Este incremento en el consumo del combustible y por ende una disminución en la eficiencia se debe a que al salir los gases de combustión más calientes aportando la misma cantidad de energía al vapor, llevan consigo más energía, misma que fue suministrada por el combustible.

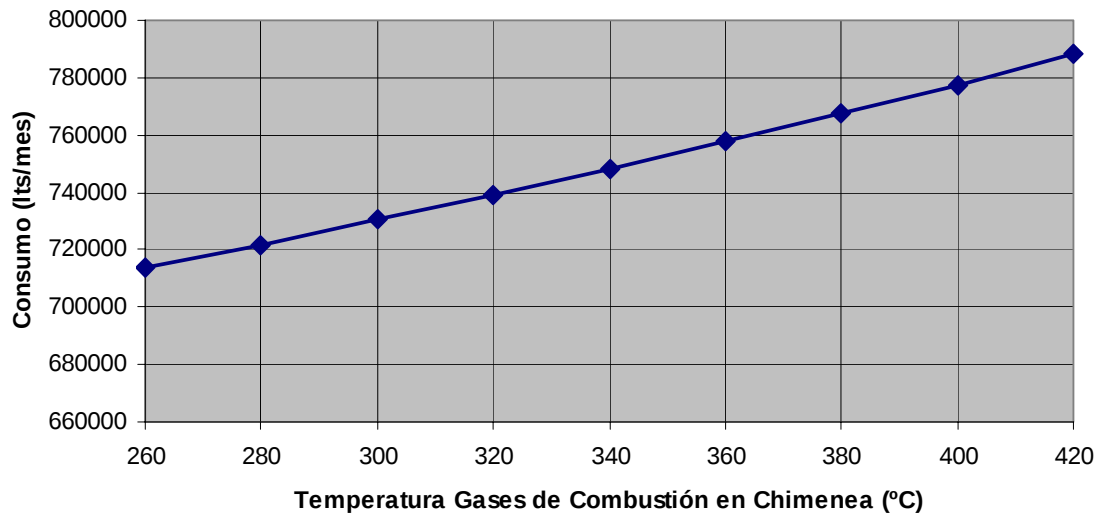


Fig. 4.12 Consumo de combustóleo vs temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

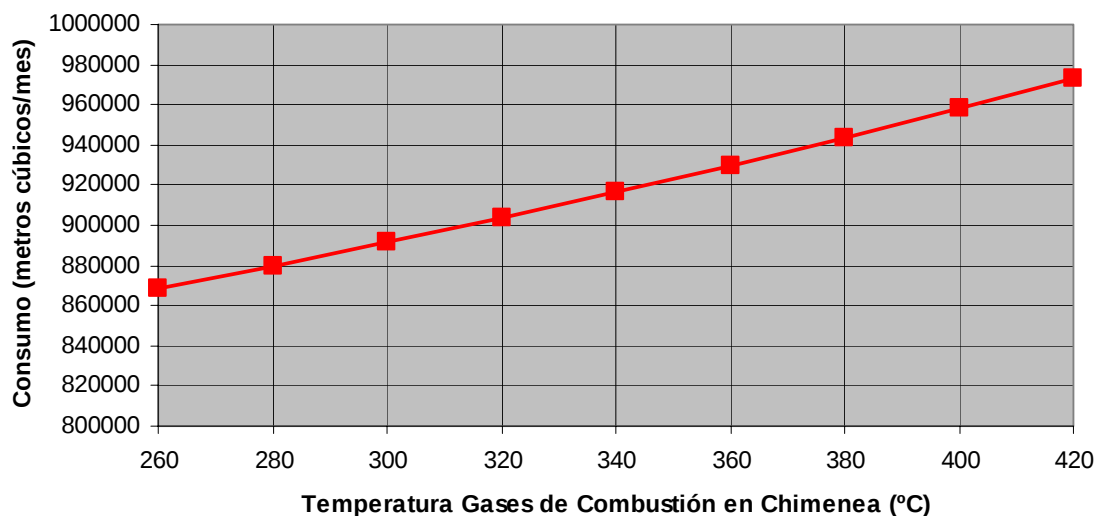


Fig. 4.13.- Consumo de gas natural vs temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

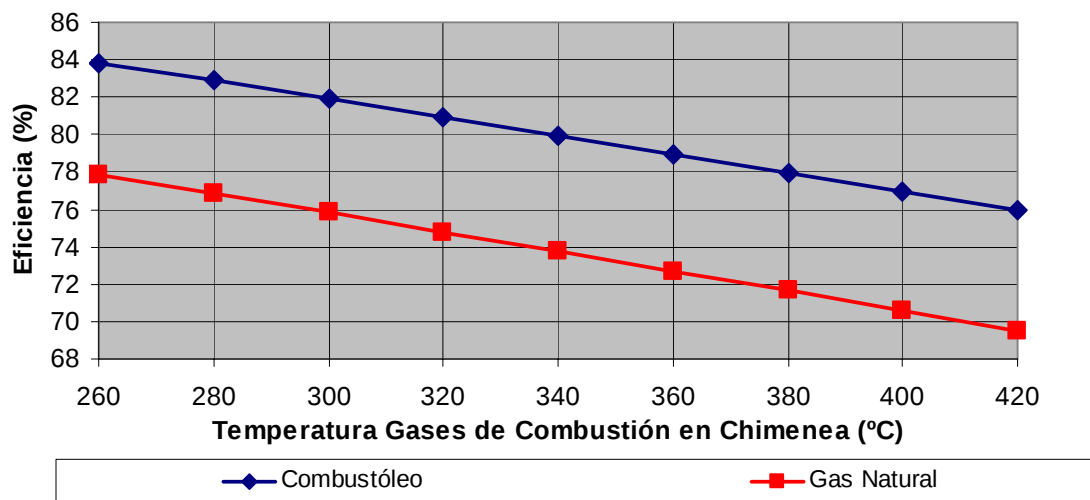


Fig. 4.14.- Eficiencia vs temperatura de los gases de combustión en la chimenea.

Las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 muestran los consumos mensuales del combustóleo y gas natural, así como la eficiencia de estos con respecto a la variación de la temperatura del agua de alimentación a la caldera respectivamente. En las figuras 4.15 y 4.16 se puede

apreciar que existe un decremento en el consumo de combustóleo y gas natural del 1.75% por cada 10°C de incremento en la temperatura del agua de alimentación a la caldera. Las eficiencias de ambos combustibles se presentan en la fig. 4.17 y se observa que tanto para el combustóleo como para el gas natural prácticamente permanecen igual. Se estima que por cada 6°C de incremento en la temperatura del agua de alimentación se obtiene un incremento del 1% en la eficiencia [Plauchú, 1995], sin embargo ese incremento está determinado por la instalación de un economizador lo que sugiere que existe una disminución de la temperatura en la chimenea, y para el caso que nos ocupa ese incremento se lleva a cabo en el deareador y no en el economizador por lo que para el cálculo no se está considerando la disminución a la que se hace referencia, por lo tanto, pudieramos decir que al incrementar la temperatura en el agua de alimentación (no siendo esta en el economizador) no se obtiene un incremento en la eficiencia, sin embargo si se obtiene un ahorro en el consumo de combustible debido a que existe una diferencia menor entre la entalpia del vapor a la salida de la caldera y la entalpia del agua al ingresar a la misma. El hecho de que la eficiencia no se altere se debe a que al incrementar la temperatura se disminuye el combustible utilizado, pero se aumenta la entalpia del agua de alimentación, lo que hace que la eficiencia prácticamente no se altere.

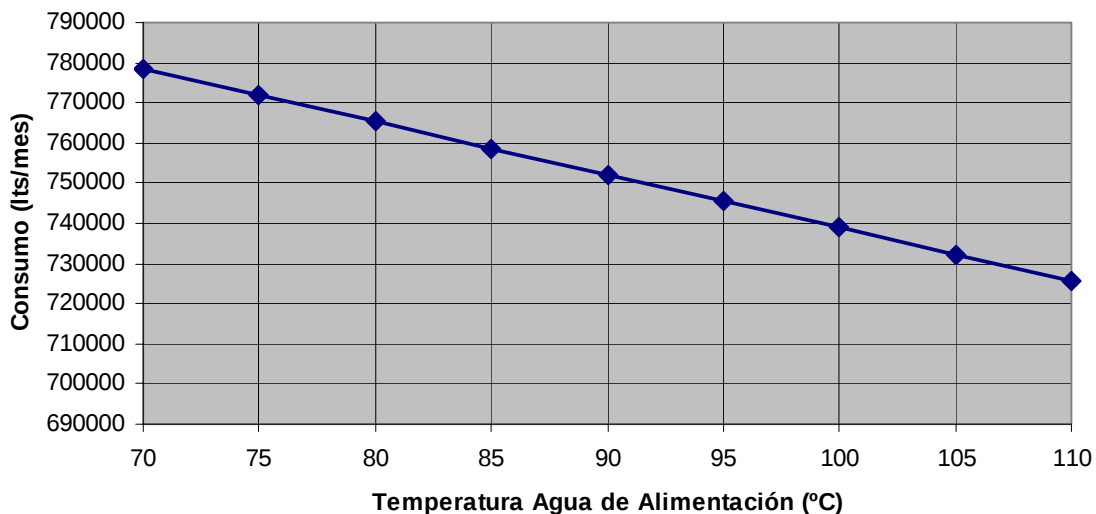


Fig. 4.15.- Consumo de combustóleo vs temperatura agua de alimentación.

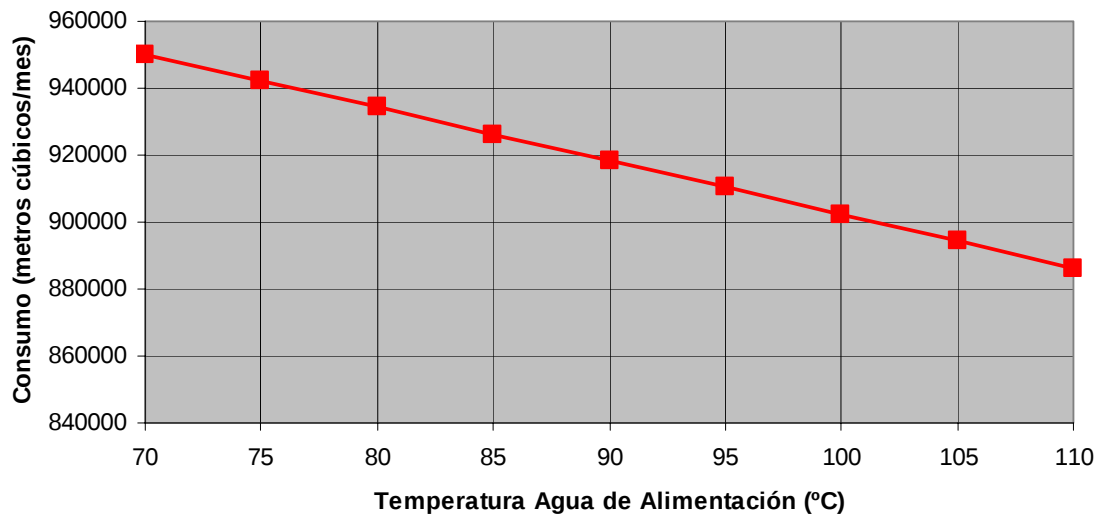


Fig. 4.16.- Consumo de gas natural vs temperatura agua de alimentación.

