

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

66

FACULTAD DE QUÍMICA

**"EVALUACIÓN ENERGÉTICA EN GENERADORES  
DE VAPOR EN OPERACIÓN"**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA

**P R E S E N T A:**  
SUGEY, GRANADOS PÉREZ



MÉXICO, D.F.

2000

2366/1

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	PROF. JOSÉ ANTONIO ORTÍZ RAMÍREZ
VOCAL	PROF. FERNANDO DE JESÚS RODRÍGUEZ RIVERA
SECRETARIO	PROF. MARTÍN RIVERA TOLEDO
1er. SUPLENTE	PROF. BALDOMERO PÉREZ GABRIEL
2do. SUPLENTE	PROF. EUBERTO HUGO FLORES PUEBLA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

COMISION NACIONAL PARA EL AHORRO DE ENERGÍA (CONAE)

ASESOR DEL TEMA

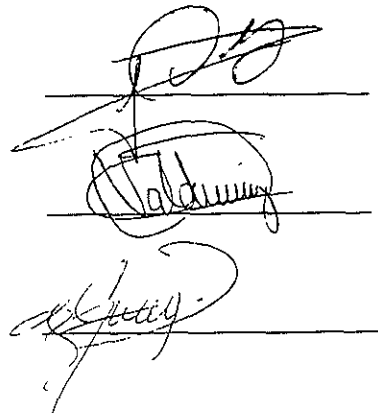
ING. JOSÉ ANTONIO ORTÍZ RAMÍREZ

SUPERVISOR TÉCNICO

ING. EDUARDO VALDIVIESO RUÍZ

SUSTENTANTE

SUGEY GRANADOS PÉREZ



The image shows three handwritten signatures, each written over a horizontal line. The top signature is the most stylized, the middle one is more legible and appears to read 'Valdivieso', and the bottom one is also quite stylized.

*Tened en mente que las cosas maravillosas que se aprenden en las escuelas son el trabajo de muchas generaciones, producidas por el esfuerzo entusiasta y la labor infinita en todos los países del orbe. Todo esto se ponen nuestras manos como herencia para que la recibáis, honréis, aumentéis y un día, con toda nuestra fe la traspaséis a nuestra descendencia. Esta es la forma en la que nosotros los mortales logramos la inmortalidad en las cosas permanentes que creamos en común.*

Albert Einstein.

*A Dios:*

*Gracias por tu compañía de siempre,  
y por todo lo recibido hasta ahora.*

*A mis padres:*

*Gracias por su comprensión, cariño y apoyo que me han  
brindado y que me han permitido alcanzar una de las  
metas más importantes en mi vida; la cual constituye la  
herencia más valiosa que pudiera recibir.*

*A mis hermanos:*

*Mi aprecio y gratitud por su cariño y espíritu  
de unión que han dado fuerza a nuestro hogar en  
el intento de lograr una buena familia.*

*A los Ingenieros:*

*David Gutiérrez Cruz, Eduardo Valdivieso Ruiz y Salvador Mendoza Camacho, a quienes agradezco la dirección, supervisión y apoyo brindado durante la realización de este trabajo.*

*Igualmente son agradecidos los comentarios realizados sobre este trabajo, por los honorables miembros del jurado; los cuales contribuyeron a enriquecer el entendimiento del mismo.*

*Un agradecimiento en especial a todos mis profesores, por sus sabias enseñanzas y consejos, que me ayudarán, hoy y siempre, para conducirme por un sendero positivo y benéfico a la sociedad, premisa indispensable en mi actuar profesional.*

*A mis sobrinos:*

*Alan, Violeta, Estefanía, Cinthya,  
Illyanna y Minerva; que con su presencia  
han motivado e iluminado más mi existir.*

*A mis amigos:*

*Por todos los momentos compartidos y por  
la mutua amistad que nos hemos brindado,  
siempre en forma incondicional.*

*A la memoria de mis abuelos:*

*En reconocimiento a estos hombres y mujeres; que por  
su lucha, sacrificio y esfuerzo entregado, me han  
impulsado a alcanzar esta meta y a seguir adelante.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México:*

*Fuente de sabiduría y conocimiento,  
de la cual tuve la virtud de beber sus gotas  
para emprender el camino profesional.*

*“A todos aquellos que están dispuestos a entregar  
su vida por alcanzar una estrella, que han  
renunciado a la mediocridad y que aspiran  
como destino al triunfo y a la realización total.”*

Los secretos de la excelencia: Miguel Ángel Comcio



# INDICE

# ÍNDICE

	Pág.
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>III. GENERALIDADES</b> .....	8
III.1. Generadores de vapor	
III.1.1 Definición. ....	8
III.1.2 Operación. ....	8
III.1.3 Clasificación. ....	10
III.1.4 Partes integrantes y equipos auxiliares .....	14
III.1.5 Usos industriales. ....	16
III.2. Conceptos generales	
III.2.1 Transferencia de calor. ....	18
III.2.2 Vapor. ....	20
III.2.3 Combustión. ....	21
<b>IV. TECNOLOGÍA DE GENERADORES DE VAPOR</b> .....	24
IV.1. Generadores de vapor. ....	24
IV.2. Quemadores. ....	28
IV.3. Equipos de recuperación de calor .....	31
IV.3.1 Economizadores .....	32
IV.3.2 Precalentadores. ....	34
IV.4. Instrumentación y control .....	38
<b>V. METODOS DE EVALUACIÓN</b> .....	42
V.1. Evaluación energética. ....	42
V.2.1 Método de pérdidas (indirecto) .....	43
V.2.2 Método de entradas - salidas (directo) . . . . .	44
V.2. Evaluación económica de medidas de ahorro .....	45
V.2.1 Métodos de evaluación. ....	45
V.2.2 Procedimiento. ....	47
V.2.3 Inversión total. ....	48
V.2.4 Ahorros. ....	48
V.3. Estimación de la reducción en contaminantes ambientales. . . . .	49
<b>VI. DIAGNÓSTICO DE ENERGÉTICO</b> .....	52
VI.1. Desarrollo del diagnóstico. ....	53
VI.2. Prueba de comportamiento. ....	54
VI.3. Determinación de la eficiencia . . . . .	57
VI.4. Dictamen energético. ....	58
VI.5. Recomendaciones operacionales y /o de inversión. . . . .	58
VI.6. Estimación de los ahorros y beneficios obtenidos. . . . .	58

	<i>Pág</i>
<b>VII. EJEMPLO PRÁCTICO DE EVALUACIÓN.</b> . . . . .	59
VII 1 Introducción . . . . .	59
VII.2. Evaluación energética. . . . .	60
VII.2.1 Prueba de comportamiento . . . . .	60
VII.2.2 Determinación de la eficiencia. . . . .	60
VII.2.3 Dictamen energético. . . . .	62
VII.2.4 Estimación de beneficios. . . . .	63
VII.3 Evaluación económica. . . . .	64
VII 3.1 Sustitución del quemador actual. . . . .	64
VII 3.2 Instalación de un precalentador de aire. . . . .	66
VII.4 Resultados. . . . .	70
<b>CONCLUSIONES.</b> . . . . .	71
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> . . . . .	73
<b>ANEXOS</b>	
ANEXO 1. Fundamentos termodinámicos . . . . .	75
ANEXO 2. Memoria de calculo. Eficiencia del generador de vapor. . . . .	76
ANEXO 3 Lineamientos para la prueba de comportamiento en situ. . . . .	82
ANEXO 4. Memoria de calculo. Balance energético. . . . .	89
ANEXO 5. Gráficas y tablas. . . . .	90
ANEXO 6 Memoria de calculo Evaluación económica . . . . .	100
ANEXO 7. Directorio de proveedores de tecnología en generadores de vapor. . . . .	104

# CAPÍTULO I

## CAPÍTULO I

### I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas y los procesos industriales que proporcionan los servicios tales como vapor, agua de enfriamiento, agua de proceso, electricidad, etc.; requieren enormes cantidades de energía que deben ser continuamente proporcionadas para su funcionamiento, la fuente de energía que se emplea proviene principalmente de la energía contenida en los combustibles fósiles.

En la actualidad, el consumo de energía en cualquiera de sus formas se ha incrementado con gran rapidez y a lo largo de los últimos años, las empresas han visto como la energía ha pasado de ser una parte pequeña en el costo de producción, a representar una parte importante de dicho costo. Por otro lado, el uso irracional e ineficiente de la energía ha tenido un efecto negativo en la economía de las personas y de las industrias pero además, ha tenido una repercusión global negativa en los problemas de contaminación ambiental, que abarcan desde los problemas severos locales como los conocidos en México, hasta los problemas que han trascendido las fronteras; como el calentamiento global de la atmósfera debido al exceso de emisiones de gases de tipo efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En esta línea parece evidente que el **ahorro y uso eficiente** de la energía es la alternativa.

La estrategia de ahorro y uso eficiente de la energía cobra particular relevancia por estar estrechamente ligada a otros temas de interés nacional que se resumen en cuatro grandes áreas: la conservación de los recursos no renovables, la modernización del sector productivo, la protección al medio ambiente y la racionalización de los requerimientos energéticos en procesos industriales. El desarrollo económico actual exige un incremento continuo de la productividad, lo cual llevará consigo el uso de tecnologías de vanguardia que asuman los criterios de uso eficiente de energía y de impactos ambientales mínimos.

Bajo este contexto, uno de los equipos utilizados en gran medida en la industria para proporcionar el vapor demandado en los procesos y servicios, son los generadores de vapor, los cuales emplean combustibles tales como gas natural, diesel, combustóleo, gasóleo, etc. Estos son equipos que por su naturaleza de operación crean la necesidad de implementar acciones, encaminadas al ahorro y uso eficiente de energía; a fin de disminuir los consumos energéticos, los costos operativos y las emisiones contaminantes involucradas en ellos.

El ahorro de energía ha de ser considerado una de las prioridades nacionales, los medios para lograrlo son su uso racional y eficiente. La ingeniería química entre otras profesiones, desempeña un papel importante al respecto, ya que los conocimientos y formación que se tiene en esta área, nos hace capaces de crear, desarrollar y aplicar tecnologías, actitudes y criterios para lograr este objetivo; y de esta forma contribuir con la preservación de los recursos naturales y del entorno ambiental

Por lo expuesto anteriormente, este trabajo de tesis tiene como objetivo primordial, proporcionar una **metodología para la evaluación energética en generadores de vapor en operación**, que sirva como herramienta en la identificación de áreas de oportunidad que conlleven al uso racional y eficiente de los energéticos utilizados por estos equipos.

La aplicación de medidas de ahorro de energía tanto operacionales como de inversión, obtenidas de la evaluación energética, deberán ser atractivas para su implementación por los beneficios energéticos, económicos y ambientales que involucren

Para lograr el objetivo deberán cumplirse los alcances siguientes:

- Elaborar la metodología para la evaluación energética en generadores de vapor en operación. Aplicable a equipos de tipo pirotubular y acuotubular, que emplean combustibles líquidos o gaseosos; de acuerdo al código A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers Section Steam Generating, Power Test Codes PTC 4.1); descrito en el punto V.1 de este trabajo.
- Obtener y dar a conocer la tecnología reciente en generadores de vapor, como una base para la toma de decisiones con relación al dictamen energético, particularmente obtenido.
- Evaluar el comportamiento energético actual del generador de vapor de una planta química, utilizando la metodología elaborada como herramienta de cálculo, la cual se basa en un balance térmico.
- Identificar los potenciales de ahorro de energía en el generador de vapor evaluado.
- Proponer medidas para el uso racional y eficiente de la energía en el generador de vapor evaluado.
- Elaborar una metodología que sirva como herramienta de cálculo, para evaluar económicamente las alternativas de ahorro de energía propuestas, a fin de obtener aquella(s) mas atractivas para la empresa.
- Estimar los beneficios energéticos, económicos y ambientales, resultados de la aplicación de las medidas de ahorro.

## CAPÍTULO II

## CAPÍTULO II

### II. ANTECEDENTES

La operación de los generadores de vapor se basa en un proceso de combustión, el cual es un fenómeno físico-químico en donde una sustancia llamada combustible se combina con oxígeno (contenido en el aire), resultando gases de combustión y una cantidad de calor por el efecto térmico de la reacción; las impurezas del combustible, una incorrecta relación entre el aire y el combustible, así como altas temperaturas son causas de la formación de productos tales como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas e hidrocarburos no quemados, los cuales son considerados contaminantes primarios del aire.

La combustión de combustibles fósiles en todo el mundo, principalmente carbón, petróleo y sus derivados, a una escala prodigiosa en la era moderna, ha incrementado el nivel de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. A partir de mediciones hechas durante varias décadas, es evidente que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera esta aumentando constantemente. En base a la velocidad actual y la que se espera en el futuro del uso de los combustibles fósiles se estima que aumente el nivel atmosférico de CO<sub>2</sub> hasta un 100% para el 2050; al duplicar la concentración de CO<sub>2</sub> de su nivel actual podría ocasionar que la temperatura promedio del planeta aumentará 3 °C. Un cambio en la temperatura de esta magnitud o aún menor podría provocar cambios importantes en el clima del planeta. (CCME,1993)

Es de entenderse la actitud que se ha estado desarrollando y aplicando a escala mundial desde la década de los 70's. De lo último al respecto, en diciembre de 1997, se aprueba en Estados Unidos (aun no ratificado por el senado) el "Protocolo de Kyoto", cuyo acuerdo requiere que para el período 2008-2012 las emisiones estadounidenses de gases de tipo efecto invernadero disminuyan un 7 % por debajo de la que se tenían en 1990. Este acuerdo requiere que los Estados Unidos y otros países industrializados tomen acciones drásticas para reducir las emisiones, mientras que los países en vías de desarrollo (que en 50 años próximos producirían el mismo volumen de emisiones que son producidas actualmente por los países industrializados) no están obligados a reducir sus propias emisiones. Sin la participación de estos países en vías de desarrollo - como India, China, México, Brasil, etc.- el impacto de las acciones de Estados Unidos y de países industrializados sería pequeño. (API, 1995-1999)

México como un país en vías de desarrollo y conocedor de las consecuencias futuras del deterioro ambiental, se une a las acciones de países industrializados con su previa asesoría; asumiendo el compromiso de reducir sus emisiones de gases tipo efecto invernadero, que incluye el dióxido de carbono. Para tal efecto instituciones gubernamentales participan dando máxima prioridad al ahorro y uso eficiente de la energía.

La siguiente información resume brevemente aspectos globales relacionados al ahorro y uso eficiente de energía y permitirá mostrar que los estudios de energía en generadores de vapor, tema general de esta tesis, presentan una área importante en cuanto a potenciales de ahorro y mitigación de contaminación ambiental.



A nivel mundial los esfuerzos de ahorro se han centrado en el sector industrial, y en los últimos años los países industrializados lograron reducir el consumo de energía primaria por unidad de producto bruto en un 20% aproximado

La estimación del crecimiento de la población mundial es un parámetro crítico, según una reciente proyección realizada por las Naciones Unidas, se prevé una explosión demográfica de 5,300 millones de habitantes en 1990 a 8,100 millones en 2020 (10,000 millones en 2050 y 12000 millones en el 2100). Más del 90% de esa explosión tendrá lugar en los países en vías de desarrollo. (Ambriz,1993)

Se considera que solamente en los países pertenecientes a los desarrollados existe el potencial de satisfacer la demanda energética en el futuro. La explosión demográfica y el desarrollo económico esperados en muchos países pertenecientes al grupo de países en vías de desarrollo conllevarán el que por muchos años, experimenten considerables crecimientos del consumo de energía y ello de manera inevitable. Por lo que es de gran importancia la forma en que estos factores se vean involucrados en las cuestiones energéticas futuras del país.

## PANORAMA ENERGÉTICO NACIONAL

En México el consumo final de energía de 1998 fue de 3996.322 PJ (Petajoule=  $10^{15}$  J) del cual el 92.9% fue de uso energético (3713.423 PJ) donde el sector industrial participo con el 34.7% de acuerdo con el balance nacional energético 1998. (Figura II.1).

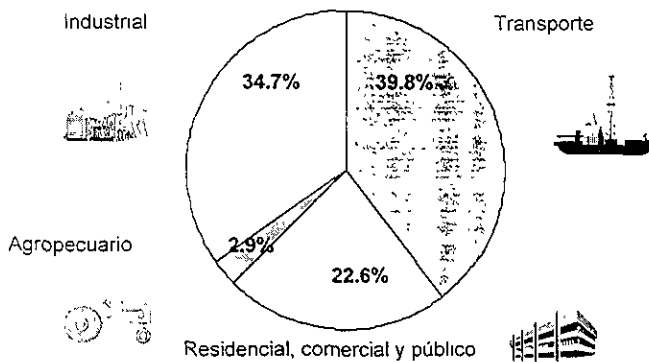


Figura II.1. Consumo final energético por sector 1998 (3713.423 PJ)

El consumo de energía industrial en el mismo periodo estuvo conformado por un 21.5% de electricidad y un 78.5% en forma de combustibles fósiles básicamente gas natural, combustóleo y coque (Figura II.2.). Se estima que aproximadamente un 25% de los combustibles se usaron en la generación de vapor.

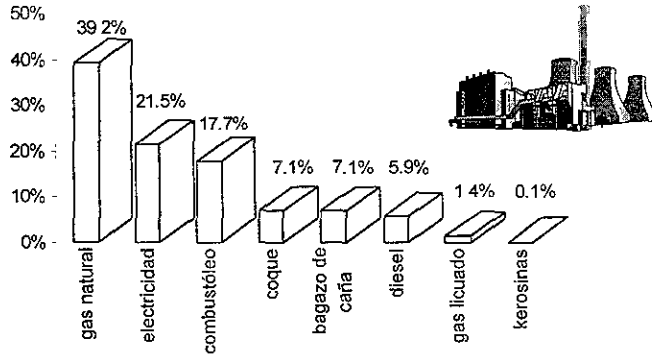


Figura II.2. Consumo de energéticos en el sector industrial 1998 (1288.063 PJ)

La generación de vapor participa en la emisión de contaminantes dentro del sector industrial; es una rama de consumo y demanda en la que se conjunta energía primaria y energía secundaria. Se estima que un 70% de los generadores de vapor dentro de los diferentes giros de actividad del sector industrial están presentes en cinco ramos. En la *Tabla II.1* muestra una estimación de la distribución de los generadores en los ramos y se muestran el número de unidades de vapor con posibilidades de equipamiento adicional afin de eficientar su operación (Plauchú, 1995). Así mismo las *Figuras II.3.A* y *II.3.B* muestran la distribución porcentual de los generadores de vapor de acuerdo al tipo de combustible empleado.

Tabla II.1 Generadores de vapor instalados en México<sup>1</sup>

Ramo industrial	Acuotubular	Pirotubular	Total	C / posibilidad de equipamiento
Alimentos	13.2	32	3,400	600
Química y petroquímica	42.0	6	2,100	350
Papel y celulosa	9.6	5	700	100
Textil	5.8	16	1,700	400
Manufacturera	3.4	7	650	150
<b>Totales<sup>2</sup></b>	<b>74</b>	<b>66</b>	<b>8,550</b>	<b>1,600</b>

<sup>1</sup> Tubos de agua y tubos de humo de 100 cc y/o mayores

<sup>2</sup> % del total de unidades de su tipo en la industria.

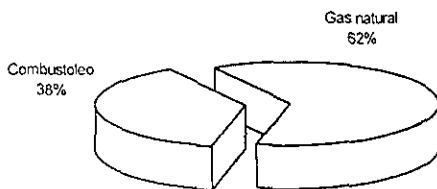


Figura II.3.A Combustibles en generadores de vapor acuotubulares

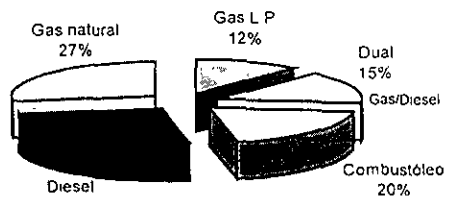


Figura II.3.B Combustibles en generadores de vapor pirotubulares

A nivel nacional la contaminación atmosférica se limita a las zonas de alta densidad demográfica o industrial. Las emisiones anuales de contaminantes en el país son superiores a 12 millones de toneladas, de las cuales el 35% provienen de las fuentes industriales (1990, Finkelman). En la ciudad de México se genera el 23.6% de dichas emisiones, en Guadalajara el 3.5% y en Monterrey el 3%. Los otros centros industriales del país generan el 70% restante.

## **NORMATIVIDAD ECOLÓGICA**

En materia de normatividad ecológica la Norma Oficial Mexicana NOM-085-ECOL-1994, (Tabla II.2) regula por zonas geográficas y por capacidad del equipo de combustión, los niveles máximos permisibles de emisiones contaminantes provenientes del equipo de combustión de fuentes fijas que utilizan combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

En esta norma se establece las condiciones de operación de los equipos de combustión, la medición y análisis que deben realizarse, así como los métodos que deben emplearse. Sin embargo cabe señalar que no hace una diferencia entre los diferentes tipos de combustibles líquidos y gaseosos existentes, ya que se agrupan en forma global, lo cual no puede ser acertado puesto que las composiciones de los combustibles son diferentes y por lo tanto al ser quemados la composición de gases liberados será diferente.

Asimismo establece valores para los excesos de aire de 25 a 50%, con lo que considera que las emisiones de carbono serían mínimas con este rango de exceso de aire. Actualmente el mercado de quemadores permiten manejar excesos de aire del 15% recomendado por fabricantes como óptimo.

Considerando esto y lo referente a la población de generadores de vapor en México, ubica el consumo de energía en estos equipos en un área preferente en cuanto a potencial de ahorro y oportunidades de mejoramiento del uso de los energéticos en los procesos de combustión, permitiendo así sustentar la importancia y contribución de este trabajo de tesis. Cabe mencionar que también los usos de combustibles en hornos industriales serían otro punto de interés en eficientar los equipos de combustión.

TABLA II.2. Límites permisibles de emisiones contaminantes por equipos de combustión de fuentes fijas. (1° ENERO DE 1998 EN ADELANTE)

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE COMBUSTION MJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE EMPLEADO	DENSIDAD DE HUMO Número de mancha u opacidad	PARTÍCULAS (PST) mg/m <sup>3</sup> (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			BIOXÍDO DE AZUFRE ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1) (2)			ÓXIDOS DE NITRÓGENO ppm V (kg/10 <sup>6</sup> kcal) (1)			EXCESO DE AIRE DE COMBUSTION % volumen(5)
			ZMCM	ZC (3)	RP	ZMCH	ZC (3)	RP	ZMCM	ZC (4)	RP	
Hasta 5 250	Combustible o gasóleo	3	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	50
	Otros líquidos	2	NA	NA	NA	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	NA	NA	NA	
	Gaseosos	0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	Líquidos	NA	75 (0.108)	350 (0.497)	450 (0.639)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	190 (0.507)	190 (0.507)	375 (1.0)	40
De 5 250 a 43,000	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190 (0.486)	190 (0.486)	375 (0.959)	
	Líquidos	NA	60 (0.085)	300 (0.426)	400 (0.568)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	30
Mayor de 110 000	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	
	Sólidos	NA	60 (0.080)	250 (0.375)	350 (0.525)	550 (2.16)	1,100 (4.31)	2,200 (8.16)	110 (0.309)	110 (0.309)	375 (1.052)	25
	Líquidos	NA	60 (0.085)	250 (0.355)	350 (0.497)	550 (2.04)	1,100 (4.08)	2,200 (8.16)	110 (0.294)	110 (0.294)	375 (1.0)	
	Gaseosos	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110 (0.281)	110 (0.281)	375 (0.959)	

**Notas y significados de siglas**

- (1) Concentraciones referidas a 25°C, 760 mm Hg, 5% de oxígeno en volumen y base seca. Entre paréntesis se expresa el equivalente de la concentración en unidades de kg/10<sup>6</sup> kcal
- (2) Los valores de emisión de Partículas, Bioóxido de Azufre y Óxidos de Nitrógeno podrán ser determinados con promedios ponderados de fuente fija, al hacer uso del procedimiento descrito en el punto 5.2 de esta Norma
- (3) Zonas críticas (especificadas en el punto 4.22 de esta norma).
- (4) Se refiere únicamente a las Zonas metropolitanas de las ciudades de Monterrey y Guadalupe y las ciudades de Tijuana, Baja California y Cd. Juárez, Chihuahua
- (5) Determinado con la ecuación establecida y medido antes del precalentador de aire o de cualquier infiltración que diluya los gases de combustión
- ZC= Zonas Críticas NA= No Aplica ZMCM=Zona Metropolitana de la Ciudad de México RP=Resto del país

## CAPÍTULO III

## CAPÍTULO III

### III. GENERALIDADES

#### III.1. GENERADORES DE VAPOR

El vapor de agua es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad y su fácil generación y manejo lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria para fines térmicos y/o mecánicos; sin embargo la producción industrial de vapor requiere de grandes cantidades de agua y combustibles.

##### III.1.1. Definición

Un generador de vapor se define como un equipo que, genera y entrega vapor en la cantidad, calidad (presión, temperatura, humedad, pureza) y oportunidad requeridas por el usuario final. Frecuentemente a los generadores de vapor se les domina también con el nombre de calderas y para el presente trabajo se omite este término, ya que se hace notar en un sentido estricto de la palabra, que la caldera es un equipo que sirve para calentar un fluido, a pesar de que en ciertos casos, sirve para hervir dicho fluido, produciéndose vapor saturado, con lo cual cae dentro de la definición de generador de vapor.

##### III.1.2. Operación

Un generador de vapor opera mediante la coordinación de energía entre cinco elementos: aire, combustible, productos de combustión, agua y vapor. En la figura III.1. se puede observar esquemáticamente las corrientes que intervienen en el balance de masa y energía de un generador de vapor.

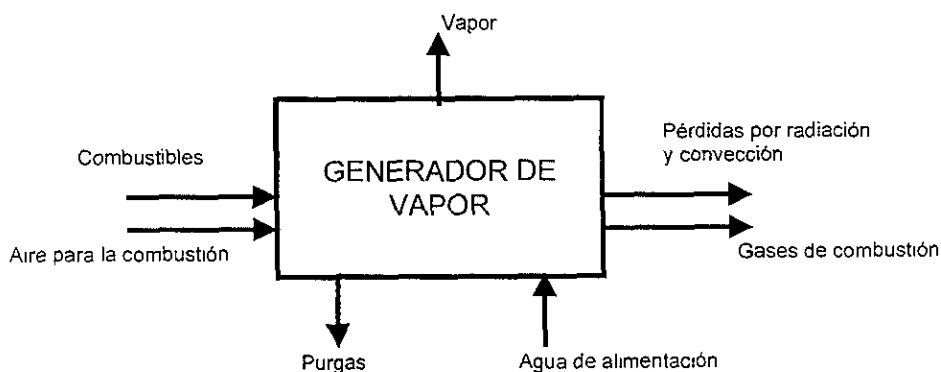


Figura III.1. Balance de masa y energía en un generador de vapor.

Para la cuantificación global del balance de masa y energía se requieren de las siguientes variables termodinámicas involucradas para cada corriente:

#### Agua de alimentación

- Temperatura(°C)
- Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
- Flujo (ton/h)

#### ◆ Combustible

- Tipo
- Temperatura(°C)
- Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
- Flujo (ton/h)
- Densidad Relativa
- Poder calorífico superior (kJ/Kg)
- Capacidad calorífica (kJ/kg°C)
- Composición (% en mol y/o % en peso)

#### ◆ Gases de combustión

- Temperatura (°C)
- Contenido de oxígeno (% en volumen)
- Contenido de dióxido de carbono (% en vol )
- Contenido de monóxido de carbono (ppm)

#### ◆ Vapor producido

- Temperatura(°C)
- Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
- Flujo (ton/h)

#### ◆ Aire para la combustión

- Temperatura bulbo seco (°C)
- Temperatura bulbo húmedo
- Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
- Altitud
- Humedad

#### ◆ Purga

- Temperatura (°C)
- Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
- Flujo (ton/h)

En los generadores de vapor, por medio del combustible y el aire un proceso de combustión libera energía química y la transforma en energía térmica a 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 para convertirse en vapor saturado o, elevará su temperatura para ser entregado con el grado de sobrecalentamiento requerido al proceso o a una máquina primaria de accionamiento directo. El vapor automáticamente fluye hasta el punto de consumo a través del sistema de tuberías impulsado por el gradiente de presión en donde se condensa después de ceder su calor latente para reciclarse al proceso total o parcialmente según se trate de una central termoeléctrica o una aplicación industrial. (Figura III.2)

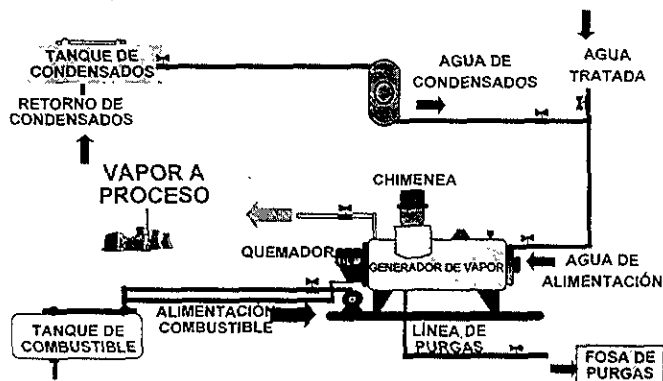


Figura III.2. Sistema típico de generación de vapor.

### III.1.3. Clasificación

Los generadores de vapor pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios; en este trabajo de tesis se consideran por la forma en que circulan los gases de combustión en dos tipos: piro tubulares y acuotubulares que emplean combustibles líquidos y gaseosos (Figuras III.3.A y III.3.B).

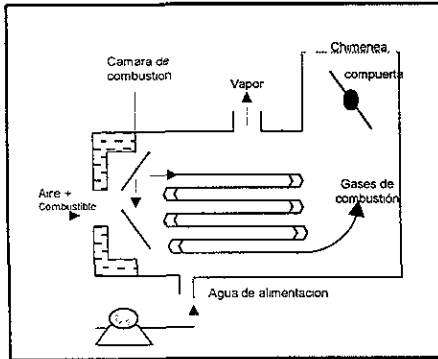


Figura III.3.A. Generadores tipo piro tubular

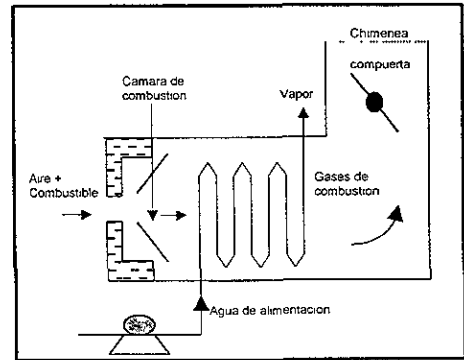


Figura III.3.B Generadores tipo acuotubular

#### III.1.3.A. Generadores de vapor tipo piro tubular

En estos equipos los gases de combustión son obligados a pasar por el interior de los tubos rectos, que se encuentran sumergidos en la masa de agua - tubos de humo -. Todo el conjunto, agua y tubo de gases, se encuentra rodeado por una carcasa exterior. Los gases calientes al circular por los tubos ceden calor, el cual se transmite a través de los tubos al agua para lograr obtener vapor saturado (Figura III.4).

#### Características

- Los generadores de vapor tipo piro tubular se usan generalmente en donde la demanda de vapor es relativamente reducida, comparada con la demanda de las grandes centrales termoeléctricas.
- Usados en sistemas de calefacción, en generación de vapor para servicios auxiliares en procesos industriales o como unidades portátiles.
- Son poco económicos para grandes capacidades, pues a medida que aumenta el diámetro de la coraza, deberá incrementarse el espesor del material para una misma presión, por lo que se limita para bajas capacidades y casi por lo general para vapor saturado.
- Por su construcción pueden ser verticales, horizontales, tipo marino y tipo locomotora, y tienen un bajo costo inicial y de mantenimiento
- Tienen una presión de trabajo que no excede normalmente de  $20 \text{ Kg/cm}^2$ ; y su producción de vapor máxima se encuentra alrededor de  $25 \text{ ton/hr}$
- Generalmente proporcionan vapor a dos niveles, bajo hasta  $10.5 \text{ Kg/cm}^2$  y alto hasta  $20 \text{ Kg/cm}^2$



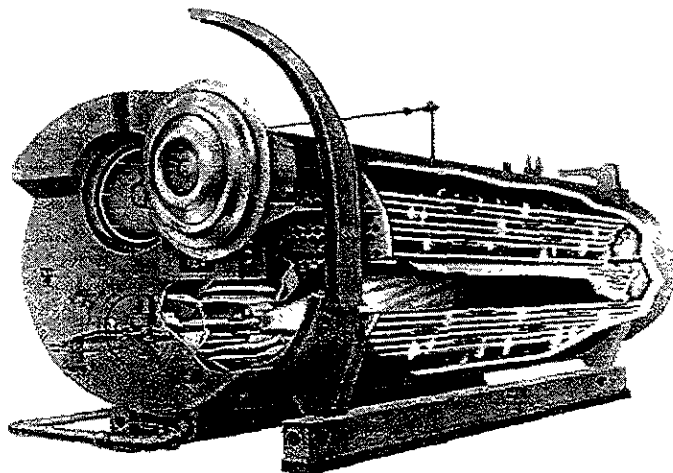


Figura III.4. Generador de vapor tipo piro-tubular

### III.1.3.B. Generadores de vapor tipo acuotubular

En estos equipos los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, mientras que por su interior lo hace el agua - tubos de agua -, posteriormente en la mezcla agua - vapor y finalmente vapor. (Figura III.5).