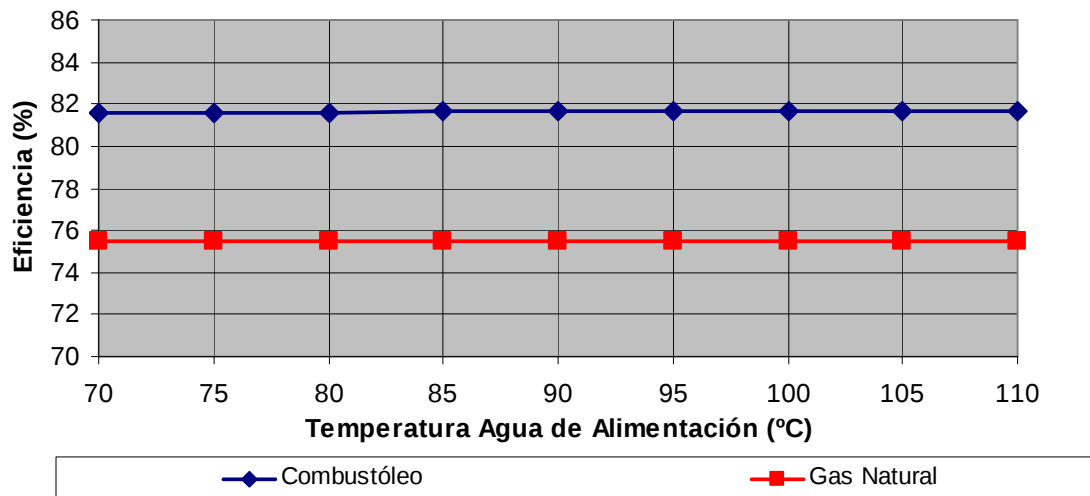


Fig. 4.17.- Eficiencia vs temperatura agua de alimentación.

Las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 muestran los consumos mensuales del combustóleo y gas natural, así como la eficiencia de estos con respecto al incremento en la temperatura ambiente respectivamente. En la fig. 4.18 se puede apreciar que existe una disminución en el consumo de combustóleo de 0.8% por cada 10°C de incremento en la temperatura ambiente, mientras que para el gas natural el decremento es del 0.6% (ver fig. 4.19). Las

eficiencias de ambos combustibles se presentan en la gráfica 20 y se observa que existe una disminución de aproximadamente el 0.7 y 0.5% para el combustóleo y el gas natural respectivamente por cada 20°C de incremento en la temperatura ambiente. Cabe aclarar que para los cálculos realizados se supuso una temperatura en el cuarto de calderas superior en 5°C con respecto a la temperatura ambiental. En el caso del combustóleo este decremento se debe principalmente a que se requiere menos vapor para precalentar el combustóleo y al incremento en la temperatura del aire para la combustión y en el caso del gas natural únicamente se debe al incremento en la temperatura del aire para la combustión. El aire en la combustión es llevado primeramente a la temperatura de la misma y cuanto más cercano a ella entre menos energía se requiere agregar a éste, es por ello que en algunas calderas se instalan precalentadores de aire.

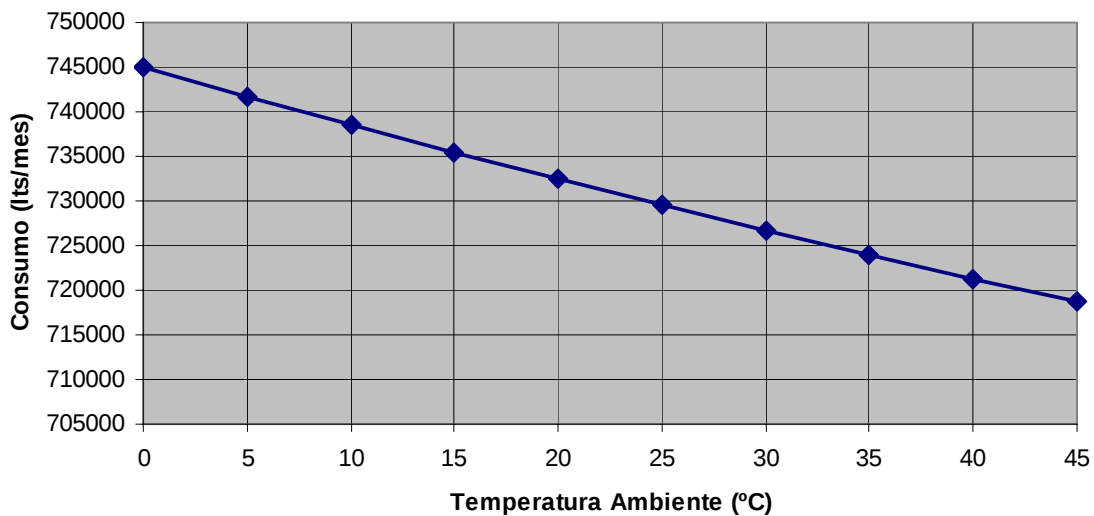


Fig. 4.18.- Consumo de combustóleo vs Temperatura ambiente.

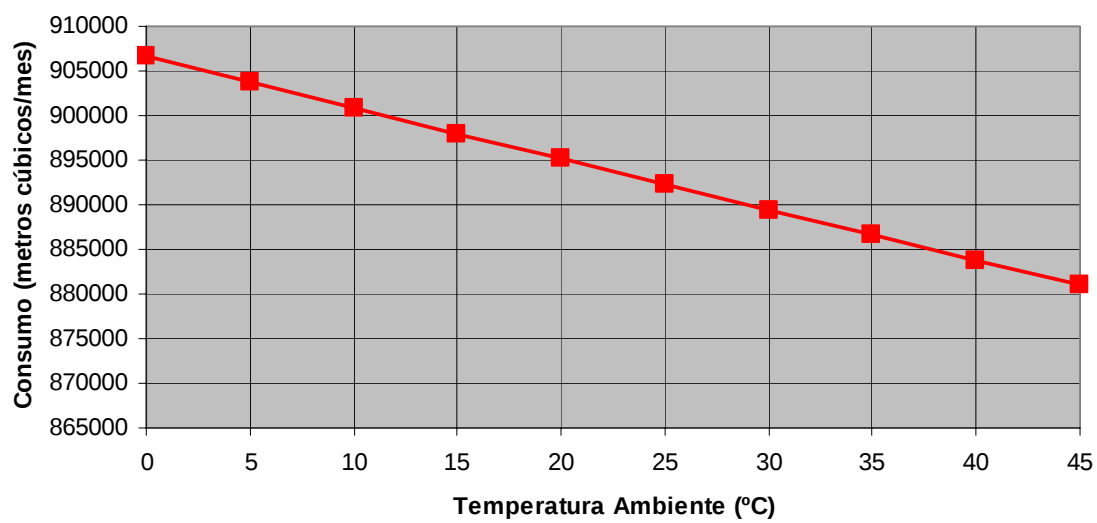


Fig. 4.19.- Consumo gas natural vs temperatura ambiente.

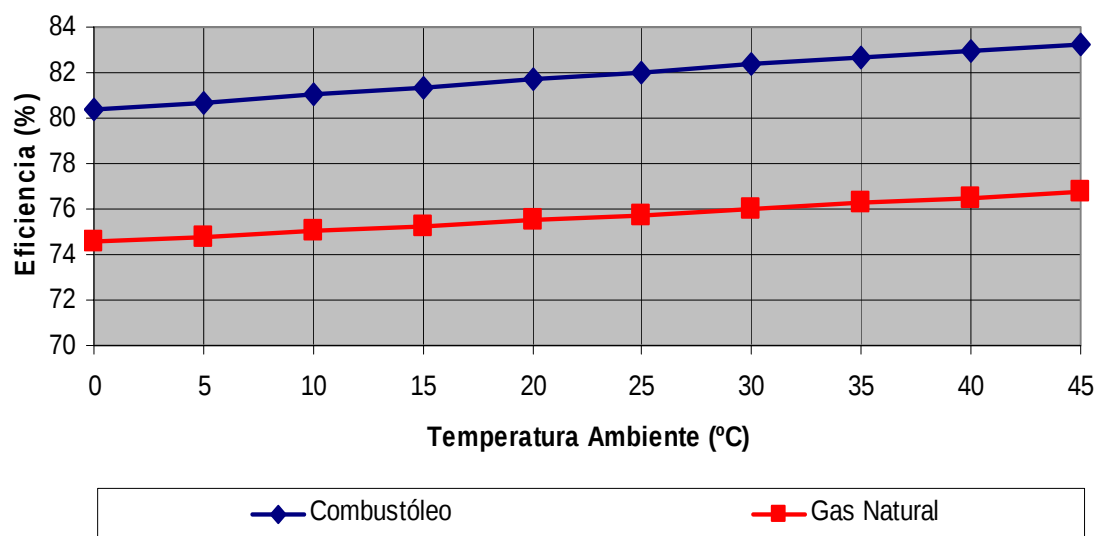


Fig. 4.20.- Eficiencia vs temperatura ambiente.

5 CONCLUSIONES.

Una de las ecuaciones más utilizadas para seleccionar el tipo de combustible más factible a utilizar es *generación calorífica = Consumo de combustible x Poder calorífico inferior del combustible*, sin embargo, el programa desarrollado incorpora las variables más importantes que pueden afectar el consumo del combustible seleccionado.

El programa desarrollado es muy “amigable”, además contiene una serie de variables que en su mayoría están en los reportes generados día a día por el operador siendo éstas las que tienen mayor incidencia en la cantidad de combustible a utilizar para la generación del vapor, haciendo que el programa sea factible de ser utilizado.