Éstos tienen una gran escala de producción de vapor, la cual puede variar desde una pequeña producción de vapor, hasta las grandes producciones de vapor para centrales termoeléctricas; ya que el volumen de los gases calientes es mucho mayor que el volumen del líquido que circula dentro de los tubos, lo que permite un calentamiento más exhaustivo del fluido motor.

#### Características

- Existen generadores de vapor acuotubulares de tubos rectos y de tubos curvos.
- Los de tubos recto constan de un domo longitudinal o transversal, en un banco de tubos inclinados aproximadamente  $15^\circ$ , conectado en cada extremo a un tubo vertical. Los de domo longitudinal se fabrican con superficies de calefacción entre  $95-950 \text{ m}^2$  y la capacidad entre 2,500 y 36,000 Kg/hr. La presión puede variar hasta un máximo de  $140 \text{ Kg/cm}^2$ . Los equipos de domo transversal los fabrican con superficies de calentamiento de  $95-2300 \text{ m}^2$  con presiones de hasta  $100 \text{ Kg/cm}^2$  (Figuras III.5 A, III.5.B).
- Los de tubos curvos, se emplean para grandes capacidades de generación. Constan de uno o más domos superiores y uno o dos domos inferiores unidos por medio de tuberías a los domos superiores. Los domos superiores funcionan como cabezales y a la vez como separadores de vapor y agua; el domo inferior sirve como acumulador de los depósitos formados durante la evaporación. El número y arreglos de los domos varía con la disponibilidad de espacio y con las condiciones de operación (Figuras III.5 C).

- Debido al costo de los domos de alta presión, los generadores de dos o tres domos son los más comunes actualmente. Constan además de una serie de separadores centrífugos con el fin de purificar y secar el vapor producido.
- En general se utilizan para presiones superiores a los  $10.55 \text{ Kg/cm}^2$  (150 psi) y capacidades de más de  $6,804 \text{ Kg/h}$  de vapor. En las centrales termoeléctricas la presión de trabajo suele ser hasta  $351.5 \text{ Kg/cm}^2$  (5,000 psi).
- Los equipos acuotubulares compactos tienen gran demanda debido a que se construyen totalmente en los talleres del fabricante y se venden y envían como un paquete al lugar de su utilización. Son recomendables cuando se requiere una rápida instalación, se dispone de poco espacio, cuando es necesario el traslado del generador a otra localización o bien cuando el proceso requiere una mayor presión de vapor que la suministrada por una pirotubular compacta.
- Las altas temperaturas en la zona de combustión (hogar) ocasionan elevados costos de mantenimiento del material refractario de la superficie de absorción. Los hogares se han ido modificando paulatinamente recubriéndose con parrillas inferiores o pisos enfriados por agua con el fin de resolver estos problemas.
- Pueden suministrarse para quemar cualquier tipo de combustible (combustóleo, gasóleo, diesel, gas natural o licuado, e inclusive carbón), variando tanto del hogar como los quemadores y sus diferentes accesorios periféricos. Por lo regular el tiro es forzado en estos equipos.

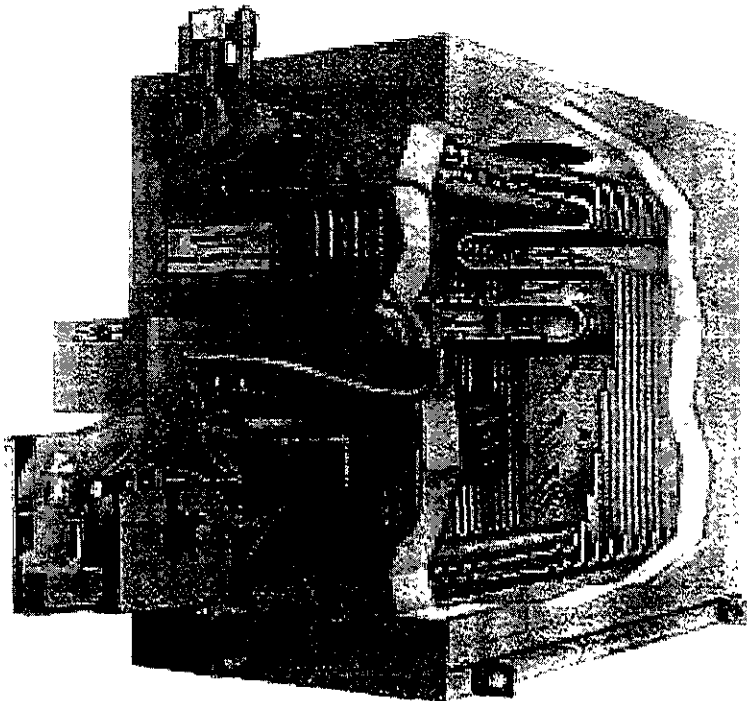


Figura III.5. Generador de vapor tipo acuotubular

Figura III.5.A. Generador acuatubular de tubos rectos, de tres retornos, domo transversal (Babcock & Wilcox Co.)

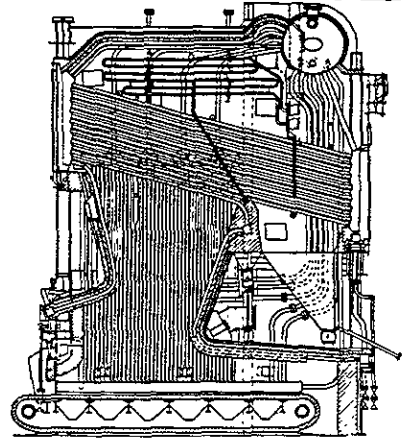
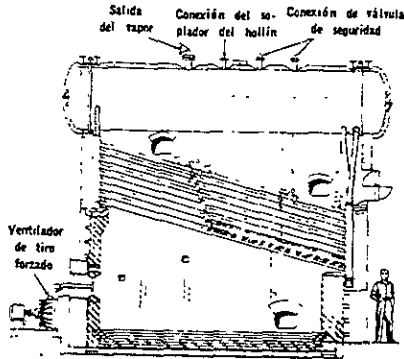
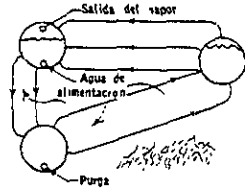
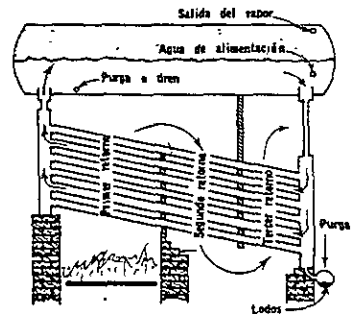
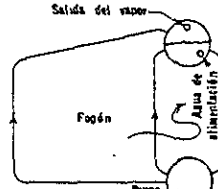


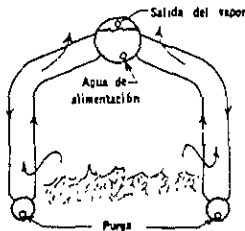
Figura III.5.B. Generadores acuatubulares de tubos rectos, domo longitudinal.



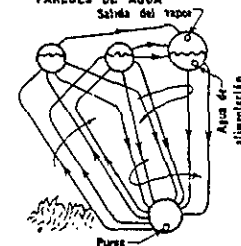
CALDERA DE ALTURA REDUCIDA DE TRES DOMOS



CALDERA VERTICAL DE DOS DOMOS CON FOGÓN DE PAREDES DE AGUA



CALDERA DE TRES DOMOS, TIPO "A"



CALDERA DE CUATRO DOMOS

Figura III.5.C. Circulación de agua en calderas acuatubulares de tubos curvos.

### III.1.4. Partes integrantes de un generador de vapor.

Las partes principales comunes a los generadores de vapor son:

- Carcasa:** es el cuerpo del generador de vapor, puede ser ovalado, cilíndrico o cuadrado.
- Hogar:** es el lugar donde se lleva a cabo la combustión, se encuentra en contacto directo con la flama y por lo tanto es la zona donde se presenta la más alta temperatura de los gases de combustión.
- Quemador:** se utiliza para efectuar la mezcla aire-combustible y realizar la combustión.
- Fluxes:** son los conductos por los que circula los gases de combustión, cediendo calor al agua dependiendo del tipo de generador de vapor que se trate.
- Chimenea:** se emplea para descargar los gases de combustión y lleva en su interior un recubrimiento de refractario y por el exterior una capa de aislante para protección de los operadores.

La localización de estas partes varía dependiendo del tipo de generador de vapor que se trate (Figuras III.6.A y III.6.B)

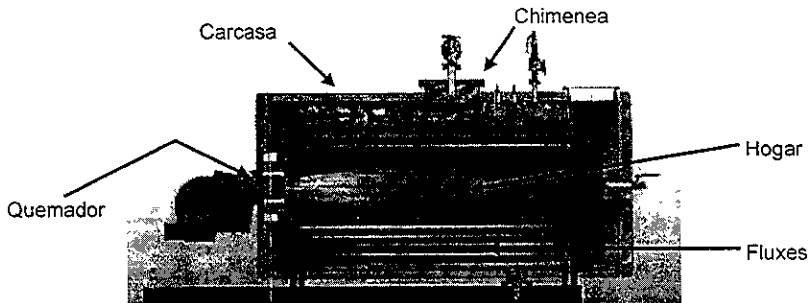


Figura III.6.A. Generador de vapor tipo pirrotubular.

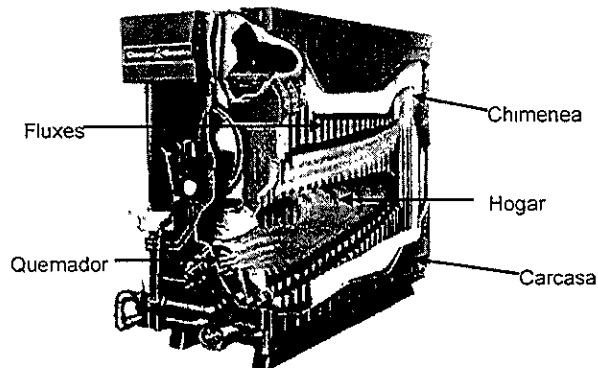


Figura III.6.B Generador de vapor tipo acuotubular.

El equipo moderno de generación de vapor requiere una gran cantidad de equipo adicional, ya sea como auxiliar para incrementar la eficiencia de operación, o bien, por las características que deba reunir el vapor. El equipo complementario varía dependiendo del tipo de generador de vapor, de la calidad y de la seguridad en la generación. Dentro del equipo complementario se encuentra el siguiente:

- Sobrecalentadores.
- Desaeador
- Sopladores de hollín
- Sistema de tiro
- Precalentadores de aire
- Economizadores
- Desobrecalentadores o atemperadores
- Recalentadores

Cuyas funciones principales son:

**Sopladores de hollín:** la escoriación y el depósito de partículas de carbón en el interior de un generador es un fenómeno que debe eliminarse para mantener una buena transmisión de calor. Para su remoción se puede utilizar vapor o aire caliente inyectándolo adecuadamente con equipo especial que se conoce como sopladores de hollín.

**Desaerador:** su función principal es eliminar el oxígeno disuelto en el agua de alimentación.

**Sistemas de tiro:** su función es proporcionar aire suficiente para lograr una buena combustión. Los generadores pueden operar con sistemas de tiro natural, de tiro inducido o de tiro forzado. En los equipo pequeños y frecuentemente de carbón alimentados manualmente, es suficiente el tiro natural producido por la chimenea para obligar al aire a entrar al hogar y seguir su trayectoria a través del equipo para salir por la chimenea. El sistema de tiro forzado inyecta aire primario con el combustible y aire secundario al horno. El sistema de tiro inducido propicia una presión reducida en el horno, al eliminar los gases calientes de combustión por medio de un ventilador, induciendo de esta manera el aire primario y secundario.

**Desobrecalentadores:** Son empleados en generadores de plantas donde el consumo de vapor saturado es alto en relación al consumo de vapor sobrecalentado. Generalmente no están integrados al equipo de generación de vapor.

**Economizadores y precalentadores de aire:** se instalan con el fin de recuperar parte del calor contenido en los gases de escape de la chimenea, minimizando pérdidas de calor.

**Sobrecalentadores:** Cambiadores de calor que tienen por objeto sobrecalentar el vapor en un generador antes de ser utilizado. Si se colocan a la salida del hogar se denominan Sobrecalentadores de radiación, o bien si se sitúan en el banco de convección se les llama sobrecalentadores de convección.

**Recalentadores:** También son intercambiadores de calor que tienen por objeto recalentar el vapor que ya ha sido expandido principalmente en una turbina. La finalidad del recalentamiento es disminuir la erosión de los alabes de la turbina, que se puede ocasionar por la humedad que puede arrastrar el vapor consigo.

### III.1.5. Usos industriales

La generación de vapor de agua participa a gran escala dentro del ámbito energético, es una rama de consumo y demanda en la que se conjunta energía primaria y energía secundaria. En la actualidad es uno de los medios más accesibles y económicos con que cuenta el hombre, ya sea para transmitir calor o bien para mover ciertos equipos.

La capacidad de generación de los generadores de vapor se establece de acuerdo a las necesidades de vapor en las plantas de proceso y servicios auxiliares en operación, indicando la cantidad de vapor que tiene que ser generado en condiciones normales, para cubrir los requerimientos de energía térmica y mecánica del centro de trabajo.

En nuestro país existen equipos de generación de vapor en las industrias del acero, eléctrica, petroquímica, del azúcar, papel y celulosa, cervecera, alimenticia y otras. Es muy significativo que la generación de vapor este presente en los 15 giros de actividad industrial más importantes desde el punto de vista energético considerando instalaciones públicas y privadas y para todos los usos del vapor.

El vapor producido por los generadores de vapor se emplea en servicios generales, comerciales, industriales y de generación de energía eléctrica. (Figura III.7. Combustion Engineering, Inc.), proporcionan la energía térmica y mecánica requerida en los miles de procesos de todas las ramas industriales.

De acuerdo a la clasificación convencional de los servicios auxiliares en una planta, el vapor esta considerado dentro de los primarios, puesto que su operación y uso es vital para la operación de la planta.

Según el uso que se le de, el vapor se puede clasificar como sigue:

1 - Vapor de generación (en plantas termoeléctricas); es vapor de alta presión 42 Kg/cm<sup>2</sup> (600 psi o más) con alto grado de sobrecalentamiento, usándose para mover turbinas y generar así energía eléctrica, o bien mover equipo mecánico como compresores, turbinas, ventiladores.

2.- Vapor de proceso (en plantas de proceso), es vapor de menor presión que el anterior 3-42 Kg/cm<sup>2</sup> (50-600 psi). Es usado ya sea en procesos de destilación por arrastre de vapor o en procesos donde se emplea como reactivo químico. Puesto que también posee cierto grado de sobrecalentamiento también se utiliza para mover equipos menores.

3 -El vapor de calentamiento no tiene contacto con el proceso principal, puede ser vapor de alta, media o baja presión (3 Kg/cm<sup>2</sup> o menos) dependiendo los requerimientos térmicos. Se usa para calentar corrientes de proceso a través de serpentines, equipos encaquetados, cambiadores de calor, etc.

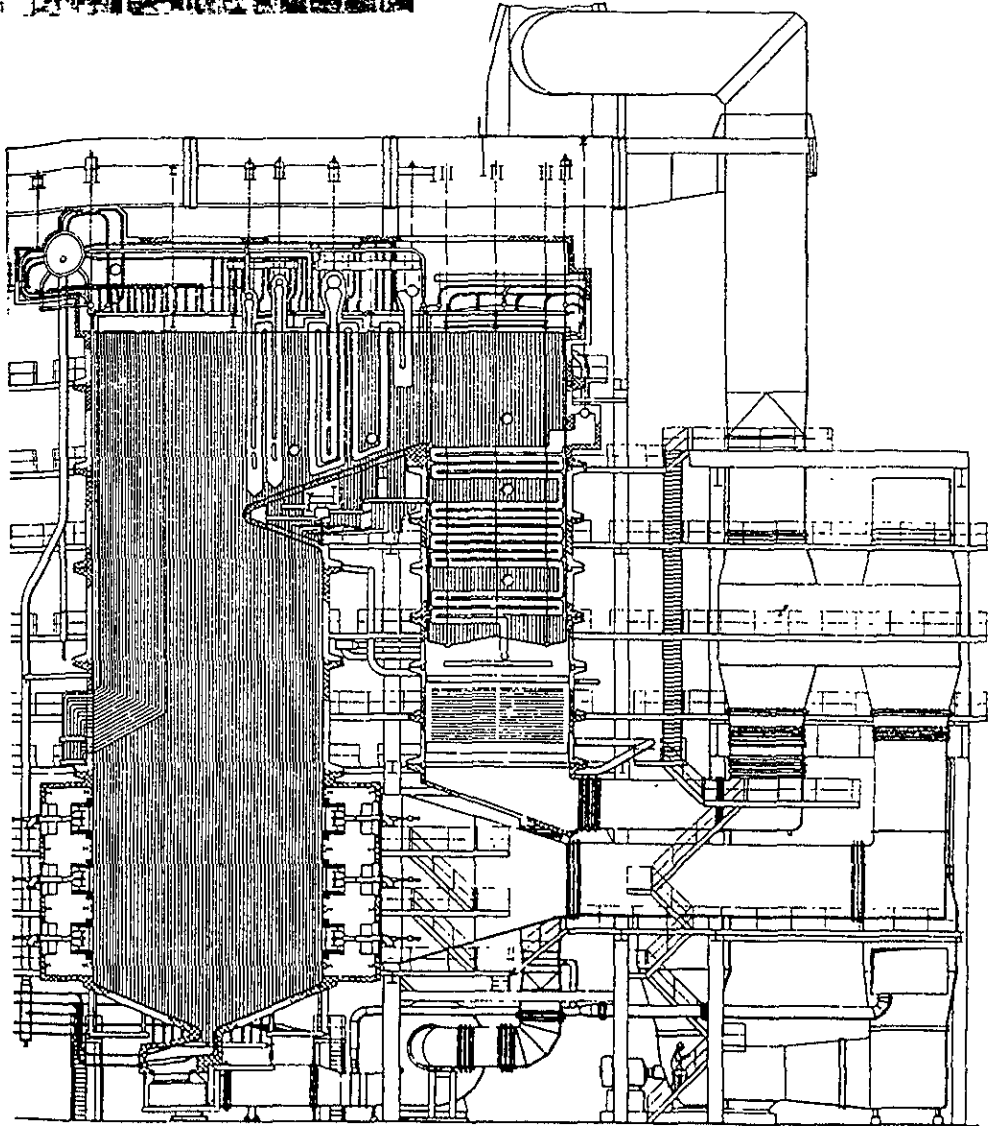


Figura III.7. Generadores de vapor en la industria eléctrica.

## III.2. CONCEPTOS GENERALES

La evaluación energética en generadores de vapor, se basa en la primera y segunda ley de la termodinámica, y tiene íntimamente ligados, principios y conceptos fundamentales que se mencionan a continuación.

### III.2.1. Transferencia de calor

**Calor** es energía transferida de un cuerpo o sistema a otro manifestado por la diferencia de temperatura entre los cuerpos o sistemas. Esta forma de energía causa un cambio físico en la sustancia que se calienta. Particularmente los líquidos cuando hierven, vaporizan y el vapor producido al entrar en contacto con una superficie de menor temperatura se condensa, entregando a dicha superficie el calor con el cual había logrado su vaporización.

### Transferencia de calor en un generador de vapor.

El flujo de calor del generador de vapor que se origina al quemarse el combustible y que es conducido por los productos de la combustión hacia el agua o el vapor, se efectúa por los tres mecanismos de transferencia de calor; radiación, convección y conducción.

La **radiación** es la transferencia directa de calor por medio de ondas electromagnéticas (energía radiante) procedente de la incandescencia del combustible o de las flamas luminosas y de los refractarios a los tubos o cuerpo del generador. La absorción radiante en un generador se realiza en el hogar y es una función de la extensión de superficie que esta expuesta al reflejo de los refractarios y a los efectos de las flamas. Figura III.8.

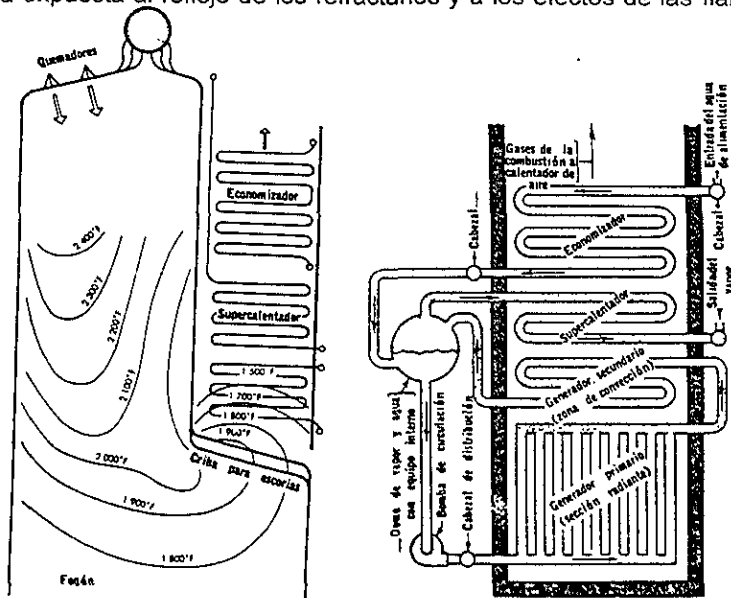


Figura III.8 Gradientes de la temperatura en la zona de radiación de un generador de vapor, hogar con fuego de descenso (Babcock & Wilcox. Co.)



La **convección** es la transferencia de calor entre un fluido (gaseoso o líquido), causada por el movimiento o agitación, que fuerza a las partículas calientes a reemplazar continuamente a las enfriadas al contacto con la superficie absorbente de calor. La convección natural o libre es causada solamente por las diferencias de densidad, que provienen del diferencial de temperatura, la convección forzada, es causada por medio de fuerza mecánica aplicada para impartir movimiento al fluido.

La **conducción** es la transferencia de calor a través de un material fijo (pared estacionaria), de una parte a otra de un mismo cuerpo o a otro cuerpo con el que esta en contacto físico, pero sin un desplazamiento apreciable de las partículas dentro de dicho cuerpo. Este fenómeno se presenta en la zona aislante del generador de vapor.

De acuerdo a lo anterior, la zona más efectiva de transferencia de calor en los generadores de vapor es la que está expuesta a radiación directa de las flamas, (altas temperaturas en el proceso de combustión), en el hogar. La superficie de calefacción sobre la que refleja el calor, es la llamada directa o radiante; la que solamente tiene contacto con los gases es llamada superficie indirecta o de convección.

Lo anterior pone de manifiesto la importancia que tiene el perfil o gradientes de temperaturas en la ruta de circulación de productos de combustión y que el desplazamiento de este perfil contará mucho en la habilidad de incrementar o reducir el calor absorbido y en consecuencia mejorar o deteriorar la eficiencia. Figura III.9

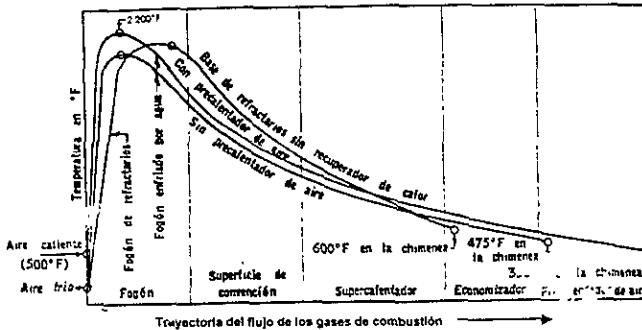


Figura III.9 Distribución característica de la temperatura de los gases en los generadores de vapor.

**Eficiencia de un generador de vapor.-** Se define como el porcentaje del poder calorífico superior del combustible que se transfiere al vapor que genera es decir la relación entre el calor absorbido y el calor liberado expresado en porcentaje

$$\text{Eficiencia} = (\text{calor salida} / \text{calor entrada}) * 100$$

**Poder calorífico superior (PCS).** - Cantidad de calor que produce una unidad de masa o de volumen de combustible durante su combustión. Considerando que la humedad presente en los gases de combustión se encuentra en fase líquida. El PCS representa la cantidad total de energía calorífica liberada en su combustión completa.

**Poder calorífico inferior (PCI).** - Es la diferencia entre el poder calorífico superior y la energía necesaria para evaporar toda la humedad presente en los gases de combustión.

### III.2.2. Vapor

El vapor es un gas debido a la evaporación de un líquido, al respecto hay diferencias para definir un gas de un vapor. En este trabajo se maneja el concepto de vapor al producto de la evaporación del agua. Las propiedades y características de los vapores se encuentran en tablas y gráficas específicas.

La generación de vapor de agua es uno de los muchos procesos industriales basados en los cambios de estado principalmente la **evaporación**, que es el cambio de un cuerpo de la fase líquida a la fase vapor. La evaporación de un líquido puede tener lugar en la superficie libre del líquido a cualquier temperatura, por ejemplo la evaporación del agua en el mar, o, en el seno mismo del líquido; por ejemplo la ebullición de un recipiente abierto que contenga agua.

La ebullición de un líquido tiene lugar a una temperatura, cuyo valor depende de la presión a la que se encuentra el líquido, mientras mayor sea la presión, mayor será la temperatura de ebullición. Por otro lado puede haber condensación, que es el cambio de un fluido de la fase gaseosa (vapor) a la fase líquida. En un generador de vapor al llegar el agua a su punto de ebullición su evaporación se produce sin cambio de temperatura pero con adición de calor. (Calor latente de evaporación suministrado por los combustibles durante el proceso de combustión). Si la evaporación no fuera completa, el vapor será húmedo y se designará con un porcentaje de calidad.

**Calidad del vapor**, es la relación del peso del fluido que esta en la fase vapor y el peso total del fluido (líquido-vapor). Por ejemplo, si una cantidad de vapor húmedo contiene 90% de vapor y 10% de humedad, se dice que la mezcla tiene una calidad de 90%.

Un **vapor húmedo** tiene al mismo tiempo la fase líquida (humedad) y la fase vapor. Su temperatura es igual a la de saturación. Para definirlo será necesario dar su presión o su temperatura y su calidad.

El calentamiento del vapor sobre su temperatura de saturación lo transforma en vapor sobrecalentado. Estos vapores tienen una temperatura superior a la de saturación y en ellos está presente solo la fase vapor. Para definir un vapor sobrecalentado hay que indicar su presión y su temperatura o bien su sobrecalentamiento, es decir la diferencia entre su temperatura y la temperatura de saturación correspondiente a su presión. Este vapor no contiene humedad y la misma condición puede conseguirse cuando el vapor saturado se somete a una reducción de presión.

Un **líquido saturado** consta solamente de la fase líquida y se encuentra a su temperatura de saturación. Los **vapores saturados**, se encuentran en una fase vapor que tiene una temperatura igual a la de ebullición, correspondiente a la presión en que se encuentra el vapor; por ello un vapor saturado queda definido por su presión o por su temperatura. La práctica común en cuanto al estado termodinámico se refiere, consiste en utilizar vapor sobrecalentado y en muy pocos casos vapor saturado como medio motriz en equipo mecánico, debido a que el vapor saturado se condensa al transformar su energía en trabajo.

### III.2.3. Combustión

La combustión empleada para obtener calor, genera energía eléctrica o movimiento, es el proceso de emisión de contaminantes más significativo; ya que se considera responsable de la mayor degradación de energía y del ambiente; y por tanto es un factor importante en un generador de vapor y se ve involucrado con el ahorro energético y la mejora ambiental.

**Definición.** La combustión es un conjunto de reacciones químicas exotérmicas que se produce entre las sustancias combustibles (carbono, hidrógeno principalmente, elementos activos de los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos) y el comburente (oxígeno contenido en el aire), resultando gases de combustión básicamente  $\text{CO}_2$  y procedente del aire de combustión  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$  así como una cantidad de calor por el efecto térmico de la reacción. Para que un proceso de combustión sea limpio implica, una mezcla apropiada de aire y combustible en proporciones exactas, considerado esto como el punto estequiométrico o relación ideal.

#### Tipos de combustión

-*Combustión neutra o estequiométrica:* se produce cuando se aporta el oxígeno (o aire) estrictamente necesario para quemar el combustible.  $\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{calor}$

- El porcentaje de  $\text{CO}_2$  es mínimo
- Es prácticamente imposible su realización por la imperfecta mezcla de aire-combustible
- Pueden aparecer inquemados (hollín) que son arrastrados por los gases, ennegreciéndolos

-*Combustión incompleta o con falta de aire:* Se produce cuando se aporta aire en cantidad insuficiente.  $2\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{CO} + \text{calor}$

- El porcentaje de  $\text{CO}_2$  disminuye
- Aparecen inquemados y  $\text{CO}$
- El ennegrecimiento del humo es elevado
- El rendimiento es inferior a la combustión neutra por efecto de los inquemados.

-*Combustión con exceso de aire:* se produce cuando se aporta mayor cantidad de aire en la combustión que en la combustión neutra.

- El porcentaje de  $\text{CO}$  disminuye al ser diluido con un mayor flujo de gases
- Aparecen pocos inquemados o ninguno
- El ennegrecimiento del humo es bajo
- El rendimiento es inferior por el calentamiento del exceso de aire hasta la temperatura de los gases

El exceso de aire en porcentaje es:

$$e = [(\text{aire suministrado} - \text{aire teórico}) / \text{aire teórico}] * 100$$

En la práctica es necesario y económico suministrar más aire de la cantidad teóricamente necesaria para asegurar una combustión completa. Se obtienen otros compuestos tóxicos en los gases,  $\text{SO}_x$  principalmente, procedentes de la combustión de elementos distintos al C e H presentes en los combustibles. La tabla III.1 muestra valores representativos con diferentes excesos de aire y combustibles.

Tabla III.1. % de CO<sub>2</sub> con diferentes combustibles

Combustible	% de CO <sub>2</sub> estequiométrico	Exceso de aire del 20%	Exceso de aire del 40%
Gas natural	12.1	9.9	8.4
Gas propano	13.9	11.4	9.6
Gas butano	14.1	11.6	9.8
Gasóleo	15.0	13.6	11.6
Combustóleo	16.5	12.3	10.5
Coque	21.0	17.5	15.0

(Molina, 1984)

### Productos de la combustión

Es de suma importancia conocer el tipo de humo que se desprende al efectuarse la combustión de cualquier combustible. Los gases de combustión son una mezcla de sustancias químicas gasificadas, cuya proporción es según el desarrollo de la combustión misma. Una composición típica de gases de combustión cuando se quema combustóleo debe contener:

CO <sub>2</sub>	Óxido de carbono
H <sub>2</sub> O	Vapor de agua
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
N <sub>2</sub>	Nitrógeno
O <sub>2</sub>	Oxígeno

El hollín también llamado combustible coquizado, es combustible no quemado o quemado parcialmente, resultado de una incompleta combustión, principalmente en combustibles sólidos y combustóleo. Se presenta en dos formas, algunas veces en forma volátil, y otras veces coquizado conocido éste como escoria. Se instalan sopladores de hollín para eliminar su presencia y de esta forma mantener en óptimo funcionamiento los equipos de generación de vapor.

### Reacciones de combustión

Sustancias combustibles	Reacción
Carbono	$2C + O_2 = 2CO$
Carbono	$C + O_2 = CO_2$
Monóxido de carbono	$2CO + O_2 = 2CO_2$
Hidrogeno	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$
Azufre	$S + O_2 = SO_2$
Azufre	$2S + 3O_2 = 2SO_3$
Metano	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + H_2O$
Etileno	$C_2H_2 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$
Etano	$2C_2H_6 + 7O_2 = 4CO_2 + 6H_2O$

**Eficiencia de combustión.**- Esta dada por la relación de energía liberada en el proceso de combustión del combustible referida a su poder calorífico superior (PCS).