El criterio para decidir el combustible a utilizar es básicamente el costo necesario para generar el vapor, y se despliega en la pantalla de resultados el combustible que resulto ser más factible así como los ahorros obtenidos al seleccionarlo, sin embargo el programa únicamente considera algunas de las variables de mayor importancia en el uso del combustible, por lo tanto es preciso señalar algunos comentarios que pudieran, dependiendo del ahorro obtenido cambiar el criterio de decisión del combustible a utilizar, estos son:

- El vapor utilizado en el precalentamiento del combustóleo, en la atomización y en el sopleo es un vapor que no se retorna como condensado, por lo tanto, hay que añadir una mayor cantidad de agua de reposición que con el gas natural, misma que tiene que ser tratada.
- Para el suministro del combustóleo a la caldera se requiere del uso de una bomba, la cual demanda cierta cantidad de energía eléctrica, asimismo para recircular el combustóleo en el tanque (si se requiere) y para la descarga del mismo. Este costo por concepto de energía eléctrica no se obtiene con el uso del gas natural.
- El costo de mantenimiento se espera sea superior al utilizar combustóleo ya que debido a las impurezas del mismo, se forman escorias que se van acumulando, reduciendo el área de paso de los gases, aunado a lo anterior para el manejo del combustóleo se requieren más equipos como bombas, intercambiadores de calor,

válvulas de alivio, reguladores de presión, termómetros, manómetros, trampas de vapor entre otros.

El programa es una herramienta que permite determinar con certeza el combustible más idóneo a utilizar para la generación de vapor en la caldera Babcock & Wilcox de 1500 CC de Fábrica de Papel San Francisco S.A. de C.V. ubicada en su planta molino tissue máquina 1, y es responsabilidad exclusiva del usuario el ingreso de la información solicitada y la decisión del combustible a utilizar, pudiendo ser una consideración que los ahorros obtenidos en el mes de estudio sean inferiores al posible costo generado por el tratamiento del agua y del mantenimiento.

Para el caso del combustóleo es mayor el costo de generación resultante al utilizar la fórmula de generación calorífica que con el programa, caso contrario al gas natural donde es menor el costo de generación resultante al utilizar la fórmula que con el programa, esto era de esperarse pues la fórmula no considera la totalidad de las variables que el programa, siendo la que afecta principalmente estos valores la igualdad de la eficiencia al utilizar la fórmula.

Se ve más afectado el consumo de gas natural que el del combustóleo al incrementar el exceso de aire, siendo éste de 1.4 y 1.1% respectivamente por cada 10% de incremento en el exceso de aire.

Existe una disminución en la eficiencia de aproximadamente el 1% para el combustóleo y el gas natural respectivamente por cada 20°C de incremento en la temperatura de los gases de combustión en la chimenea, concordando con la “regla de dedo” que dice que se puede incrementar 1% la eficiencia por cada reducción de 22°C de los gases en la chimenea.

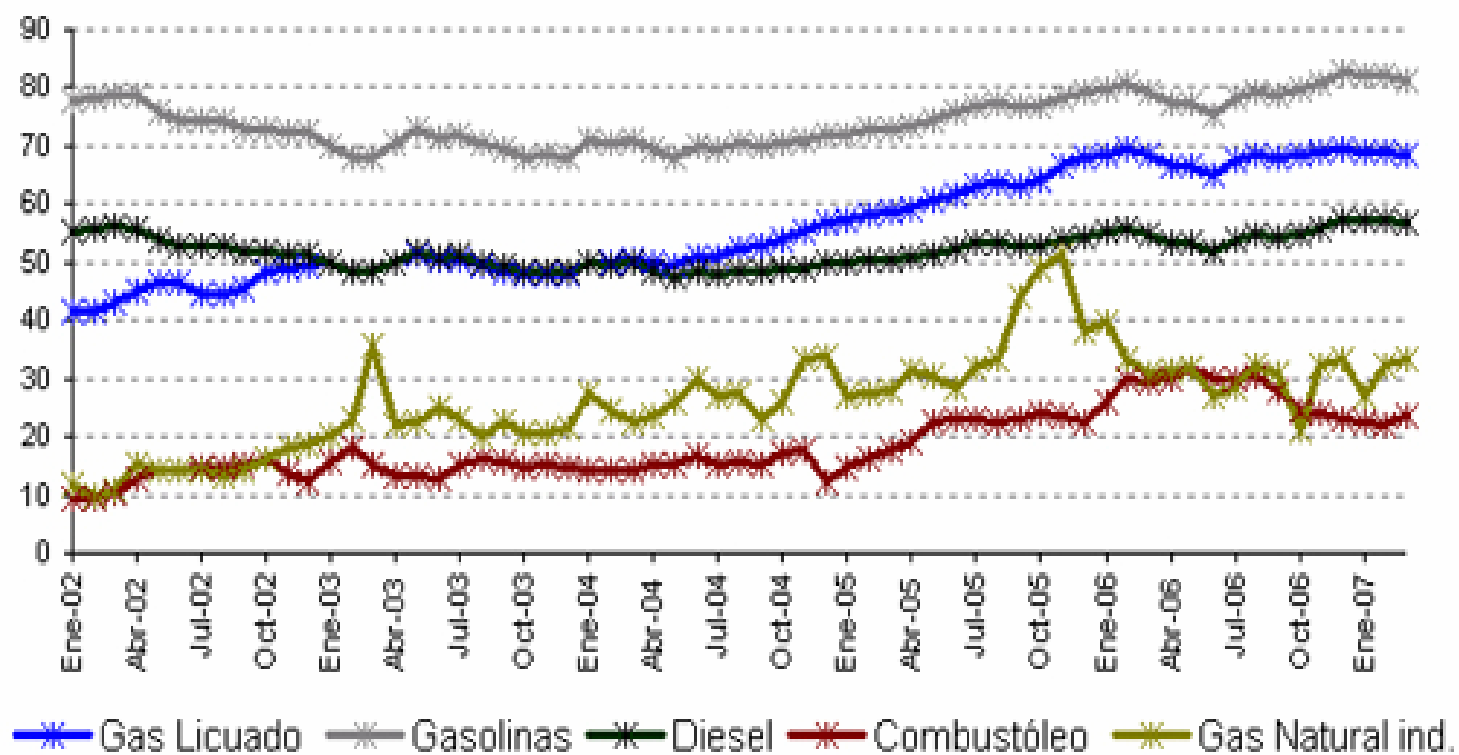
Se tiene una reducción de aproximadamente 1.75% en el consumo de ambos combustibles por cada 10°C de incremento en la temperatura del agua de alimentación.

ANEXOS.

Anexo I	Precios al público de productos petrolíferos y gas natural.
Anexo II	Pérdidas de calor vs exceso de aire para el combustóleo.
Anexo III	Pérdidas de calor vs exceso de aire para el gas natural.
Anexo IV	Calores específicos de hidrocarburos líquidos.
Anexo V	Temperaturas mensuales promedio en Mexicali durante el 2008.
Anexo VI	Velocidades del viento mensuales en Mexicali (2007-2008).
Anexo VII	Listado del programa.

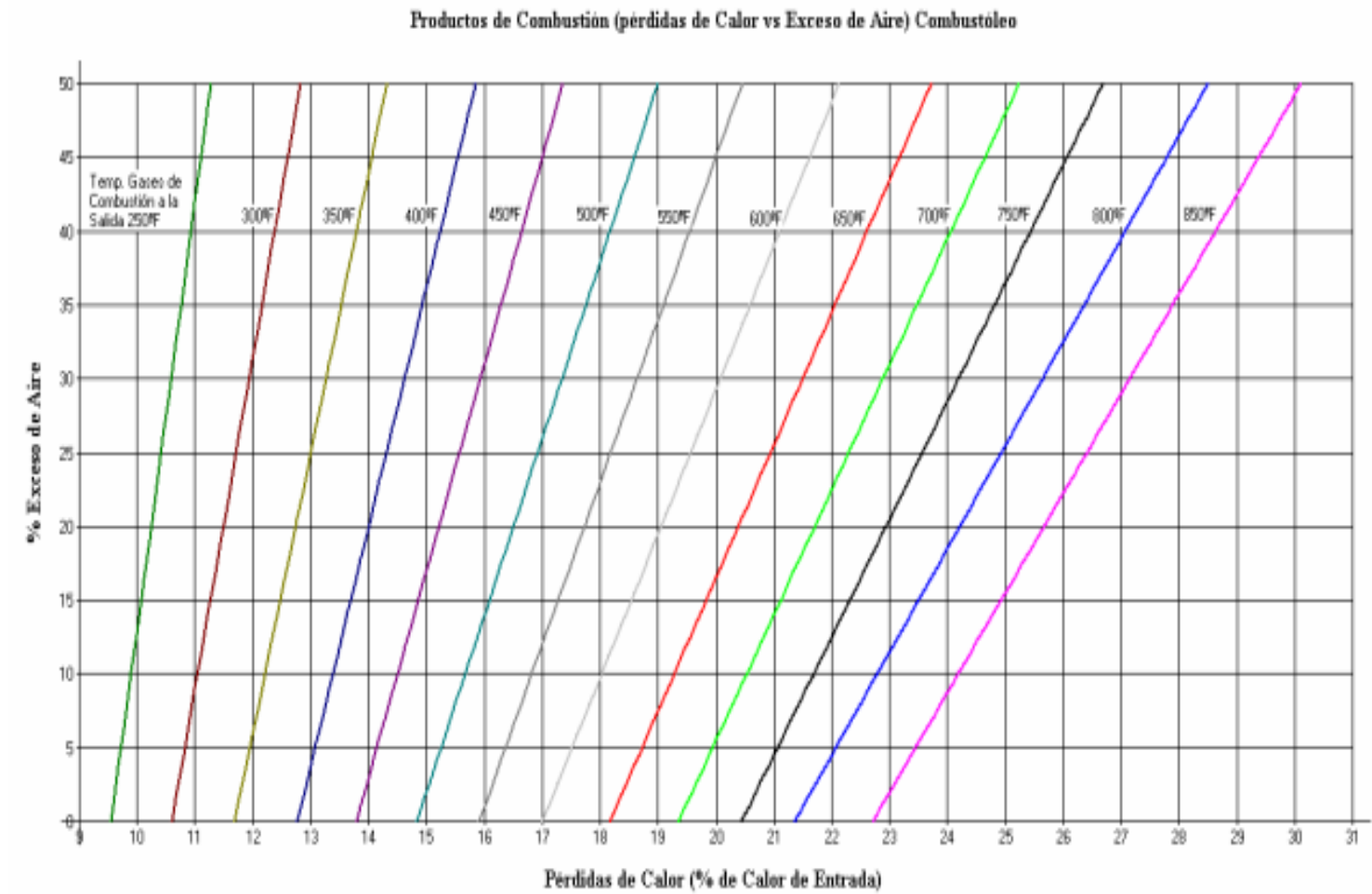
Anexo I

Precios al público de productos petrolíferos y gas natural (dólares/gigacaloría)