**Combustibles.-** Son los principales elementos para el proceso de combustión que se realiza en los generadores de vapor, compuestos que se queman en presencia de oxígeno obtenido del aire ambiente, para producir energía térmica; en ocasiones, aire enriquecido con oxígeno. Los combustibles asociados al petróleo (gas natural) u obtenidos de su refinación (diesel, gasóleo, combustóleo, gas L.P., etc.), son los más utilizados en el área de generación de vapor; y cuyas características consideradas en este trabajo de tesis, son las siguientes:

<u>COMBUSTIBLE</u>	<u>P. CALORÍFICO INF.</u>	<u>P. CALORÍFICO SUP.</u>
GAS NATURAL	8,205 kcal/m <sup>3</sup> est. (922 Btu/pie <sup>3</sup> est)	9,113 kcal/m <sup>3</sup> est. (1,024 Btu/pie <sup>3</sup> est)
GAS L.P.	11,000 kcal/kg (19,799 Btu/lb)	11,915 kcal/kg (21,445 Btu/lb)
DIESEL	10,000 kcal/kg (18,000 Btu/lb)	10,680 kcal/kg (19,224 Btu/lb)
GASÓLEO	9,935 kcal/kg (17,250 Btu/lb)	10 500 kcal/kg (18 900 Btu/lb)
COMBUSTÓLEO	9,583 kcal/kg (17,250 Btu/lb)	10,111 kcal/kg (18,200 Btu/lb)

### Composición de los combustibles

% en peso	GAS NATURAL	GASÓLEO	COMBUSTÓLEO	GAS LP
C	86.47	86.00	83.88	82.09
H <sub>2</sub>	10.25	11.10	11.19	17.71
O <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.16	0.00
N <sub>2</sub>	3.28	1.00	0.54	0.00
S	0.00	0.80	3.71	0.00
H <sub>2</sub> O	0.00	1.00	0.50	0.00
Ceniza	0.00	0.10	0.00	0.00
Otros	0.00	0.00	0.02	0.20
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

Densidad relativa del gas natural: 0.6 (con respecto al aire)

Densidad relativa del gas L.P.: 0.56 (con respecto al agua)

Densidad del Diesel: 0.865 kg/l a 15.5 °C & 760 mm Hg

Densidad del gasóleo: 0.899 kg/l a 15.5 °C & 760 mm Hg

Densidad del combustóleo: 0.982 kg/l a 15.5 °C & 760 mm Hg

# CAPÍTULO IV

## **CAPÍTULO IV**

### **IV. TECNOLOGIA EN GENERADORES DE VAPOR**

La industria actual deberá enfrentar reglamentos más estrictos con respecto al impacto ambiental; la urgencia por recuperar la limpieza del medio ambiente ha impuesto una carga creciente para buscar, crear e innovar medios y tecnologías que permitan disminuir las emisiones contaminantes en equipos de combustión.

El desarrollo de los generadores de vapor a lo largo de los últimos años, ha desembocado en un nivel tecnológico que permite la combustión de grandes cantidades de combustible con alto rendimiento, a la vez que se ha alcanzado un conocimiento profundo de las propiedades del agua y del vapor tanto del punto de vista termodinámico como lo relativo a tratamiento de agua, incrustaciones, corrosión, etc. Por otro lado el avance de la metalurgia permite utilizar aceros y aleaciones que soportan mayores presiones y temperaturas, y que resisten mejor la corrosión. Además existen Códigos y Normas que regulan el diseño y fabricación de estos equipos, haciendo viable el control e inspección de partes críticas, de la misma forma que los niveles de seguridad alcanzados se han elevado.

La cantidad de equipos, aparatos y sistemas para el funcionamiento de un generador de vapor se encuentra en gran variedad y amplitud en el mercado. La información resumida que se presenta en este capítulo permitirá conocer de manera general que tipo de tecnología de punta es la que se ha implementado en los sistemas actuales para atacar y/o eliminar las diversas anomalías que presentan los generadores de vapor en cuanto a su operación actual. La consideración de esta información servirá como criterio para la selección acertada de los equipos y/o medidas involucrados en las alternativas de inversión y de operación; que sean resultado de la evaluación energética global del generador de vapor particularmente analizado en el capítulo VII.

#### **IV.1. GENERADORES DE VAPOR**

En la industria actual tan amplia y tan diversificada donde participan los generadores de vapor, se han dado cambios en los combustibles (de combustóleo a gas natural) empleados y, que continuarán sucediendo. Los ingenieros han estado trabajando en estos equipos con la aspiración de comercializar una tecnología capaz de proporcionar calor y fuerza al menor costo y máxima eficiencia con la seguridad y limpieza óptima.

La siguiente información que se presenta resume algunas características de la tecnología de punta que se ha aplicado a los generadores de vapor (principalmente manifestada en mejora de eficiencia), considerándolas dentro de una estandarización de los diseños y de técnicas estandarizadas de manufactura. En el anexo 7 se encuentra una lista de proveedores; que pudiera servir de referencia en caso de necesitar un análisis detallado de algún equipo por parte del lector de este trabajo, interesado al respecto.

## GENERADORES DE VAPOR TIPO PAQUETE

### Características

Forman una unidad compacta con aparatos y accesorios auto-contenidos, es armada totalmente en fábrica y equipada con (1) Quemador (aceite combustible, gas o combinado); (2) Sistema mecánico de tiro (forzado o inducido); (3) Sistema de retorno de condensado y tratamiento de agua de alimentación; (4) Aislamiento exterior (cubierta o chaqueta); (5) Material refractario; (6) Accesorios (manómetros, válvulas de seguridad, control de nivel) ; (7) Tableros de control; (8) Soplador de hollín, si está especificado; (9) Precalentador de aceite, si se necesita; (10) Tubería de interconexión e instalación eléctrica.

### Combustibles

La mayoría de estos equipos son diseñados para operar con combustibles fluidos (líquidos o gases), y casi sea eliminado el uso de combustibles sólidos que presentan complicaciones adicionales, ( equipo de manejo de combustible y la limpieza de los tubos).

### Ventajas

La responsabilidad de la unidad total es asumida por un solo fabricante. Las unidades paquete se ajustan para trabajar a su eficiencia máxima de combustión (de 83-85 %). El certificado de prueba garantiza una eficiencia del 80%. Ahorran espacio de instalación y no requieren cimentaciones complicadas. Por su automatización se adaptan fácilmente al local disponible, pudiendo emplear el vapor en plantas alejadas. Pueden ser transportados de un lugar a otro con un considerable ahorro de equipo y materiales.

### Inconvenientes

El equipo paquete no debe ser calentado más allá de la capacidad indicada en el catálogo del fabricante; ya que no son capaces de soportar sobrecargas del 200 o 300% arriba de su capacidad nominal. Las desviaciones de la construcción traen como consecuencia el aumento considerable de precio y serios retardos en el plazo de entrega. Con el empleo de quemadores y otros equipos de construcción especial, se tendrán dificultades serias en el servicio de mantenimiento.

Las características mas relevantes de los equipos en el mercado se resumen en las Tablas IV.1, IV.2, IV.3 y IV.4, las cuales fueron proporcionadas por la empresa proveedora Clayton de México S.A. de C.V.

**TABLA IV.1. EFICIENCIAS TÉRMICAS PARA EQUIPOS ACUOTUBULARES**  
(Basadas en el poder calorífico inferior de los combustibles)

MODELO	E-10/20	E-33/40	E-60	E-100	E-150/200
FLAMA	ALTA	ALTA/BAJA	ALTA/BAJA	ALTA/BAJA	ALTA/BAJA
DIESEL	85	85/86	85/86	85/86	87/88
GAS	87	88/87	86/87	86/87	88/89

(Clayton, 2000)



## IV.2. QUEMADORES

La tecnología de punta en los sistemas de combustión se ha desarrollado logrando minimizar la generación de contaminantes (NO<sub>x</sub>, CO). El monóxido de carbono es producido ya sea en combustibles líquidos o gaseosos, debido a una defectuosa regulación de aire o mezcla de aire-combustible. Su formación es siempre asumida a una inadecuada, descuidada o pobre tecnología de combustión.

Además de la tecnología, con medidas operativas se puede alcanzar reducciones significativas implementando sistemas adecuados de control y balanceando las relaciones aire-combustible en los quemadores. El exceso de aire puede reducirse lo más posible en medida de que no causen problemas de combustión inestable, corrosión e incremento de carbono no quemado. Cuando se reduce el exceso de aire la formación de NO<sub>x</sub> disminuye, pero existe un límite en el cual la formación de carbón sin quemar (monóxido de carbono) en los gases de chimenea y partículas de carbón inquemadas pueden empezar a incrementarse. El exceso del nivel de aire en este punto varía para los diferentes combustibles, diseño de los equipos y condiciones operativas.

De acuerdo al tipo de combustible que se emplee, se tendrán distintos sistemas de combustión. Los combustibles líquidos y gaseosos requieren un sistema de combustión más simple y de menores dimensiones que aquel utilizado para combustibles sólidos; ello se debe a que los combustibles como son fluidos son más fáciles de manejar aunque suelen ser más peligrosos.

La tecnología de quemadores varía de acuerdo al tipo de combustible que se trate:

- Quemadores para combustibles líquidos, donde la atomización del combustible puede usar alguno de los métodos siguientes: vapor, aire, inyección directa o centrifugación directa por conos o tazones rotatorios
- Quemadores para combustibles gaseosos
- Quemadores combinados para combustibles gaseoso y líquidos

Dentro de esta clasificación general, se mencionan los quemadores siguientes,

- Quemadores de gas
- Quemadores de diesel
- Quemadores de combustóleo
- Quemadores de gas con modulación electrónica.
- Quemadores de reducción de NO<sub>x</sub>

La tabla IV.5 presenta las características más importantes de estos quemadores que se comercializan actualmente, proporcionada por la empresa proveedora Euro Combustión de México S.A. de C.V.

TABLA IV.5. CARACTERÍSTICAS DE QUEMADORES COMERCIALES PARA GENERADORES DE VAPOR

TIPO	COMBUSTIBLE	EXCESO DE AIRE	REDUCCIÓN DE NOx	CARACTERÍSTICAS
Combustibles gaseosos	Gas a aire soplado	10-20 %	40 %	Estos quemadores con buena técnica están fácilmente por debajo del límite de emisiones
	Gas a aire aspirado	-----	No se alcanzan los valores normativos en cuanto a emisiones	Presenta valores del doble de emisión en comparación a los quemadores de aire soplado, dichas emisiones altas son debidas a temperaturas muy altas (alrededor de 2000°C) que se alcanzan en cada boquilla de gas
	Gas con modulación electrónica	15-25%	Reducir el número de arranques disminuye la carga contaminante de 20-30%.	El fraccionamiento de potencia en dos o más etapas, o mejor aún un funcionamiento de tipo modulante, reduce drásticamente (hasta en 80%) el número de arranques y paros; y también la carga de contaminantes debida a la intermitencia.
Combustibles gaseosos	Diesel	20-35%	El exceso de aire muy bajo mantienen características altamente ecológicas con respecto a la emisión de hollín, CO, CxHy y NOx (30 -40%)	El calentamiento del combustible garantiza, la potencia pequeña hasta 20,000 - 30,000 Kcal/hr con funcionamiento regular y limpio, independiente de las variaciones de viscosidad del combustible
	Combustóleo	La emulsión permite la reducción del exceso de aire 15-30%	Se estabiliza en la flama una postpolverización, que reduce el diámetro de las gotas y permitiéndoles quemarse por completo, reduciendo del 90-95% la emisión de hollín y 20-30 las emisiones de NOx	Para el combustóleo una técnica muy conocida por ahora en el aspecto ecológico es aquella de emulsión de agua. El proceso consiste en encapsular millares de pequeñas gotas de agua dentro de una gruesa gota de combustible pulverizado, tomando ventaja del efecto de rompimiento debido a su enorme incremento en volumen por la transformación a vapor dentro del cuerpo de la flama
Quemadores de reducción de NOx	Gas	Operan con una eficiencia de combustión de aproximadamente 94% y con un exceso de aire que varia entre 8 y el 25% dependiendo del hogar del generador de vapor	El quemador de bajo NOx. Mantiene a un mínimo la emisión de gases contaminantes, en base a la utilización de bajas tecnologías que combinan la optimización en la mezcla aire/combustible, flama ultra pobre y tiempo mínimo de residencia de flama. 50-60 % reducción de NOx	El sistema consiste (Figura IV.1.) en un ventilador maestro, una compuerta modulante de aire, una patentada para premezcla de aire/combustible, manifold del quemador patentado y sistema de control de flujo de combustible microajustable El aire y el gas son premezclados perfectamente en la cámara de premezcla para luego ser introducidos a la cámara de combustión (Figura IV.2). via dispositivo de premezclado pleno y finalmente al quemador.

[Eurocombustión-Clayton, 2000]

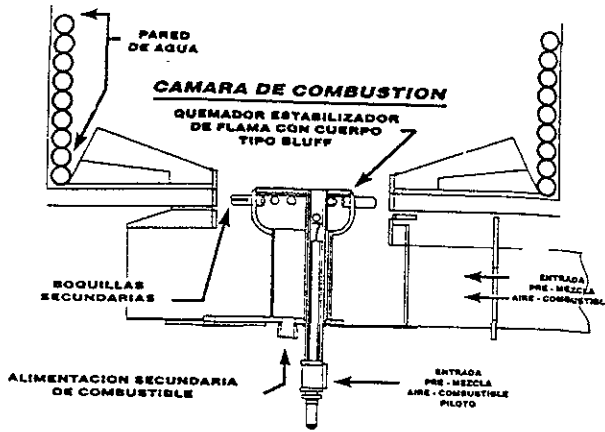


Figura IV.1. Cámara de combustión quemador de bajas emisiones de NOx

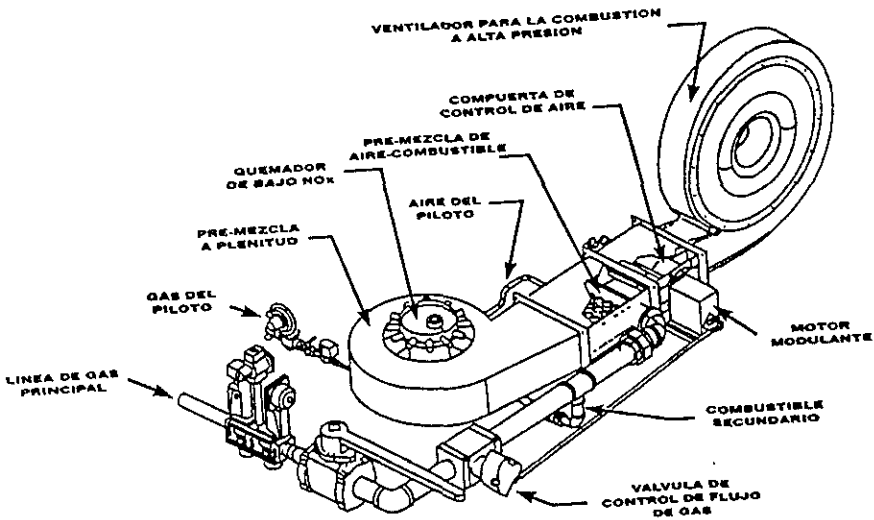


Figura IV.2. Quemador de bajas emisiones de NOx

### IV.3. EQUIPOS DE RECUPERACIÓN DE CALOR

Con la finalidad de aprovechar al máximo el calor generado por los gases de combustión en un generador de vapor, con el consecuente ahorro en combustible, es frecuente y recomendable la instalación de equipo especial para recuperación de calor, siempre que los ahorros obtenidos a través de éste justifiquen el costo del mismo. Estos equipos, que forman parte del conjunto de generación, hacen uso del calor excedente de los gases de combustión antes de que estos abandonen la unidad por las chimeneas llamados **Economizadores**, cuando se calienta el agua de alimentación y **Precalentadores**, cuando se calienta el aire de alimentación al generador

#### Generalidades

Se obtiene una economía de 1% por cada 15.6°C (28°F) de reducción en la temperatura basado en carbón de 7,210 kcal/kg y 13 % de CO<sub>2</sub>. Si se aprovecha una gran parte del calor contenido de los gases una vez que estos han abandonado las zonas de combustión del generador de vapor, la eficiencia general aumenta del 3-5%.

El equipo de recuperación de calor permite aumentar la capacidad de un equipo ya instalado o bien reducir el tamaño de una unidad por instalar para determinado rendimiento requerido.

La reducción de temperatura de los gases hasta 149°C (300°F) o menos, solamente resulta práctica mediante economizadores y precalentadores con lo cual se llega a obtener eficiencias de 88 a 90%. La temperatura a la que pueden ser reducidos los gases durante su paso a través de la unidad se determina por los factores siguientes:

- Cantidad de calor que puede ser absorbido.
- Temperatura de entrada del agua de alimentación o del aire de la combustión.
- Punto de condensación de los gases de combustión.
- Temperatura económica de salida de la cual es anulado cualquier aumento de la eficiencia debido al aumento de los costos (un precalentador, controlará la temperatura de salida bajándola al mínimo obtenible en los gases procedentes del economizador)

La corrosión externa es el principal factor que limita las posibilidades de recuperación de calor, en el diseño del equipo correspondiente. El ácido sulfúrico diluido tiene un punto de condensación de 93°C más alto que el del agua. Esta relación varía según las relaciones entre el ácido y el vapor de agua. Las mediciones de los puntos de rocío alcanzan temperaturas de 38 y 121°C, en donde los valores más altos corresponden a los carbones con mayor contenido de azufre. El coeficiente potencial de corrosión aumenta en cuanto sube el punto de rocío.

El enmohecimiento y corrosión de los precalentadores de aire aumenta generalmente cuando la temperatura del metal baja a menos de 149°C, pero a temperaturas más altas los daños son ya pequeños. Si se trabaja con combustibles con alto contenido de azufre, el límite de las temperaturas debe ser más alto

### IV.3.1. Economizadores

#### Características

En una unidad generadora de vapor, el economizador representa una sección independiente de superficie de intercambio de calor, destinada a recuperar calor de desperdicio de los gases de escape, para retornarlos en forma de calor útil al agua de alimentación, antes que esta se mezcle con el agua que circula en la caldera. Usualmente no se produce vapor en un economizador aunque se han fabricado algunos economizadores para evaporación. Un economizador típico consiste de un arreglo de tubos a través de los cuales circula el agua de alimentación antes de entrar al generador de vapor. Los gases de combustión al abandonar la superficie de convección pasan por fuera, a través del arreglo de tubos, cediendo parte de su calor al agua contenida en ellos.

#### Tipos

Los economizadores son de tipo integral o bien, tipo adyacente: El economizador integral, se caracteriza por baterías de tubos verticales localizados dentro del cuerpo de la caldera. Se usan únicamente con generadores de vapor de tubos curvos. Aun cuando el economizador integral se emplea como el último retorno, puede ser también del tipo intertubular, cuyos elementos se instalan entre los tubos de una batería de convección del generador de vapor. Esta disposición facilita un diseño sencillo compacto y económico, eliminado el costo de estructuras y soportes adicionales.

Los economizadores adyacentes, se caracterizan por su construcción de tubos horizontales, colocados en hileras cerradas, dispuestos por lo general en forma alternada; los gases de combustión fluyen transversalmente al eje longitudinal de los tubos. Entre los dispositivos propios de los economizadores adyacentes de se encuentran los siguientes (Figura IV.3):

1. Dispositivo de flujo hacia abajo, con un ventilador junto al generador de vapor.
2. Dispositivo del flujo descendente con ventilador en un nivel alto. Sistema adecuado para la construcción con tubos de subida adyacentes al generador de vapor.
3. Dispositivo de dos retornos, con ventilador colocado en el nivel superior; un diseño muy efectivo para instalaciones de menor tamaño, similar al punto 2 pero mas barato.
4. Montaje en la parte superior de los tubos de subida del generador de vapor de domo longitudinal; dispositivo destinado a la utilización del espacio disponible de altura.
5. Dispositivo de montaje en una caldera de escape gemelo, un diseño con los tubos de subida entre las salidas en que el ventilador puede ir arriba o abajo del economizador, accesibilidad máxima a la pared del generador.
6. Economizador de dos retornos, dispuesto encima de la caja principal de humo. adecuado para equipos instalados en batería con un economizador común.
7. Dispositivo de flujo descendente montado debajo de la caja principal de humo, adecuado para equipos múltiples instalados en batería con un economizador en coman, en las que se utiliza el tiro natural en los casos de emergencia

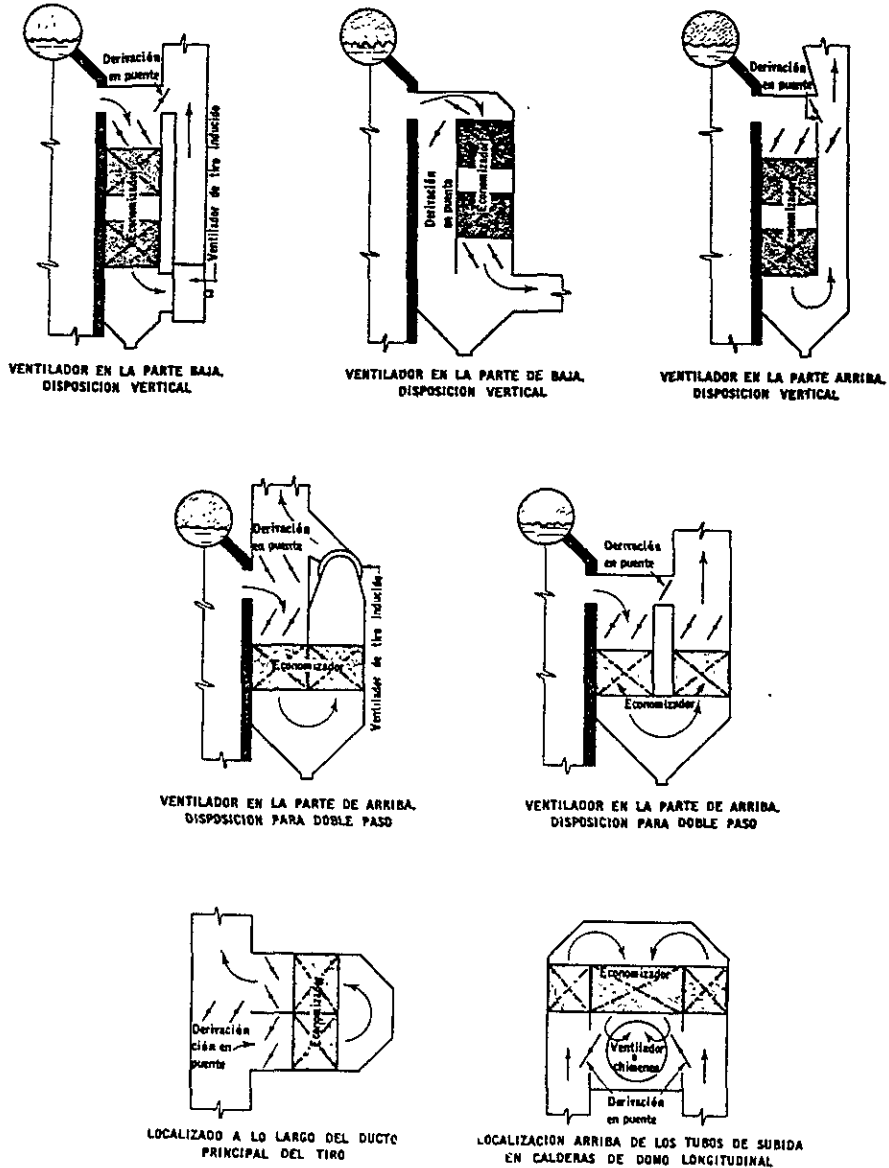


Figura IV.3. Disposición característica de los economizadores separados (sistema de doble circulación alternada ). Carl D. Shields,1982

### IV.3.2. Precalentadores de aire

Además de los economizadores, existen otros equipos que permiten la recuperación parcial del calor sensible de los gases de combustión, aún calientes, antes de que sean expulsados por la chimenea. En este caso, el calor no es absorbido por el agua de alimentación del generador de vapor, sino por el aire que se inyecta a los hornos y que será empleado para la combustión. Una precalentamiento de 56°C del aire de la combustión da por resultado un aumento del 2% en la eficiencia y lo ahorros totales de combustible atribuible al precalentamiento del aire fluctúan entre el 5 y el 10%.

El aire absorbe calor con mas lentitud que el agua y el consecuencia el calentador de aire requiere mayor superficie de calefacción, por cuyo motivo ocupa mas espacio que el economizador. A pesar de ello es de diseño mas simple y su peso es menor que el economizador.

Ventajas	Desventajas
1. La eficiencia de combustión mejora, es casi completa con menor cantidad de aire en exceso	1. El precalentamiento de aire aumenta los costos de mantenimiento de la chimenea y de los materiales refractarios del horno
2. La aceleración de la ignición permite mayor flexibilidad de carga.	2. Los depósitos de combustible que se forman puedan incendiarse
3. Un aumento en la eficiencia general del equipo permite un coeficiente mas elevado de absorción de calor, con el siguiente aumento en la producción de vapor	3. Las oclusiones pueden afectar seriamente la operación del generador.
4. Entre mayor sea el precalentamiento, menor será el contenido de SO <sub>3</sub> en los gases de escape, lográndose menor temperatura en la chimenea y un aprovechamiento menor de calor	4. Las necesidades del espacio requerido y del para el precalentador para el ventilador de tiro forzado, así como los ductos requeridos, imponen problemas de diseño que requieren un estudio cuidadoso.
5. si el total del calor recuperable es mayor que el que se puede aprovechar para el calentamiento del agua de alimentación, el calor remanente se puede emplear para calentar el aire necesario para la combustion.	5. Las fugas de aire pueden descompensar la capacidad de calefacción, necesitando el aumento de fuerza para el ventilador
	6. las fugas no se perciben usualmente, sino cuando la corrosión está muy avanzada, requiriéndose una reparación considerable o total

Las máximas temperaturas admisibles para el aire de combustión son de 150°C par hogares ordinarios, de 260 para hogares mecánicos y de 320°C para hogares de combustible liquido

Para la recuperación de calor de los gases de escape en los generadores de vapor, los precalentadores de aire mas comunes, indicados en el orden de importancia de uso son los siguientes: (1) precalentadores de aire del tipo rotatorio regenerativo, (2) precalentadores tubulares, (3) precalentadores de aire por celdas, (4) precalentadores de aire de serpentín de vapor y (5) precalentadores a base de líquidos térmicos (óxido de difenilo) La tabla IV 6 muestra algunas características de estos equipos

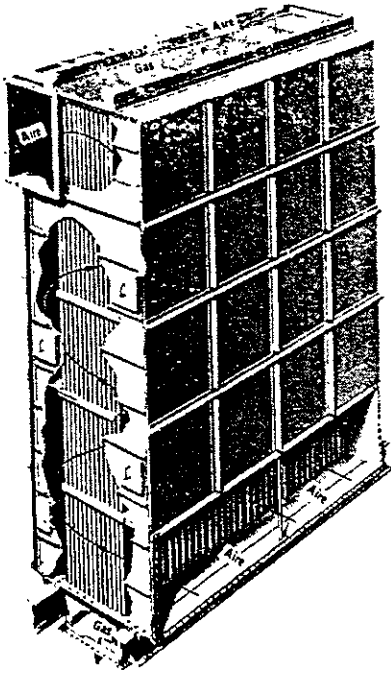


Figura IV.4. Precalentador de aire tubular. Los tubos tienen un espaciado de 13 mm (Combustion Engineering)

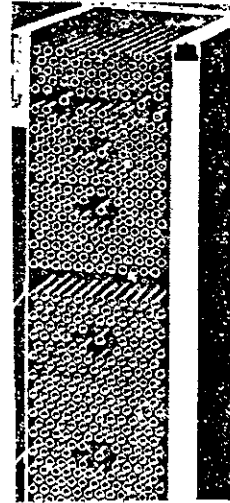


Figura IV.5. Precalentador de aire de tubos horizontales (Combustion Engineering)

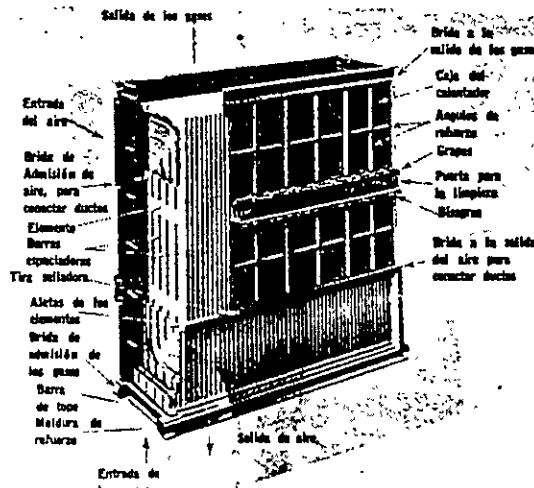


Figura IV.6. Precalentador de aire por celdas. (Combustion Engineering)



#### IV.4. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

El campo de control de generadores de vapor ha ido evolucionado desde la introducción de la electrónica y últimamente de los sistemas distribuidos digitales. El objetivo del sistema de control es proveer vapor suficiente a presión constante, en forma continua, segura y al mínimo de costo. El control debe ser lo suficientemente flexible para reaccionar a los cambios de demanda y satisfacerlos manteniendo óptima eficiencia. Los sistemas de control mejoran la eficiencia de un generador de vapor ya que las condiciones como los cambios en composición del combustible, temperatura, presión y humedad del aire, carga de la caldera mejoraran si se mejora el control de aire y combustible.

En el capítulo III se mencionaron las principales variables que intervienen en la operación de un generador de vapor, las cuales son las variables a controlar; para cada una de éstas, es necesario conocer bien el sistema de control que las involucra a fin de tener un buen funcionamiento del equipo. El mercado en sistemas de control ofrece una variedad amplia y se elige el indicado dependiendo las necesidades de operación del generador de vapor en el proceso, esto equipos podrán ser propuestos por los proveedores expertos en el funcionamiento de los mismos y considerando los requerimientos del proceso.

Aunque los sistemas de control permiten operar con eficiencia y seguridad, se debe remarcar que la revisión y mantenimiento de dichos sistemas con cierta periodicidad permitirán obtener un óptimo funcionamiento de los mismos por tiempo indefinido y operar al generador de vapor bajo control permanente.

Las principales variables a controlar en los generadores de vapor vienen siendo la temperatura, y presión del vapor producido y para controlar estas dos se hará uso del control de todas las corrientes que entran y salen al generador de vapor manteniendo un equilibrio termodinámico en el sistema

El control del generador de vapor, es una regulación de las condiciones de salida del flujo, temperatura y presión del vapor generador, de acuerdo a las condiciones deseadas. En términos de control, las condiciones del vapor de salida son llamadas variables controladas y los valores deseados de las condiciones de salida, son los puntos de ajuste conocidos como "set points" (señales de demanda de la entrada). Las cantidades de combustibles, de aire y de agua para obtener las condiciones deseadas del vapor de salida son llamadas variables de control. Los sistemas de control tiene la función de comparar los valores deseados (set points) y los valores de las condiciones del vapor en un momento dado y ajustar las variables de control para igualar las condiciones de salida a los valores deseados.

Otras variables importantes a controlar para la buena operación del generador son las temperaturas y presiones de todas las corrientes internas de recirculación y derivaciones; la composición de los gases de salida, que nos permitirá saber si la combustión se esta llevando acabo en forma parcial o completa y el contenido de exceso de aire manejado

El conocimiento preciso de todas las corrientes que se manejan y su adecuado control tomando como referencia las variables mencionadas permitirán operar adecuadamente un generador de vapor y conseguir las condiciones deseadas.

La tabla IV.7, resume el funcionamiento de los controles mas importantes en un generador de vapor, y la figura IV.10 ilustra un sistema de control en un generador de vapor.