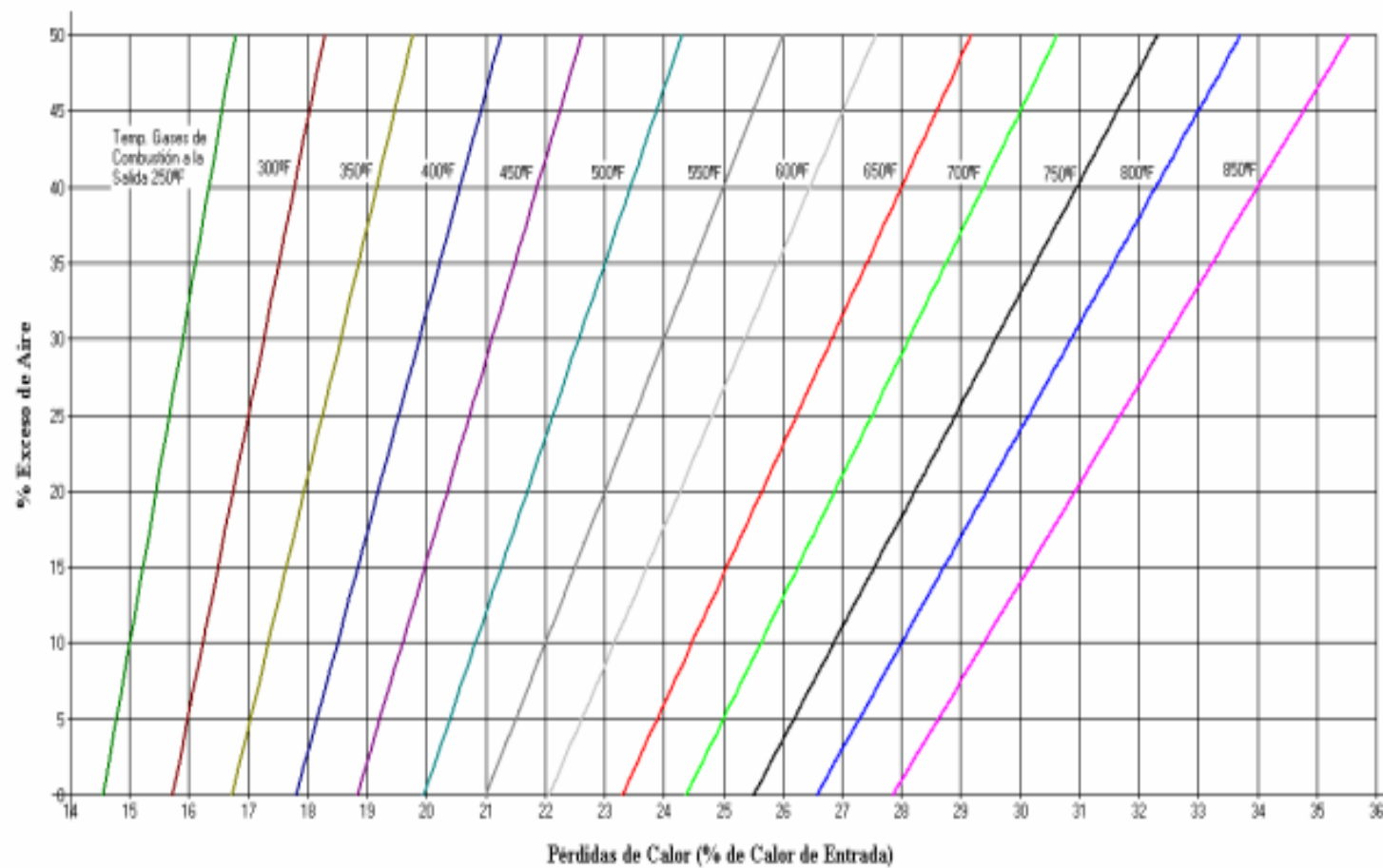
Fuente: CRE con datos de Pemex

Anexo II



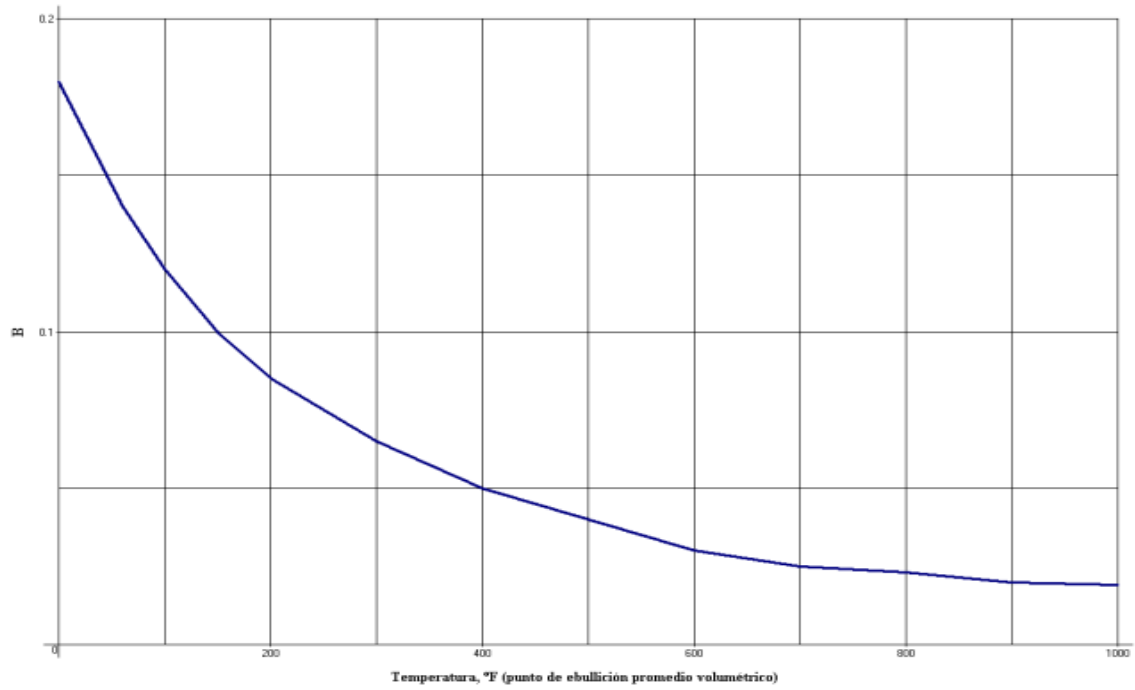
Anexo III

Productos de Combustión (pérdidas de Calor vs Exceso de Aire) Gas Natural

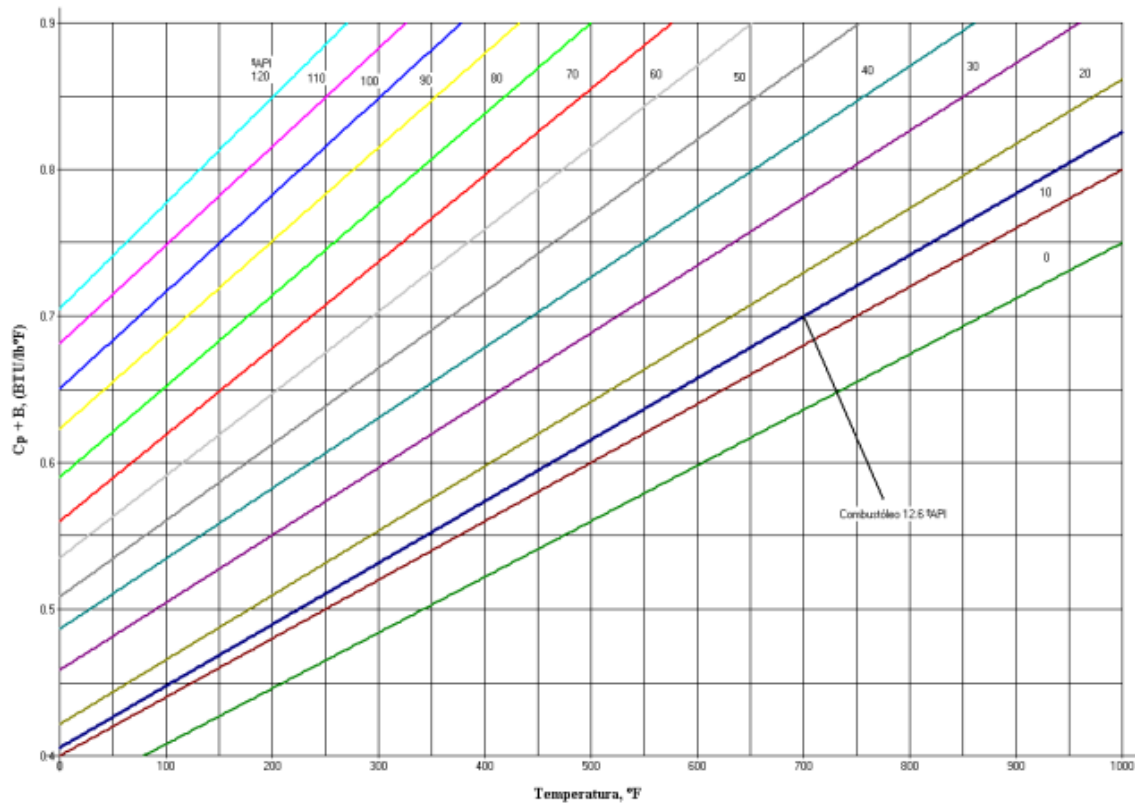


Anexo IV

Determinación de B para el calor específico de hidrocarburos líquidos $C_p = (C_p + B) - B$

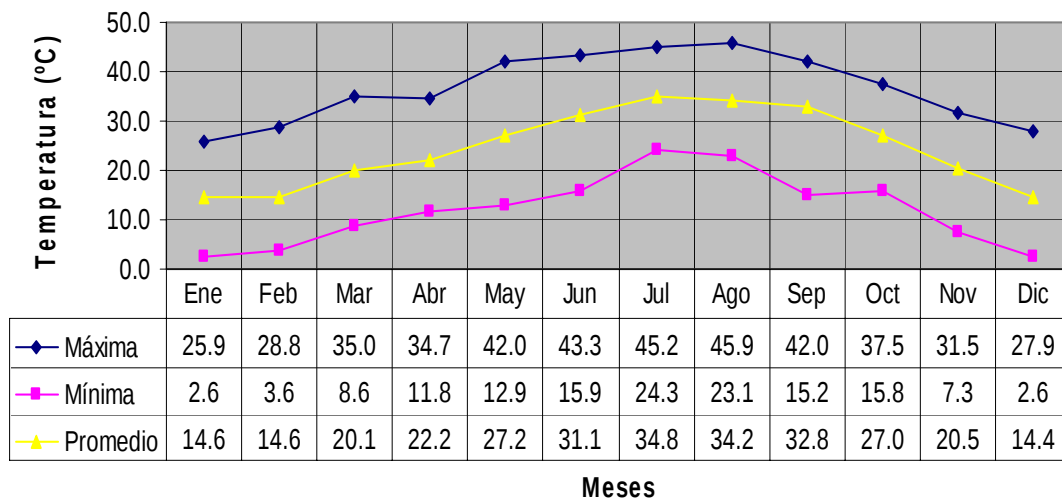


Calores específicos de hidrocarburos líquidos



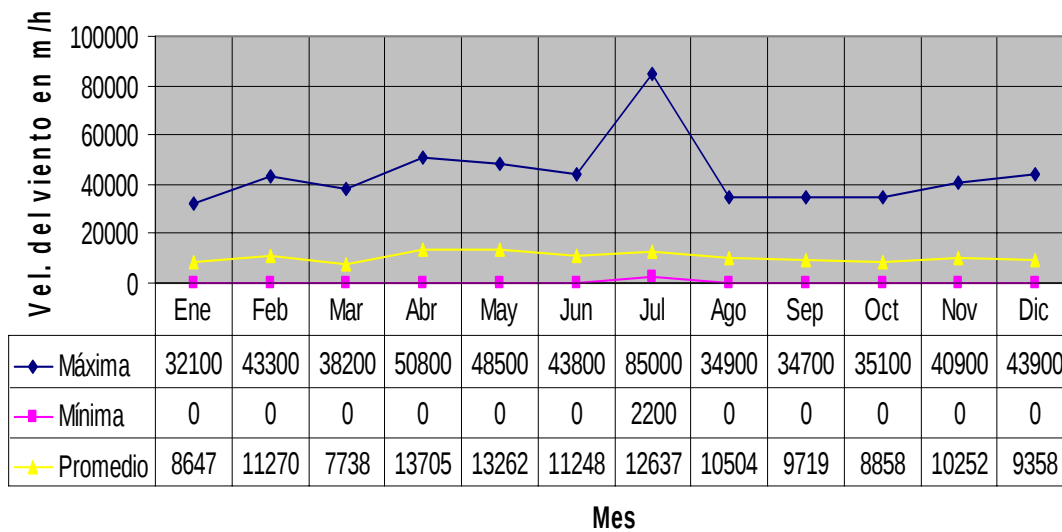
Anexo V

Temperaturas mensuales típicas en Mexicali



Anexo VI

Velocidades del viento mensuales típicas en Mexicali



Anexo VII

Listado del programa.

A continuación se presenta el código del programa, mismo que se desarrollo en C#:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO;
using System.Xml;
using Calderas.Entidades;

namespace Calderas.Vistas
{
    public partial class Datos : Form
    {
        bool validacion = true;

        public Datos()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void btnCalcular_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            if (Alarmas())
            {
```

```
double MOZPC, MNZPC, NPC, TICF, CPTIC, QTIC, ERC, T, CPCOZ,
CPHZO, CPOZ, CPNZ, CPPPC, EPC, PVA, MVA, PTS, MVS, TSUP, CTSUP, HC,
HR, HS, Q, TSC, CTSC, PQTC, P, HV, HVTC, HCTC, MVTC, HVIC, HCIC, TL, HA,
TCTF;
```

```
double QGC, CPTCT;
```

```
double QTCT, MVIC, MOZPM, MNZPM, NPM, CPPPM, EPM, MOZPE,
MNZPE, NPE;
```

```
double EPE, MOZPP, MNZPP, NPP, CPPPP, EPP, QGG = 0.0, CC, CGN,
CTC, CTG, EFC, EFG, RC1, RG;
```

```
double CPPPE, CCM, AH;
```

```
// COMBUSTOLEO
```

```
// DETERMINACION DEL CALOR GENERADO
```

```
MOZPC = (33 * (1 + (double.Parse(txteac.Text) / 100))) - 33;
```

```
MNZPC = (124.08 * (1 + (double.Parse(txteac.Text) / 100))); // preguntar
```

```
NPC = 26 + 14 + MOZPC + MNZPC;
```

```
TICF = (double.Parse(txttic.Text) * 1.8) + 32;
```

```
CPTIC = ((0.371128 + (0.000517742 * TICF)) * 0.91) * 4.1868;
```

```
QTIC = CPTIC * (double.Parse(txttic.Text) + 273.15);
```

```
ERC = QTIC - 466.87;
```

T = (double.Parse(txttch.Text) + 273.15);

CPCOZ = 22.26 + (((5.981 * 1E-2) * T) + ((-3.501 * 1E-5) * (Math.Pow(T, 2)))) + ((7.469 * 1E-9) * (Math.Pow(T, 3)));

CPHZO = 32.24 + ((0.1923 * 1E-2) * T) + ((1.055 * 1E-5) * (Math.Pow(T, 2))) + ((-3.595 * 1E-9) * (Math.Pow(T, 3)));

CPOZ = 25.48 + ((1.52 * 1E-2) * T) + ((-0.7155 * 1E-5) * (Math.Pow(T, 2))) + ((1.312 * 1E-9) * (Math.Pow(T, 3)));

CPNZ = 28.9 + ((-0.1571 * 1E-2) * T) + ((0.8081 * 1E-5) * (Math.Pow(T, 2))) + ((-2.837 * 1E-9) * (Math.Pow(T, 3)));

CPPPC = (1 / NPC) * ((26 * CPCOZ) + (14 * CPHZO) + (MOZPC * CPOZ) + (MNZPC * CPNZ));

//SUMATORIA

EPC = ((NPC * (CPPPC * (double.Parse(txttch.Text) - double.Parse(txttcc.Text)))) / 340);

QGC = double.Parse(txtpcsc.Text) + ERC - EPC - 1811.8718;

//DETERMINACION MASA VAPOR DE ATOMIZACION

PVA = double.Parse(txtpva.Text) / 6.895;

MVA = (((0.0591 * (PVA / 70)) * 3600) / 2.204) * 24;

```
//DETERMINACION MASA VAPOR DE SOPLEO
```

```
PTS = double.Parse(txtpts.Text) / 6.895;
```

```
MVS = (((((4.91 * 1E-2) * (PTS / 70)) * 1080) * double.Parse(txtvs.Text)) *  
double.Parse(txtts.Text)) / 2.204;
```

```
if (double.Parse(txtptvc.Text) == 0 | double.Parse(txttct.Text) ==  
double.Parse(txtta.Text))
```

```
{  
    MVTC = 0;  
}
```

```
else
```

```
{  
    TSUP = double.Parse(txttct.Text) + 273.15;
```

```
    CTSUP = int.Parse(TSUP.ToString("0"));
```

```
    double HC_parcial1 = (1.11 / ((CTSUP + (double.Parse(txtta.Text) +  
273.15)) - 510.44));
```

```
    double HC_parcial2 = (1.8 * (CTSUP - (double.Parse(txtta.Text) +  
273.15)));
```

```
    double HC_parcial3 = (1 + ((7.9366 * 1E-4) * double.Parse(txtvv.Text)));
```

```
    HC = (5.383425 * (Math.Pow(HC_parcial1, 0.181))) *  
(Math.Pow(HC_parcial2, 0.266)) * (Math.Pow(HC_parcial3, 0.5));
```

```
    double HR_parcial1 = Math.Pow((double.Parse(txtta.Text) + 273.15), 4);
```

```
    double HR_parcial2 = Math.Pow(CTSUP, 4);
```

```
    double HR_parcial3 = HR_parcial1 - HR_parcial2;
```

```
//HR = (2.06304 * 1E-9) * (((double.Parse(txtta.Text) + 273.15) ^ 4 -
CTSUP ^ 4) / ((double.Parse(txtta.Text) + 273.15) - CTSUP));
```

```
HR = ((2.06304 * 1E-9) * HR_parcial3) / ((double.Parse(txtta.Text) +
273.15) - CTSUP);
```

```
HS = HC + HR;
```

```
Q = (CTSUP - (double.Parse(txtta.Text) + 273.15)) / (1 / HS);
```

```
TSC = (double.Parse(txtta.Text) + 273.15) + (Q / HS);
```

```
//CTSC = CInt(TSC);
```

```
PQTC = Q * 20153.664;
```

```
P = double.Parse(txtpvtc.Text) / 6.895;
```

```
//HV
```

```
//DETERMINACION DE LA ENTRADA DEL VAPOR
```

```
HV = (-0.14129 * P) + (2.258225 / P) + (3.4014802 * Math.Sqrt(P)) +
(14.438078 * Math.Log(P)) + ((4.222624 * 1E-5) * (Math.Pow(P, 2))) - ((1.569915 * 1E-
8) * (Math.Pow(P, 3))) + 1100.5;
```

```
HVTC = HV * 2.326;
```

```
P = double.Parse(txtpvtc.Text) / 6.895;
```

```
//HA
```

```
//DETERMINACION ENTALPIA DEL AGUA CON PRESION
```

```
HA = (-0.15116567 * P) + (3.671404 / P) + (11.622558 * Math.Sqrt(P)) +  
(30.832667 * Math.Log(P)) + ((8.74117 * 1E-5) * (Math.Pow(P, 2))) + ((2.62306 * 1E-8)  
* (Math.Pow(P, 3))) + 54.55;
```