TABLA IV.7. PRINCIPALES SISTEMAS DE CONTROL EN UN GENERADOR DE VAPOR

SISTEMA		CARACTERÍSTICAS
Control de nivel de agua en el domo de vapor	<p>Sistema de control de un elemento</p> <p>Sistema de control de dos elementos</p> <p>Sistema de control de tres elementos</p>	<p>Su función es mejorar la separación vapor/agua en el domo del generador de vapor. Los sistemas más simples usan la señal de nivel de agua como única variable para cumplir su función. El sistema de control de tres elementos es muy preciso y estable, ya que su operación está en función de la comparación del flujo de agua y flujo de vapor y corrección adicional por nivel de agua. Este sistema de control está disponible comercialmente en operación neumática, eléctrica y electrónica en versiones digital y analógica.</p>
Control de la presión del vapor	<p>1. Control maestro de presión</p> <p>2. Control maestro prealimentado</p>	<p>Se encarga de mantener constante la presión del cabezal de vapor (cabezal donde pueden descargarse uno o dos generadores), mandando una señal para aumentar o disminuir la cantidad de combustible a los quemadores para mantener la presión del cabezal constante.</p>
Control de combustión (ajuste manual aire-combustible)	<p>1. Control de combustible</p> <p>2. Control de flujo de aire</p> <p>3. Circuito de suministro y circulación de combustible</p> <p>4. Sistemas de control de combustible gas-combustible</p>	<p>El control de combustión debe suministrar suficiente combustible para liberar el calor necesario para convertir el agua en vapor, y el aire necesario para quemar completamente el combustible. Actualmente el método de control más común del régimen de combustión para satisfacer la demanda de vapor, utiliza la presión de vapor para generar la señal maestra de control que se utiliza por cualquiera de los métodos o tipos de control. La Figura IV.11, muestra conceptualmente los esquemas básicos de control de combustión.</p>
Control de la presión del horno	<p>1. Tiro forzado</p> <p>2. Tiro balanceado</p> <p>2.1 Sistema de control de presión de un elemento</p> <p>2.2 Sistema de control de presión de dos elementos</p>	<p>Los sistemas con tiro forzado usan un soplador para proporcionar la cantidad correcta de aire para la combustión. Esta cantidad de aire es controlada por el sistema de control de combustión. Los sistemas de tiro balanceado usan control para el soplador de tiro forzado y para el de tiro inducido. El control de tiro inducido remueve los gases quemados calientes para mantener una presión de 1" de H<sub>2</sub>O de vacío. El tiro balanceado se puede lograr con un sistema de control de un elemento o dos elementos.</p>
Control de la temperatura del vapor de salida	<p>1. Control de temperatura de un elemento</p> <p>2. Control de temperatura de dos elementos</p> <p>3. Control de temperatura de tres elementos</p>	<p>Existen varios métodos para controlar la temperatura de vapor pero los sobrecalentadores son el método más común usado en equipos industriales. Para controlar la temperatura se tienen los sistemas de un elemento, dos elementos y tres elementos.</p>
Control de la temperatura del aire de entrada		<p>Utilizado cuando hay precalentadores en el generador; donde la forma de controlar la temperatura del aire es mediante el uso de un bypass. Usa la temperatura, se manda a un controlador de temperatura y la salida de este controlador proporciona la posición correcta de las ventillas del bypass con lo cual se controla la temperatura del aire precalentado.</p>

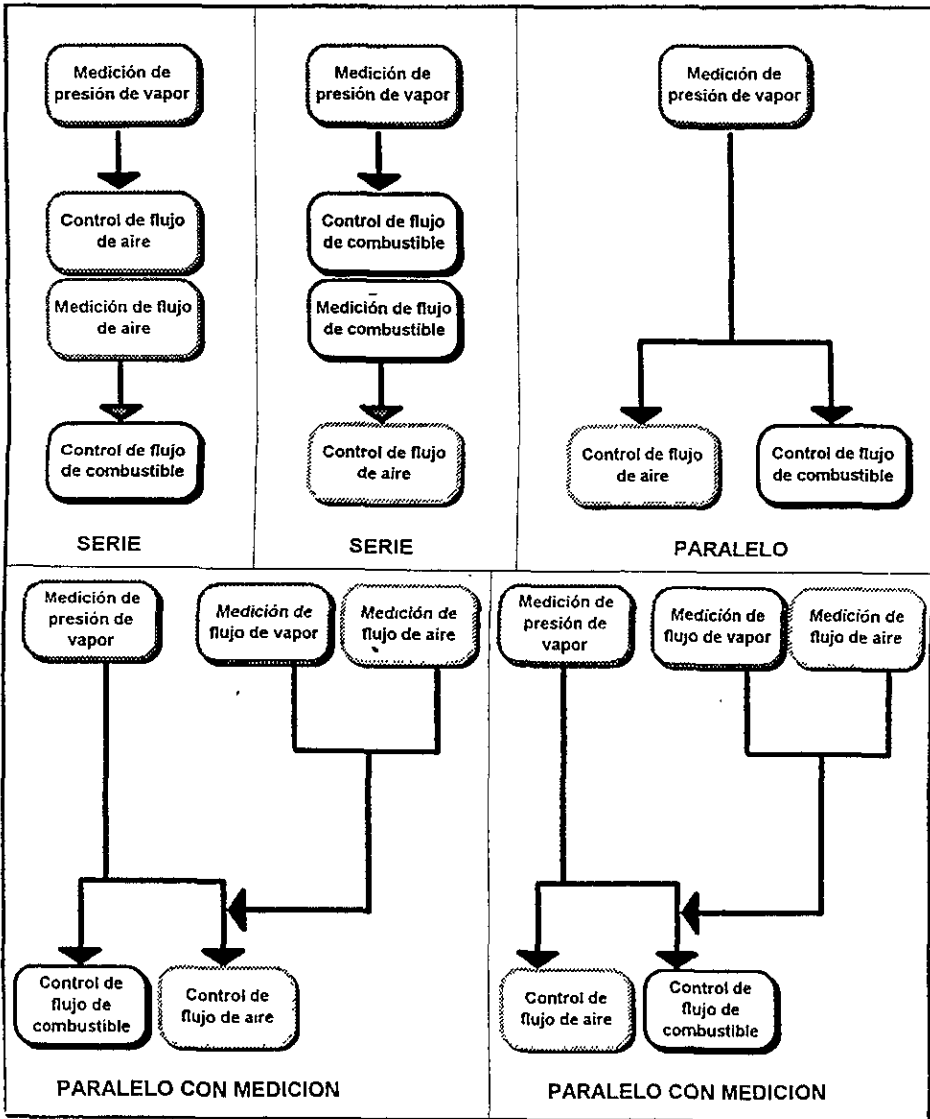


Figura IV.11. Sistemas básicos de control de combustión

# CAPÍTULO V

## CAPÍTULO V

### V. MÉTODOS DE EVALUACIÓN

La evaluación energética en generadores de vapor en operación que se realiza en este trabajo de tesis, se divide en tres análisis que establecen la emisión de los resultados y las acciones encaminadas para obtener ahorro y uso eficiente de energía en los equipo.

Evaluación energética en generadores de vapor en operación

- 1. Evaluación energética
- 2. Evaluación económica de medidas de ahorro de energía
- 3. Estimación de reducción de emisiones contaminantes

Cada evaluación se presenta por separado, para analizar sus respectivos términos, lo cual permitirá conocer las herramientas y conceptos que serán necesarios aplicar al hacer la evaluación energética global del caso particular.

#### V.1. EVALUACIÓN ENERGÉTICA

La evaluación energética se basa en determinar la eficiencia del generador de vapor de acuerdo a los dos métodos del código ASME, (American Society of Mechanical Engineers - Steam Generating. Power Test Codes PTC 4.1.)

- 1 Método indirecto (método de pérdidas de energía)
- 2 Método directo (método de entradas y salidas)

En este código se toma en cuenta el poder calorífico superior del combustible alimentado(PCS) como la principal entrada de energía al sistema. La evaluación energética tiene como propósito principal comprender como trabaja la energía en el sistema y conocer cuanta energía es aprovechada, esto último en términos del PCS del combustible. La distribución de la energía en el sistema se podrá dar a conocer gráficamente en un diagrama de "sankey" como lo ejemplifica la Figura V.1.

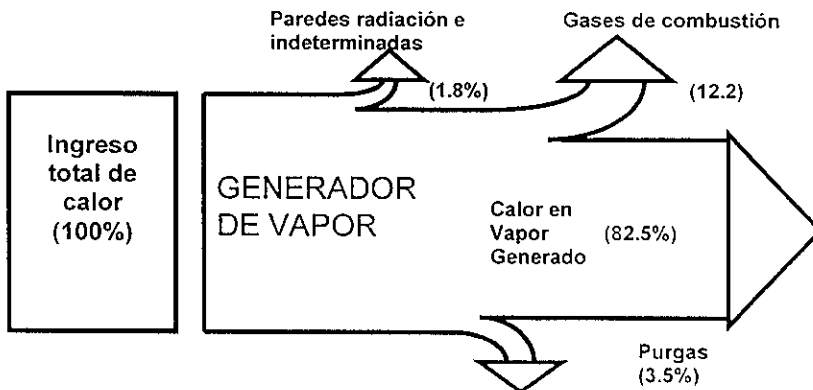
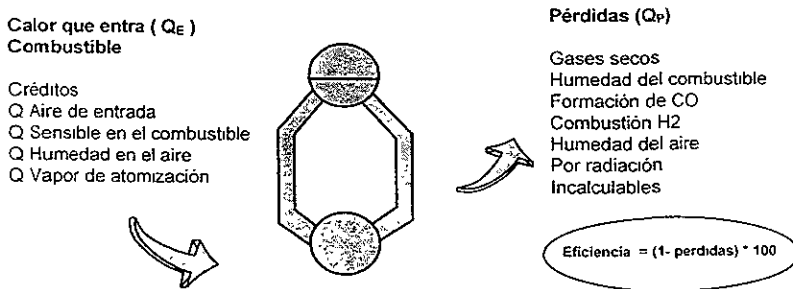


Figura V.1 Distribución aproximada del uso de la energía en un generador de vapor

### V.1.1. Método de pérdidas de energía (Método indirecto).

Este método consiste en la evaluación de las pérdidas de energía en el generador de vapor, así como la cuantificación de la energía suministrada como crédito en los fluidos que entran a él, principalmente la del combustible. Esta prueba es reconocida como estándar ya que es accesible para determinar eficiencias especialmente en industrias donde la instrumentación disponible es mínima. Para la aplicación del método de pérdidas de energía se requiere determinar lo siguiente:



**Método de pérdidas de energía:** cuantifica el calor perdido ( $Q_p$ ) en el generador para producir el vapor.

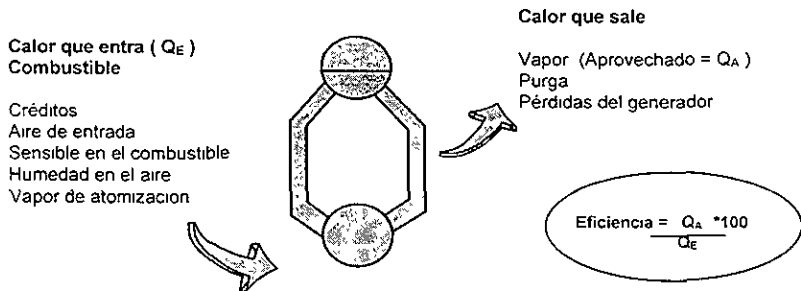
- **Pérdidas por gases secos:** se refiere a la pérdida de energía que se tiene cuando los gases son expulsados a la atmósfera con altas temperaturas, pudiendo ser utilizada esta energía en equipos de recuperación de calor. Las pérdidas por chimenea usualmente son las mayores que ocurren en la operación de un generador de vapor, al registrar la temperatura de los gases hacia la chimenea y los niveles de exceso de aire mediante análisis de gases, se calculan los calores sensibles y latentes que se van al medio ambiente.
- **Pérdidas por la humedad en el combustible:** es energía asociada a la evaporación del agua contenida en los combustibles. Depende del tipo de combustible empleado, el gas natural no contiene agua.
- **Pérdidas por formación de CO:** es energía asociada a la combustión incompleta de los combustibles, por lo que estos no ceden su energía total contenida.
- **Pérdidas por la combustión del hidrógeno:** Son pérdidas de energía asociadas a la formación de agua durante la combustión del hidrógeno.
- **Pérdidas por la humedad del aire:** son pérdidas de energía involucradas durante la evaporación del agua contenida en el aire.
- **Pérdidas por radiación:** Las pérdidas por radiación no asociadas con las condiciones de los gases de combustión pueden ser estimadas mediante el uso de la curva mostrada en la figura 5.6 del anexo 5 con precisión aceptable.
- **Por pérdidas incalculables:** Son pérdidas que no son calculables, pero que tienen un efecto en la eficiencia del sistema. Por lo general son consideradas arbitrariamente entre 1 a 3%.

Este procedimiento no toma en cuenta las pérdidas menores de eficiencia y considera despreciables los créditos por ganancias térmicas (dependiendo el combustible), considerando únicamente el calor liberado en la reacción química (PCS) del combustible como energía de entrada. Además de ser el más preciso en campo, el método de perdidas de calor, identifica exactamente donde se producen, contribuyendo así a hacer más efectivos los esfuerzos de ahorro de energía.

Este método puede designarse como el de análisis de productos de combustión ya que las pérdidas térmicas consideradas están basadas en la medición de las condiciones de los gases de combustión a la salida del generador de vapor y al análisis de la composición del combustible.

### V.1.2. Método de entradas y salidas de energía (Método directo).

En este método mide el calor absorbido por el agua y el vapor generado (salida) y se compara con la energía total dada por el poder calorífico superior del combustible (PCS) (entrada) y el consumo de combustible. Requiere una medición exacta del flujo de combustible a la entrada a sí como datos precisos de la presión temperatura, calidad y flujo de vapor, temperatura del agua de alimentación, temperatura de los gases de chimenea y temperatura del aire y otros parámetros más, para poder realizar los cálculos completos y precisos de balance térmico.



**Método directo (de entradas y salidas):** cuantifica el calor utilizado para producir el vapor.

Debido al gran número de mediciones físicas requeridas en un generador de vapor y al alto grado de incertidumbre por errores de medición, el método de entradas - salidas no es práctico en la medición de campo en donde generalmente la instrumentación de alta precisión no se tienen disponible.

Matemáticamente ambos métodos son equivalentes y dan idénticos resultados cuando se utilizan instrumentos de alta precisión y altas técnicas de prueba. Sin embargo lo más común en la practica es que las pruebas se realizan con limitaciones en la instrumentación y por tanto se emplea el método de pérdidas.

La memoria de cálculo - Anexo 2 -, establece la secuencia para determinar la eficiencia del equipo por los dos métodos.

## V.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MEDIDAS DE AHORRO DE ENERGÍA.

La evaluación económica consiste en analizar la rentabilidad de las medidas con inversión identificadas en el dictamen energético a fin de resultar atractivas a la empresa.

### V.2.1. Métodos de evaluación

Las técnicas de evaluación varían desde las muy simples en un primer nivel, tales como determinación del período de recuperación, a técnicas más complejas como análisis costo-beneficio y el método de la tasa interna de recuperación. En este trabajo de tesis los métodos de evaluación económica empleados son: el método de valor presente neto, la tasa interna de rendimiento, el período de recuperación y la razón beneficio / costo que se aplican directamente al flujo de efectivo (FNE).

Con los métodos de evaluación se obtendrán los estados financieros que son documentos que contienen la información de flujos de efectivo de la empresa. Lo que se obtendrá es la rentabilidad de los recursos utilizados para el proyecto a lo largo de la vida útil del mismo, para poder tomar la decisión de aceptarlo o rechazarlo.

Los estados financieros tienen como finalidad:

- Realizar una decisión de aceptación o rechazo del proyecto.
- Establecer prioridades en la ejecución de los proyectos en función de su rentabilidad.
- Replantear los objetivos del proyecto para buscar una alternativa más rentable.

### Valor presente neto

El valor presente neto (VPN) es el valor que se obtiene al calcular para cada año el capital que se debe tener para obtener beneficios, mostrado por los flujos netos de efectivo que se dan en la vida del proyecto, a una tasa de descuento fija determinada.

$$VPN = \sum_{j=1}^n \frac{FNE_j}{(1+i)^j} - I_0$$

Donde  
 VPN: Valor presente neto  
 FNE<sub>j</sub>: Flujo neto de efectivo al año j  
 n: número de periodos  
 i: tasa de rentabilidad

Representa una cantidad actual equivalente a los costos anuales que se tendrán durante la vida útil del equipo.

1. Considera el valor del dinero en el tiempo de acuerdo al valor de interés escogido.
2. Sitúa el valor equivalente de cualquier flujo de efectivo en un punto particular en el tiempo.

El flujo neto de efectivo se define como el total de los ingresos (ahorros obtenidos) menos el total de egresos (inversión del equipo). La metodología de cálculo se presenta en el anexo 6



## Tasa de recuperación

La tasa interna de recuperación (TIR) es la tasa de descuento que aplica a los flujos netos de efectivo esperados durante la vida útil del proyecto, reduce el valor presente neto a cero, es decir la tasa de interés más alta que el inversionista podría pagar sin perder dinero. Para calcular la TIR, se prueban varias tasas hasta encontrar aquella que haga que la suma de efectivos para el periodo sea igual a la inversión y de esta forma el VPN se haga cero.

$$\sum_{j=1}^n \frac{FNE_j}{(1+TIR)^j} - I_0 = 0$$

Donde  
 TIR: Tasa interna de recuperación  
 FNE<sub>j</sub>: Flujo neto de efectivo al año j  
 n: número de periodos  
 I<sub>0</sub>: Inversión inicial.

## Periodo de recuperación de la inversión

Esta técnica determina el tiempo en el cual el capital invertido sea cubierto por los benéficos resultantes. La medida se calcula sin tomar el valor del dinero en el tiempo.