```
HCTC = HA * 2.326;
```

```
MVTC = PQTC / (HVTC - HCTC);
```

```
}
```

```
//DETERMINACION MASA VAPOR CALENTAMIENTO  
COMBUSTOLEO INTERCAMBIADOR CALDERA
```

```
P = double.Parse(txtpvic.Text) / 6.895;
```

```
//HV
```

```
//DETERMINACION DE LA ENTRADA DEL VAPOR
```

```
HV = (-0.14129 * P) + (2.258225 / P) + (3.4014802 * Math.Sqrt(P)) +  
(14.438078 * Math.Log(P)) + ((4.222624 * 1E-5) * (Math.Pow(P, 2))) - ((1.569915 * 1E-  
8) * (Math.Pow(P, 3))) + 1100.5;
```

```
HVIC = HV * 2.326;
```

```
P = double.Parse(txtpvic.Text) / 6.895;
```

```
//HA
```

```
//DETERMINACION ENTALPIA DEL AGUA CON PRESION
```

```
HA = (-0.15116567 * P) + (3.671404 / P) + (11.622558 * Math.Sqrt(P)) +  
(30.832667 * Math.Log(P)) + ((8.74117 * 1E-5) * (Math.Pow(P, 2))) + ((2.62306 * 1E-8)  
* (Math.Pow(P, 3))) + 54.55;
```

```
HCIC = HA * 2.326;
```

```
P = double.Parse(txtpoc.Text) / 6.895;
```

```
//HV
```

```
//DETERMINACION DE LA ENTRADA DEL VAPOR
```

```
HV = (-0.14129 * P) + (2.258225 / P) + (3.4014802 * Math.Sqrt(P)) +  
(14.438078 * Math.Log(P)) + ((4.222624 * 1E-5) * (Math.Pow(P, 2))) - ((1.569915 * 1E-  
8) * (Math.Pow(P, 3))) + 1100.5;
```

```
double HV1 = HV * 2.326;
```

```
TL = double.Parse(txttaa.Text) + 273.15;
```

```
//HAA
```

```
//DETERMINACION ENTALPIA DEL AGUA CON TEMPERATURA
```

```
double HAA = 1522.115 + (2.703302 * TL) - ((2.345981 * 1E-3) *  
Math.Pow(TL, 2)) - (107.8168 * Math.Sqrt(647.3 - TL)) - ((3.266117 * 1E-6) *  
(Math.Pow(1.026, TL)));
```

HA = HAA;

//FORMULAS NUEVAS

TICF = (double.Parse(txttic.Text) * 1.8) + 32;

TCTF = (double.Parse(txttct.Text) * 1.8) + 32;

CPTIC = (((0.371128 + (0.000517742 * TICF)) * 0.91) * 4.1868);

CPTCT = (((0.371128 + (0.000517742 * TCTF)) * 0.91) * 4.1868);

QTIC = CPTIC * (double.Parse(txttic.Text) + 273.15);

QTCT = CPTCT * (double.Parse(txttct.Text) + 273.15);

MVIC = ((((((double.Parse(txtw.Text) / double.Parse(txthm.Text)) + MVA +
MVS + MVTC) * (HV1 - HA)) / QGC) * (QTIC - QTCT)) / (HVIC - HCIC);

//GAS NATURAL

//DETERMINACION DEL CALOR GENERADO

MOZPM = (2 * (1 + (double.Parse(txteag.Text) / 100))) - 2;

MNZPM = (7.52 * (1 + (double.Parse(txteag.Text) / 100)));

NPM = 1 + 2 + MOZPM + MNZPM;

CPPPM = (1 / NPM) * (CPCOZ + 2 * (CPHZO) + (MOZPM * (CPOZ)) +
(MNZPM * (CPNZ)));

$$\text{EPM} = ((\text{NPM} * \text{CPPPM} * (\text{double.Parse}(\text{txttch.Text}) - \text{double.Parse}(\text{txttcc.Text}))) / 16);$$

$$\text{MOZPE} = (3.5 * (1 + (\text{double.Parse}(\text{txteag.Text}) / 100))) - 3.5;$$

$$\text{MNZPE} = (13.16 * (1 + (\text{double.Parse}(\text{txteag.Text}) / 100)));$$

$$\text{NPE} = 2 + 3 + \text{MOZPE} + \text{MNZPE};$$

$$\text{CPPPE} = (1 / \text{NPE}) * ((2 * \text{CPCOZ}) + (3 * \text{CPHZO}) + (\text{MOZPE} * \text{CPOZ}) + (\text{MNZPE} * \text{CPNZ}));$$

$$\text{EPE} = ((\text{NPE} * (\text{CPPPE} * (\text{double.Parse}(\text{txttch.Text}) - \text{double.Parse}(\text{txttcc.Text})))) / 30);$$

$$\text{MOZPP} = (5 * (1 + (\text{double.Parse}(\text{txteag.Text}) / 100))) - 5;$$

$$\text{MNZPP} = (18.8 * (1 + (\text{double.Parse}(\text{txteag.Text}) / 100)));$$

$$\text{NPP} = 3 + 4 + \text{MOZPP} + \text{MNZPP};$$

$$\text{CPPPP} = (1 / \text{NPP}) * ((3 * \text{CPCOZ}) + (4 * \text{CPHZO}) + (\text{MOZPP} * \text{CPOZ}) + (\text{MNZPP} * \text{CPNZ}));$$

$$\text{EPP} = (\text{NPP} * (\text{CPPPP} * (\text{double.Parse}(\text{txttch.Text}) - \text{double.Parse}(\text{txttcc.Text})))) / 44;$$

$$\text{QGG} = (((\text{double.Parse}(\text{txtfc.Text}) * 4186800) / 0.81) - ((0.856 * \text{EPM}) + (0.078 * \text{EPE}) + (0.014 * \text{EPP})) - 5109.190559);$$

//DETERMINACION CONSUMO DE COMBUSTIBLE

//COMBUSTOLEO

$$CC = (((double.Parse(txtw.Text) / double.Parse(txthm.Text)) + MVA + MVS + MVTC + MVIC) * (HV1 - HA)) / QGC) / 0.982;$$

$$CCM = CC * double.Parse(txthm.Text);$$

//GAS NATURAL

$$CGN = (((double.Parse(txtw.Text) * (HV1 - HA)) / QGG) / 0.81);$$

//DETERMINACION DE COSTOS

//COMBUSTOLEO

$$CTC = (CCM * double.Parse(txtpc.Text)) + ((CCM * double.Parse(txtra.Text)) * double.Parse(txtpa.Text));$$

//GAS NATURAL

$$CTG = CGN * double.Parse(txtfc.Text) * double.Parse(txtpg.Text);$$

//DETERMINACION EFICIENCIA

//COMBUSTOLEO

$$EFC = ((double.Parse(txtw.Text) * (HV1 - HA)) / (CCM * 0.982 * double.Parse(txtpcsc.Text))) * 100;$$

```
//GAS NATURAL
```

```
EFG = ((double.Parse(txtw.Text) * (HV1 - HA)) / (CGN *  
double.Parse(txtfc.Text) * 4186800)) * 100;
```

```
//INDICADORES
```

```
//COMBUSTOLEO
```

```
RC1 = double.Parse(txtw.Text) / CCM;
```

```
//GAS NATURAL
```

```
RG = double.Parse(txtw.Text) / CGN;
```

```
//DETERMINACION DEL AHORRO MENSUAL
```

```
AH = CTC - CTG;
```

```
if (AH < 0)
```

```
    AH = AH * -1;
```

```
DatosGenerales datosGenerales = new DatosGenerales();  
datosGenerales.Mes = cmbMeses.SelectedItem.ToString();  
datosGenerales.Año = int.Parse(txtAño.Text);  
datosGenerales.Poc = double.Parse(txtpoc.Text);  
datosGenerales.W = double.Parse(txtw.Text);  
datosGenerales.Hm = double.Parse(txthm.Text);  
datosGenerales.Tch = double.Parse(txttch.Text);
```

```

datosGenerales.Ta = double.Parse(txtta.Text);
datosGenerales.Tcc = double.Parse(txttcc.Text);
datosGenerales.Vv = double.Parse(txtvv.Text);
datosGenerales.Taa = double.Parse(txttaa.Text);
datosGenerales.Tic = double.Parse(txttic.Text);
datosGenerales.Tct = double.Parse(txttct.Text);
datosGenerales.Pvtc = double.Parse(txtpvtc.Text);
datosGenerales.Ps = double.Parse(txttps.Text);
datosGenerales.Vs = double.Parse(txtvs.Text);
datosGenerales.Ts = double.Parse(txtts.Text);
datosGenerales.Pvic = double.Parse(txtpvic.Text);
datosGenerales.Pva = double.Parse(txtpva.Text);

```

```

DatosCombustoleo datosCombustoleo = new DatosCombustoleo();
datosCombustoleo.Pc = double.Parse(txtpc.Text);
datosCombustoleo.Ra = double.Parse(txtra.Text);
datosCombustoleo.Pa = double.Parse(txtpa.Text);
datosCombustoleo.Eac = double.Parse(txteac.Text);
datosCombustoleo.Pcsc = double.Parse(txtpcsc.Text);

```

```

DatosGasNatural datosGasNatural = new DatosGasNatural();
datosGasNatural.Pg = double.Parse(txtpg.Text);
datosGasNatural.Fc = double.Parse(txtfc.Text);
datosGasNatural.Eag = double.Parse(txteag.Text);

```

```

DatosResultados datosResultados = new DatosResultados();
datosResultados.Ccm = CCM;
datosResultados.Ctc = CTC;
datosResultados.Efc = EFC;
datosResultados.Rc1 = RC1;
datosResultados.Cgn = CGN;

```

```

        datosResultados.Ctg = CTG;
        datosResultados.Efg = EFG;
        datosResultados.Rg = RG;
        datosResultados.Ah = AH;

        Resultados resultados = new Resultados(datosGenerales, datosCombustoleo,
datosGasNatural, datosResultados);
        resultados.ShowDialog();
    }

}

private bool Alarmas()
{
    validacion = true;
    // -----
    Validar(cmbMeses, "Mes");
    Validar(txtAño, "Año");
    // -----
    Validar(txtpoc, "Presion de operacion caldera");
    Validar(txtw, "Generacion de vapor");
    Validar(txthm, "Dias de operacion");
    Validar(txttch, "Temperatura de chimenea");
    Validar(txтта, "Temperatura ambiente");
    Validar(txttcc, "Temperatura cuarto de calderas");
    Validar(txtvv, "Velocidad del viento");
    Validar(txttaa, "Temperatura agua de alimentacion");
    Validar(txttic, "Temperatura combustoleo intercambiador caldera");
    Validar(txttct, "Temperatura tanque combustoleo");
    Validar(txtpvtc, "Presion vapor tanque combustoleo");
    Validar(txtps, "Presion sopleo");

```

```

Validar(txtvs, "Numero de veces que se realiza el sopleo al dis");
Validar(txtts, "Tiempo de duracion del sopleo");
Validar(txtpvic, "Presion de vapor intercambiador caldera");
Validar(txtpva, "Presion de vapor atomizacion");
// -----
Validar(txtpc, "Precio del combustoleo");
Validar(txtra, "Razon de aditivo");
Validar(txtpa, "Presion de aditivo");
Validar(txteac, "Exceso de aire combustoleo");
Validar(txtpcsc, "El poder calorifico del combustoleo");
// -----
Validar(txtpg, "Precio del gas natural");
Validar(txtfc, "Factor de conversion");
Validar(txteag, "Exceso de aire gas natural");
// -----
Validar(txtpoc, "LA PRESION DE VAPOR", 100, "<=");
Validar(txtw, "LA GENERACION DE VAPOR", 100000, "<=");
Validar(txthm, "LOS DIAS DE OPERACION", 0, "<=");
Validar(txttch, "LA TEMPERATURA EN LA CHIMENEA", 100, "<=");
if (txtta.Text.Length > 0)
    Validar(txttcc, "TEMPERATURA DEL CUARTO CALDERAS",
double.Parse(txtta.Text), "<=");
    Validar(txtvv, "LA VELOCIDAD DEL VIENTO", 0, "<");
    Validar(txttaa, "LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACION ", 0,
"<=");

Validar(txttic, "La temperatura del combustoleo en el intercambiador caldera", 40,
"<=");
if (txttic.Text.Length > 0)
    Validar(txttct, "La temperatura del combustoleo en el tanque de
almacenamiento", double.Parse(txttic.Text), ">");

```

```

Validar(txtptvc, "La presion del vapor en el tanque de combustoleo", 0, "<");
if (txtpoc.Text.Length > 0)
    Validar(txtptvc, "La presion del vapor en el tanque de combustoleo",
double.Parse(txtpoc.Text), ">=");

Validar(txtpts, "La presion del sopleo", 0, "<");
if (txtpoc.Text.Length > 0)
    Validar(txtpts, "La presion del sopleo", double.Parse(txtpoc.Text), ">");

Validar(txtvts, "El numero de veces que se realiza el sopleo", 0, "<");
Validar(txttts, "El tiempo de duracion del sopleo", 0, "<");

Validar(txtpvic, "La presion de vapor intercambiador caldera", 0, "<=");
if (txtpoc.Text.Length > 0)
    Validar(txtpvic, "La presion de vapor intercambiador caldera",
double.Parse(txtpoc.Text), ">=");

Validar(txtpva, "La presion de vapor atomizacion", 0, "<=");
if (txtpoc.Text.Length > 0)
    Validar(txtpva, "La presion de vapor atomizacion", double.Parse(txtpoc.Text),
">");

// -----
Validar(txtpc, "El precio del combustoleo", 0, "<=");
Validar(txtra, "La razon de aditivo", 0, "<");
Validar(txtpta, "El precio del aditivo", 0, "<");
Validar(txteac, "El exceso de aire del combustoleo", 0, "<=");
Validar(txtpcsc, "El poder calorifico del combustoleo", 0, "<=");
// -----
Validar(txtpg, "El precio del gas natural", 0, "<=");
Validar(txtfc, "El factor de conversion del gas natual", 0, "<=");

```

```

        Validar(txteag, "El exceso de aire del gas natural", 0, "<=");
        return validacion;
    }

    private void Validar(TextBox valor, string mensaje)
    {
        if (validacion)
        {
            if (valor.Text.Trim().Length == 0)
            {
                MessageBox.Show("Capture:      "      +      mensaje,      "Atención",
                MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
                validacion = false;
                valor.Focus();
            }
        }
    }

    private void Validar(TextBox valor, string mensaje, double valorMinimo, string
parametro)
    {
        if (validacion)
        {
            if (parametro == "<=")
            {
                if (double.Parse(valor.Text) <= valorMinimo)
                {
                    MessageBox.Show(mensaje + " debe ser mayor a " + valorMinimo,
                    "Atencion", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
                    validacion = false;
                    valor.Focus();
                }
            }
        }
    }

```

```

    }
}
else if (parametro == "<")
{
    if (double.Parse(valor.Text) < valorMinimo)
    {
        MessageBox.Show(mensaje + " debe ser mayor o igual a " +
valorMinimo, "Atencion", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
        validacion = false;
        valor.Focus();
    }
}
else if (parametro == ">")
{
    if (double.Parse(valor.Text) > valorMinimo)
    {
        MessageBox.Show(mensaje + " debe ser menor o igual a " +
valorMinimo, "Atencion", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
        validacion = false;
        valor.Focus();
    }
}
else if (parametro == ">=")
{
    if (double.Parse(valor.Text) >= valorMinimo)
    {
        MessageBox.Show(mensaje + " debe ser menor a " + valorMinimo,
"Atencion", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
        validacion = false;
        valor.Focus();
    }
}

```

```

        }
    }
}

private void Validar(ComboBox valor, string mensaje)
{
    if (validacion)
    {
        if (valor.SelectedItem == null)
        {
            MessageBox.Show("Capture: " + mensaje, "Atención",
                MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Exclamation);
            validacion = false;
            valor.Focus();
        }
    }
}

private void btnSalir_Click(object sender, EventArgs e)
{
    this.Close();
}

private void Datos_Load(object sender, EventArgs e)
{
    LeerDatos();
}

private void LeerDatos()
{
    XmlDocument doc = new XmlDocument();

```

```

try
{
    doc.Load(Environment.CurrentDirectory + "\\Datos.xml");
    foreach (XmlNode mnode in doc.SelectNodes("/Datos"))
    {
        if (mnode["cmbMeses"].InnerText != "")
            cmbMeses.SelectedIndex = int.Parse(mnode["cmbMeses"].InnerText) - 1;
        if (mnode["txtAño"].InnerText != "")
            txtAño.Text = mnode["txtAño"].InnerText;

        if (mnode["txtpoc"].InnerText != "")
            txtpoc.Text = mnode["txtpoc"].InnerText;
        if (mnode["txtw"].InnerText != "")
            txtw.Text = mnode["txtw"].InnerText;
        if (mnode["txthm"].InnerText != "")
            txthm.Text = mnode["txthm"].InnerText;
        if (mnode["txttch"].InnerText != "")
            txttch.Text = mnode["txttch"].InnerText;
        if (mnode["txtta"].InnerText != "")
            txtta.Text = mnode["txtta"].InnerText;
        if (mnode["txttcc"].InnerText != "")
            txttcc.Text = mnode["txttcc"].InnerText;
        if (mnode["txtvv"].InnerText != "")
            txtvv.Text = mnode["txtvv"].InnerText;
        if (mnode["txttaa"].InnerText != "")
            txttaa.Text = mnode["txttaa"].InnerText;
        if (mnode["txttic"].InnerText != "")
            txttic.Text = mnode["txttic"].InnerText;
        if (mnode["txttct"].InnerText != "")
            txttct.Text = mnode["txttct"].InnerText;
        if (mnode["txtpvvc"].InnerText != "")

```

```

        txtptvc.Text = mnode["txtptvc"].InnerText;
    if (mnode["txttps"].InnerText != "")
        txttps.Text = mnode["txttps"].InnerText;
    if (mnode["txtvs"].InnerText != "")
        txtvs.Text = mnode["txtvs"].InnerText;
    if (mnode["txtts"].InnerText != "")
        txtts.Text = mnode["txtts"].InnerText;
    if (mnode["txtpvic"].InnerText != "")
        txtpvic.Text = mnode["txtpvic"].InnerText;
    if (mnode["txtpva"].InnerText != "")
        txtpva.Text = mnode["txtpva"].InnerText;

    if (mnode["txtpc"].InnerText != "")
        txtpc.Text = mnode["txtpc"].InnerText;
    if (mnode["txtra"].InnerText != "")
        txtra.Text = mnode["txtra"].InnerText;
    if (mnode["txtpa"].InnerText != "")
        txtpa.Text = mnode["txtpa"].InnerText;
    if (mnode["txteac"].InnerText != "")
        txteac.Text = mnode["txteac"].InnerText;
    if (mnode["txtpcsc"].InnerText != "")
        txtpcsc.Text = mnode["txtpcsc"].InnerText;

    if (mnode["txtpg"].InnerText != "")
        txtpg.Text = mnode["txtpg"].InnerText;
    if (mnode["txtfc"].InnerText != "")
        txtfc.Text = mnode["txtfc"].InnerText;
    if (mnode["txteag"].InnerText != "")
        txteag.Text = mnode["txteag"].InnerText;
}

```

```

    }
    catch (Exception ex)
    {
        GuardarDatosDefault();
        LeerDatos();

    }
}

private void Datos_FormClosed(object sender, FormClosedEventArgs e)
{
    if (MessageBox.Show("¿Desea guardar los datos de calculo?", "Atención",
        MessageBoxButtons.YesNo, MessageBoxIcon.Question) == DialogResult.Yes)
        GuardarDatos();
}

private void GuardarDatos()
{
    XmlDocument doc = new XmlDocument();
    StringBuilder cadenaXml = new StringBuilder();

    cadenaXml.Append("<Datos>");

    cadenaXml.Append("<cmbMeses><valor>").Append(cmbMeses.SelectedIndex +
1).Append("</valor></cmbMeses>");

    cadenaXml.Append("<txtAño><valor>").Append(txtAño.Text).Append("</valor></txtA
ño>");

```

```
cadenaXml.Append("<txtpoc><valor>").Append(txtpoc.Text).Append("</valor></txtpoc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtw><valor>").Append(txtw.Text).Append("</valor></txtw>");
```

```
cadenaXml.Append("<txthm><valor>").Append(txthm.Text).Append("</valor></txthm>");
```

```
cadenaXml.Append("<txttch><valor>").Append(txttch.Text).Append("</valor></txttch>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtta><valor>").Append(txtta.Text).Append("</valor></txtta>");
```

```
cadenaXml.Append("<txttcc><valor>").Append(txttcc.Text).Append("</valor></txttcc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtvv><valor>").Append(txtvv.Text).Append("</valor></txtvv>");
```

```
cadenaXml.Append("<txttaa><valor>").Append(txttaa.Text).Append("</valor></txttaa>");
```

```
cadenaXml.Append("<txttic><valor>").Append(txttic.Text).Append("</valor></txttic>");
```

```
cadenaXml.Append("<txttct><valor>").Append(txttct.Text).Append("</valor></txttct>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpvtc><valor>").Append(txtpvtc.Text).Append("</valor></txtpvtc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtps><valor>").Append(txtps.Text).Append("</valor></txtps>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtvs><valor>").Append(txtvs.Text).Append("</valor></txtvs>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtts><valor>").Append(txtts.Text).Append("</valor></txtts>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpvic><valor>").Append(txtpvic.Text).Append("</valor></txtpvic>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpva><valor>").Append(txtpva.Text).Append("</valor></txtpva>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpc><valor>").Append(txtpc.Text).Append("</valor></txtpc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtra><valor>").Append(txtra.Text).Append("</valor></txtra>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpa><valor>").Append(txtpa.Text).Append("</valor></txtpa>");
```

```
cadenaXml.Append("<txteac><valor>").Append(txteac.Text).Append("</valor></txteac>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpcsc><valor>").Append(txtpcsc.Text).Append("</valor></txtpcsc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpg><valor>").Append(txtpg.Text).Append("</valor></txtpg>");  
;
```

```
cadenaXml.Append("<txafc><valor>").Append(txafc.Text).Append("</valor></txafc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txteag><valor>").Append(txteag.Text).Append("</valor></txteag>");
```

```
    cadenaXml.Append("</Datos>");  
    doc.LoadXml((cadenaXml.ToString()));  
    doc.Save(Environment.CurrentDirectory + "\\Datos.xml");  
}
```

```
private void GuardarDatosDefault()  
{  
    XmlDocument doc = new XmlDocument();  
    StringBuilder cadenaXml = new StringBuilder();  
  
    cadenaXml.Append("<Datos>");
```

```
cadenaXml.Append("<cmbMeses><valor>").Append(DateTime.Now.Month).Append("</valor></cmbMeses>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtAño><valor>").Append(DateTime.Now.Year).Append("</valor></txtAño>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtpoc><valor>").Append("1310.05").Append("</valor></txtpoc>");
```

```
cadenaXml.Append("<txtw><valor>").Append("10897709.02").Append("</valor></txtw>");
```

```
cadenaXml.Append("<txthm><valor>").Append("30").Append("</valor></txthm>");
```

```

cadenaXml.Append("<txttch><valor>").Append("306").Append("</valor></txttch>");

cadenaXml.Append("<txtta><valor>").Append("17").Append("</valor></txtta>");

cadenaXml.Append("<txttcc><valor>").Append("25").Append("</valor></txttcc>");

cadenaXml.Append("<txtvv><valor>").Append("360").Append("</valor></txtvv>");

cadenaXml.Append("<txttaa><valor>").Append("104.44").Append("</valor></txttaa>");

cadenaXml.Append("<txttic><valor>").Append("121.11").Append("</valor></txttic>");

cadenaXml.Append("<txttct><valor>").Append("47.8").Append("</valor></txttct>");

cadenaXml.Append("<txtpvtc><valor>").Append("206.85").Append("</valor></txtpvtc>");

cadenaXml.Append("<txtps><valor>").Append("689.5").Append("</valor></txtps>");

cadenaXml.Append("<txtvsv><valor>").Append("3").Append("</valor></txtvsv>");
    cadenaXml.Append("<txttst><valor>").Append("1").Append("</valor></txttst>");

cadenaXml.Append("<txtpvic><valor>").Append("413.7").Append("</valor></txtpvic>");

    cadenaXml.Append("<txtpva><valor>");
cadenaXml.Append("689.5").Append("</valor></txtpva>");

cadenaXml.Append("<txtpc><valor>").Append("1.8453").Append("</valor></txtpc>");

```

```

cadenaXml.Append("<txtra><valor>").Append("0.0004").Append("</valor></txtra>");

cadenaXml.Append("<txtpa><valor>").Append("137.5").Append("</valor></txtpa>");

cadenaXml.Append("<txteac><valor>").Append("29").Append("</valor></txteac>");

cadenaXml.Append("<txtpcsc><valor>").Append("43543").Append("</valor></txtpcsc>");

cadenaXml.Append("<txtpg><valor>").Append("166.11").Append("</valor></txtpg>");

cadenaXml.Append("<txtfc><valor>").Append("0.00904245").Append("</valor></txtfc>");

cadenaXml.Append("<txteag><valor>").Append("13").Append("</valor></txteag>");

    cadenaXml.Append("</Datos>");
    doc.LoadXml((cadenaXml.ToString()));
    doc.Save(Environment.CurrentDirectory + "\\Datos.xml");
}

private void btnConversiones_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Conversiones conversiones = new Conversiones();
    conversiones.ShowDialog();
}

private void btnRestaurar_Click(object sender, EventArgs e)
{

```

```

        LeerDatos();
    }

private void btnLimpiar_Click(object sender, EventArgs e)
{
    cmbMeses.SelectedIndex = -1;
    txtAño.Clear();

    txtpoc.Clear();
    txtw.Clear();
    txthm.Clear();
    txttch.Clear();
    txtta.Clear();
    txttcc.Clear();
    txtvv.Clear();
    txttaa.Clear();
    txttic.Clear();
    txttct.Clear();
    txtpvtc.Clear();
    txtps.Clear();
    txtvs.Clear();
    txtts.Clear();
    txtpvic.Clear();
    txtpva.Clear();

    txtpc.Clear();
    txtra.Clear();
    txtpa.Clear();
    txteac.Clear();
    txtpcsc.Clear();
}

```

```

        txtpg.Clear();
        txtfc.Clear();
        txteag.Clear();
    }
}
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using Calderas.Entidades;

namespace Calderas.Vistas
{
    public partial class Resultados : Form
    {
        VistaReporte vistaReporte = null;

        public Resultados(DatosGenerales datosGenerales, DatosCombustoleo
datosCombustoleo, DatosGasNatural datosGasNatural, DatosResultados
datosResultados)
        {
            InitializeComponent();

            vistaReporte = new VistaReporte(datosGenerales, datosCombustoleo,
datosGasNatural, datosResultados);

            txtcc.Text = datosResultados.Ccm.ToString("0");

```

```

txtctc.Text = datosResultados.Ctc.ToString("0");
txtefc.Text = datosResultados.Efc.ToString("0.00");
txtrc.Text = datosResultados.Rc1.ToString("0.00");

txtcgn.Text = datosResultados.Cgn.ToString("0");
txtctg.Text = datosResultados.Ctg.ToString("0");
txtefg.Text = datosResultados.Efg.ToString("0.00");
txtrg.Text = datosResultados.Rg.ToString("0.00");

txtah.Text = datosResultados.Ah.ToString("0");

if (datosResultados.Ctc < datosResultados.Ctg)
    lblRecomendacion.Text = "COMBUSTOLEO";
else if (datosResultados.Ctg < datosResultados.Ctc)
    lblRecomendacion.Text = "GAS NATURAL";
else
    lblRecomendacion.Text = "GAS NATURAL";
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    this.Close();
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    //vistaReporte.ShowDialog();
}
}
}

```

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

Ambriz García Juan José, Romero Paredes Rubio Hernando, “Administración y Ahorro de Energía”, Universidad Autónoma Metropolitana (1993).

Baumeister T., Avallone E., Baumeister T. III, “Manual del Ingeniero Mecánico”, Mc Graw-Hill Octava Edición, (1987).

Burghardt David M., “Ingeniería Termodinámica”, Harla, (1984).

Cengel Yunus A., Boles Michael A., “Termodinámica” Tomo II, Mc Graw-Hill Segunda Edición, (2000).

Central Termoeléctrica Tuxpan, “Curso para Ayudante Químico”, Comisión Federal de Electricidad.

Chávez Noriega Víctor Manuel, “Quemadores”, Seminario de Sistemas de Vapor, Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y del Papel A.C. (ATCP), 10 y 11 de Febrero de 2000, Naucalpan Edo. de México.

Chow Pangtay Susana, “Petroquímica y Sociedad”, Fondo de Cultura Económica, (1998).

CPCU, “Vapor de Agua Teoría y Aplicaciones”, LIMUSA, (1987).

Faires Virgil, Simmang Clifford, “Termodinámica”, Noriega UTEHA, Segunda Edición, (1993).

Fryling Glenn R., “Combustion Engineering”, Combustion Engineering, Inc., (1967).

Gallegos, O.R., Velázquez, L.N., García, C.O.R., Luna, L.A., Bojórquez, M.G., “Construcción de un archivo típico metereológico para Mexicali, B.C.”, 32 Semana Nacional de Energía Solar, (2008).

Gaydon A.G., Wolfhard H.G., “Flames, Their Structure, Radiation and Temperature”, Chapman, (1960).

Haywood R.W., “Ciclos Termodinámicos de Potencia y Refrigeración”, Noriega-Limusa IPN, (1999).

Himmelblau David M., “Balances de Material y Energía”, Prentice Hall, (1994).

Huang Francis F., “Ingeniería Termodinámica Fundamentos y Aplicación”, CECSA, (1994).

Moreno Martínez Carlos, “Componentes de una Caldera y su Funcionamiento”, Seminario de Sistemas de Vapor, Asociación Mexicana de Técnicos de las Industrias de la Celulosa y del Papel A.C. (ATCP), 10 y 11 de Febrero de 2000, Naucalpan Edo. de México.

NOM-009-ENER-1995, “Eficiencia Energética en Aislamientos Térmicos Industriales”.

NOM-043-ECOL-1993, “Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas”.

NOM-085-ECOL-1994, “Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxidos de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes fijas”.

Oropeza M., “Manual Práctico de Auditorías Ambientales”, Panorama, (1996).

Plauchú Alberto, “Eficiencia en Calderas”, Primera Edición, (1995).

Salvi Giuliano, “La Combustión Teoría y Aplicaciones”, DOSSAT, Segunda Edición, (1975).

Secretaría de Energía, “Prospectiva del Mercado de Gas Natural 2007-2016”, Secretaría de Energía (2007).

Secretaría de Energía, “Prospectiva del Mercado de Petróleo Crudo 2007-2016”, Secretaría de Energía (2007).

Secretaría de Energía, “Prospectiva de Petrolíferos 2007-2016”, Secretaría de Energía (2007).

Selmec, “Manual de calderas Selmec”, Cleaver Brooks, (1976).

Severns W., Degler H., Miles J., “Energía Mediante Vapor, Aire o Gas”, Reverté, (1991).