Se calcula el tiempo en el cual la siguiente expresión se cumpla:

$$\Sigma(FNE_{\text{acumulado}}) = 0$$

## Relación Beneficio - Costo.

Relación =  $\frac{VPNB}{VPNC}$  donde:  
 VPNB: Valor presente neto de los beneficios  
 VPNC: Valor presente neto de los costos

$$VPNB = \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{(1+i)^j}$$

donde  
 VPNB: Valor presente neto de los beneficios  
 I<sub>j</sub>: Ingreso en el periodo j  
 n: número de periodos  
 i: tasa de rentabilidad

$$VPNC = \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+i)^j}$$

donde  
 VPNC: Valor presente neto de los costos  
 E<sub>j</sub>: Egreso en el periodo j  
 n: número de periodos  
 i: tasa de rentabilidad

Para realizar esta evaluación se debe efectuar una estimación de la inversión total. Esta información se utiliza posteriormente para un análisis financiero, en el cual se determina la viabilidad del proyecto. En el ejemplo práctico de evaluación (capítulo VII) se hace un estudio de factibilidad económica de aquellas alternativas con inversión propuestas considerando los términos que a continuación se describen:

## Depreciación y amortización

Se considera para el estudio la depreciación de los activos fijos y la amortización de los activos diferidos tomando una disminución en línea recta. Considerando un valor de rescate igual cero para fines de cálculo puesto que no se venderá el equipo al final de su vida útil.

## V.2.2. Procedimiento

1. Para realizar el análisis económico será necesario la siguiente información recopilada previamente, la cual podría formar parte de las políticas financieras de la empresa.
  - Tasa de rentabilidad de la empresa sobre sus proyectos de inversión (%). La tasa de rendimiento esperada por la empresa en sus inversiones. En caso de que la empresa no maneje un valor específico se considerará la tasa de interés de un instrumento financiero.
  - Periodo máximo de recuperación de las inversiones. Se define como el tiempo máximo en el que la empresa amortiza sus proyectos de inversión. La evaluación se realizará para la vida útil de la medida de ahorro de energía, en cuestión y se determinará el periodo real de recuperación.
2. Además de los datos anteriores serán requeridos para cada medida de ahorro analizada los siguientes parámetros:
  - Inversión total. Representa el costo global en dinero de la implementación de la medida de ahorro: costo del equipo, instalación, pruebas, y puesta en marcha.
  - Ahorro anual. Monto anual en dinero por concepto de la energía ahorrada.
3. De ser necesario un financiamiento se buscarán y analizarán diversas opciones valorando las diferentes tasas de interés.
4. Para la evaluación se utilizará el cálculo correspondiente, previamente programado, por lo que será recomendable reproducir las veces necesarias cada una de las medidas por separado.
6. Para realizar los cálculos correspondientes se tomarán en cuenta pesos constantes del año 2000, que deberán solicitarse a la empresa en cuestión y poder de esta forma las tendencias inflacionarias incidentes en el proyecto.
7. Los resultados finales podrán observarse en el informe final que se realice para el caso particularmente analizado.
8. Criterios de rentabilidad
  - El valor presente neto debe ser mayor a 0
  - La tasa interna de rendimiento debe ser mayor a la tasa de rentabilidad propuesta.
  - La relación beneficio / costo debe ser mayor a 1

Si la medida de ahorro cumple con las condiciones anteriores, entonces es considerada rentable y se puede recomendar su aplicación.

9. Los ahorros de combustibles (manifestados en dinero) se comenzarán a ver durante el primer año de operación, ya que durante el año cero, será la instalación, prueba y arranque del equipo.

### V.2.3. Inversión total

La inversión total se considera como la inversión en capital fijo, el cual es el capital necesario para instalar el equipo de proceso con todos los auxiliares necesarios para la operación en planta. Los costos que se incluyen bajo este concepto son: tubería instrumentación, aislamiento, cimentación, preparación de terreno, etc. Serán los costos que solamente se presentan una vez, es decir:

**Costo fijo.-** Se define ordinariamente como aquel grupo de costos de una actividad, cuyo total permanecerá relativamente constante a lo largo de la actividad operacional. (Mantenimiento, depreciación)

**Costo variable.-** Es aquel grupo de costos que varía con relación al nivel de actividad operacional. (energía eléctrica, combustible, etc.)

La inversión será dada por la suma de los siguientes factores:

- A) Costo directo
- Costo total del equipo
  - Costo de aislamiento, instrumentación y servicios auxiliares. (Si se requieren)
- B) Costo indirecto
- Costo de ingeniería de detalle y construcción
  - Costo de instalación
  - Costos de operación y arranque

$$\text{INVERSIÓN TOTAL} = A + B$$

### Financiamiento

De ser necesario se buscará un financiamiento para la compra, del equipo mediante un crédito bancario otorgado por un banco. Se propone como referencia los programas de financiamiento de Nacional Financiera, (Junio,2000) lo cual considera una tasa de interés anual de 16.75% para inversiones de 1 a 3 años; de 17.25% para inversiones de 3 a 5 años. Estas tasas no consideran el margen de la institución intermediaria.

### V.2.4. Ahorros de combustible por cambio de eficiencia

Hay una diferencia importante entre el mejoramiento en eficiencia y los ahorros en combustible, éstos últimos representan un porcentaje siempre más alto que el incremento en eficiencia, ya que reflejan el efecto del rendimiento de la caldera. Por ejemplo al mejorar la eficiencia de 80 a 81% este incremento de 1% representa aproximadamente 1 25% de los ahorros en combustible.

Los ahorros de combustibles como resultado de un cambio en eficiencia serán:

**energía empleada actualmente - energía empleada aplicando recomendaciones.**

### V.3. ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN CONTAMINANTES AMBIENTALES

Los generadores de vapor y hornos industriales son fuentes fijas e importantes de emisión de contaminantes, utilizan combustibles como gas natural, combustóleo, diesel. El impacto que cualquier planta con estos equipos impone al ambiente, debe mitigarse manteniéndolo al nivel más bajo posible. Si esto puede lograrse con una razonable relación de costo y resultados obtenidos, ésta debiera ser una línea de referencia aún para quienes tienen la responsabilidad de elaborar y promover el uso de los reglamentos.

Para la determinación de la cantidad de contaminantes presentes en una corriente de gases de escape o en el ambiente atmosférico, se requiere mucho cuidado dado que las operaciones de muestreo pueden contribuir a errores en la determinación, además resulta necesario el uso de la instrumentación sensible; puesto que la concentración del contaminante que interesa es pequeña. Se utiliza principalmente los principios de electroquímica, quimioluminiscencia y absorción infrarroja no dispersiva, visible y ultravioleta. Para la determinación de los NOx uno de los principales métodos utilizados es el de Jacobs - Hocheiser, método adoptado por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América (EPA). La medición de monóxido de carbono se realiza con mayor frecuencia empleando el principio de absorción infrarroja no dispersiva, la cromatografía gaseosa combinada con un detector de ionización de flama y la oxidación catalítica.

Para la estimación de contaminación ambiental en este trabajo se utiliza la siguiente información obtenida de EPA (Environmental Protection Agency, 1997) de Estados Unidos considerada como una aproximación de la determinación de contaminantes ambientales por emisión de gases y partículas originadas en las actividades de transformación y consumo del sector energético. Estos resultados toman como base lo siguiente:

- a). El consumo por energético de cada país.
- b). Una tabla de factores de emisión cuya fuente es "Rapid Assessment of Sources of Air, Water, and Land Pollution" de la organización Mundial de la Salud (OMS), Tabla V.3

#### Forma de cálculo

1. Se necesita conocer la cantidad de combustible que se ahorra como resultado de las recomendaciones operacionales y de inversión, en unidades de energía mediante el PCS del combustible (Kcal / h).
2. Esta cantidad de combustible debe ser manejada en unidades de BPCE (barril de petróleo crudo equivalente) mediante el factor correspondiente de la tabla 5.7 del anexo 5.

3. Conociendo el Tipo de combustible, y el giro industrial en el que es utilizado mediante la simbología que se presenta a continuación; se pueden leer el factor de la **Tabla V.3** que involucra la cantidad de contaminantes que se dejarían de emitir.
4. Con la cantidad de combustible en BPCE, y el factor conocido en el punto anterior se puede conocer la cantidad de contaminantes (Kg / ton) que se dejarían de emitir por ahorro de combustible. Las emisiones de partículas y gases se obtienen multiplicando el consumo de cada energético por el factor correspondiente.

Realizando una separación por actividades y fuentes

ACTIVIDADES	FUENTES
(CEL) Centrales eléctricas: (AUT) + Autoproductores:	GN CM DO FO GN CM DO FO
(REF) Consumo propio refinería:	PT GL GM KJ DO FO
(NAP) No aprovechado:	GN
(IND) Industrial:	PT GN CM GL KJ DO FO
(RES) Residencial: (COM) + Comercial, Ser, Pub.	GN, GL, KJ PT GN CM GL KJ DO FO
(TRA) Transporte:	GN GM KJ DO FO
(APM) Agro, pesca, minería: (COT)+ Construcción, otros:	PT GN CM GL GM KJ DO FO PT GN CM GL GM KJ DO FO

DONDE:

PT= Petróleo	CM = Carbón mineral	GM = Gasolina
GN = Gas natural	GL = Gas licuado	KJ = Kerosene y turbo
DO = Diesel oil	FO = Fuel oil	

La mayoría de las fuentes industriales de combustión no han sido examinadas directamente para establecer sus emisiones de contaminantes atmosféricos. Es decir las emisiones en tales unidades han sido simplemente estimadas por el uso de estos factores reportados a través de inventarios de emisiones derivados de factores de emisión (agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos de América) sin embargo las emisiones de las unidades de combustión son variables y dependen de las condiciones particulares de diseño, de operación y del tipo de combustible utilizado

Tabla de factores V.3.

Combustible	Actividad	Partículas	SO <sub>2</sub> --(Kg/ton)--	NO <sub>x</sub>	HC	CO	CO <sub>2</sub> Kg / BPCE
Petróleo	REF	3.00	4.00	7.50	0.40	0.55	415.63
	IND	3.00	4.00	7.50	0.40	0.55	415.63
	COM	3.00	4.00	7.50	0.40	0.55	415.63
	APM	3.00	4.00	7.50	0.40	0.55	415.63
	COT	3.00	4.00	7.50	0.40	0.55	415.63
Gas Natural	CEL	0.29	1.00	11.50	0.02	0.32	432.62
	AUT	0.34	1.00	3.60	0.06	0.32	426.75
	NAP	0.29	1.00	1.50	0.02	0.32	432.62
	IND	0.34	1.00	3.60	0.06	0.32	426.75
	RES	0.36	1.00	1.56	0.18	0.38	286.14
	COM	0.34	1.00	3.60	0.06	0.32	426.75
	TRS	0.36	1.00	3.60	0.15	0.38	286.14
	APM	0.34	1.00	3.60	0.06	0.32	426.75
	COT	0.34	1.00	0.60	0.06	0.32	426.75
Carbón Mineral	CEL	20.00	3.80	9.00	0.15	0.50	541.45
	AUT	16.25	3.80	7.50	0.50	1.00	538.24
	IND	16.25	3.80	7.50	0.50	1.00	538.24
	COM	16.25	3.80	7.50	0.50	1.00	538.24
	APM	16.25	3.80	7.50	0.50	1.00	538.24
	COT	16.25	3.80	7.50	0.50	1.00	538.24
Gas Licuado	IND	0.38	0.00	1.80	0.17	0.44	286.14
	RES	0.42	0.00	2.60	0.07	0.35	426.75
	COM	0.38	0.00	2.60	0.07	0.35	426.75
	APM	0.38	0.00	2.60	0.07	0.35	426.75
	COT	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gasolina	TRS	2.00	0.54	10.30	14.50	37.70	426.90
	APM	2.00	0.54	10.30	14.50	37.70	426.90
	COT	2.00	0.54	10.30	14.50	37.70	426.90
Kerosene y turbo	IND	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	RES	3.00	1.70	2.30	0.40	0.59	425.37
	COM	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	TRS	0.20	0.00	5.00	1.90	0.59	426.90
	APM	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	COT	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
Diesel oil	CEL	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	AUT	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	IND	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	COM	2.13	2.01	7.50	0.41	0.59	415.63
	TRS	2.40	1.90	11.00	2.60	43.50	426.90
	APM	2.40	1.90	11.00	2.60	43.50	426.90
	COT	2.40	1.90	11.00	2.60	43.50	426.90
Fuel oil	CEL	1.04	1.99	13.20	0.13	0.66	394.12
	AUT	2.87	1.90	7.50	0.37	0.52	415.63
	IND	2.87	1.90	7.50	0.37	0.52	415.63
	COM	2.87	1.90	7.50	0.37	0.52	415.63
	TRS	0.38	0.08	2.84	0.48	0.52	426.90
	APM	0.38	0.08	2.84	0.48	0.52	426.90
	COT	0.38	0.08	2.84	0.48	0.52	426.90

(FUENTE: "Rapid Assessment of Sources of Air, Water, and Land Pollution")

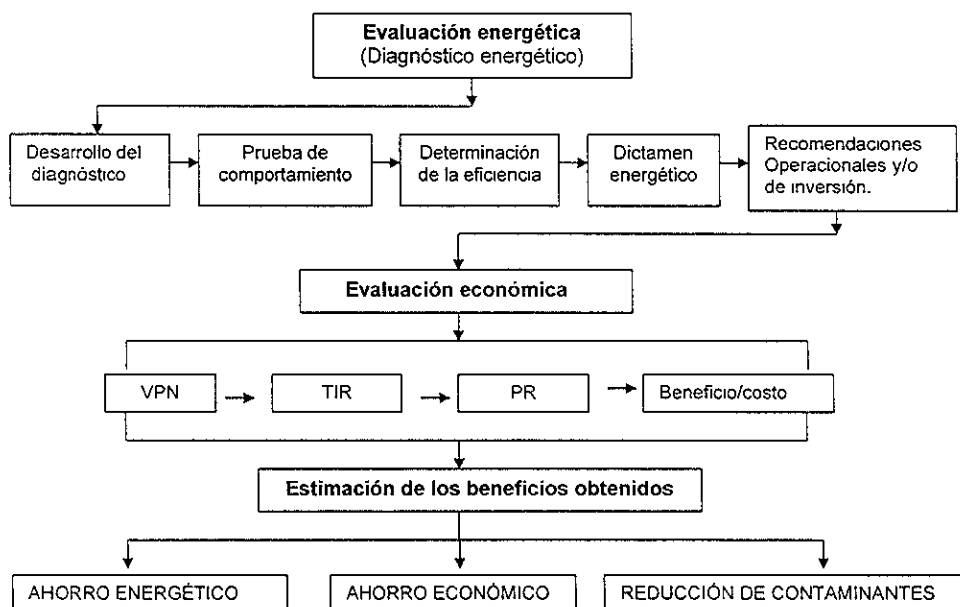
# CAPÍTULO VI

## CAPÍTULO VI

### VI. DIAGNOSTICO ENERGÉTICO

La definición de los potenciales de ahorro y las acciones que se requieren para alcanzarlos se denomina diagnóstico energético. En éste se analizan y determinan balances de energía y masa y se cuantifican todas las posibles pérdidas y la eficiencia o rendimiento del generador de vapor. La definición de las medidas viables debe garantizar su rentabilidad económica al aplicarse y la recuperación de cualquier inversión o gasto en el período más corto posible. Los resultados deben orientarse también al seguimiento que hay que hacer para concentrar esfuerzos en las unidades, plantas o departamentos de índices altos de consumo, así como zonas problemáticas o de desperdicio potencial. No sólo son importantes las cifras de ahorro sino también la organización para lograrlas.

El diagrama siguiente muestra de manera secuencial la forma en que se realiza la evaluación energética del equipo de generación de vapor; ejemplificándolo en el capítulo VII de este trabajo de tesis.



En este capítulo se muestran los pasos a seguir para cuantificar la eficiencia térmica de un generador de vapor, abarcando los conceptos elementales de operación y pruebas de la planta con la finalidad de identificar las fuentes que originan las pérdidas de energía en el equipo.



## VI.1. DESARROLLO DEL DIAGNÓSTICO

Los propósitos del diagnóstico energético en generadores de vapor se reducen a:

- *Evaluar las condiciones actuales de operación del sistema.*
- Establecer potenciales de ahorro de energía para el generador de vapor en función de la comparación de sus características de diseño con las de operación.
- Recomendar modificaciones operacionales, técnicas y económicamente viables que permitan mejorar la eficiencia en la generación de vapor.

Para alcanzar tales objetivos, se desarrollarán actividades secuenciales mostradas en Figura VI.1. Es importante que la realización de cada una de estas etapas sea en forma sucesiva, es decir, no se podrá iniciar la siguiente etapa si no se ha terminado con la anterior.

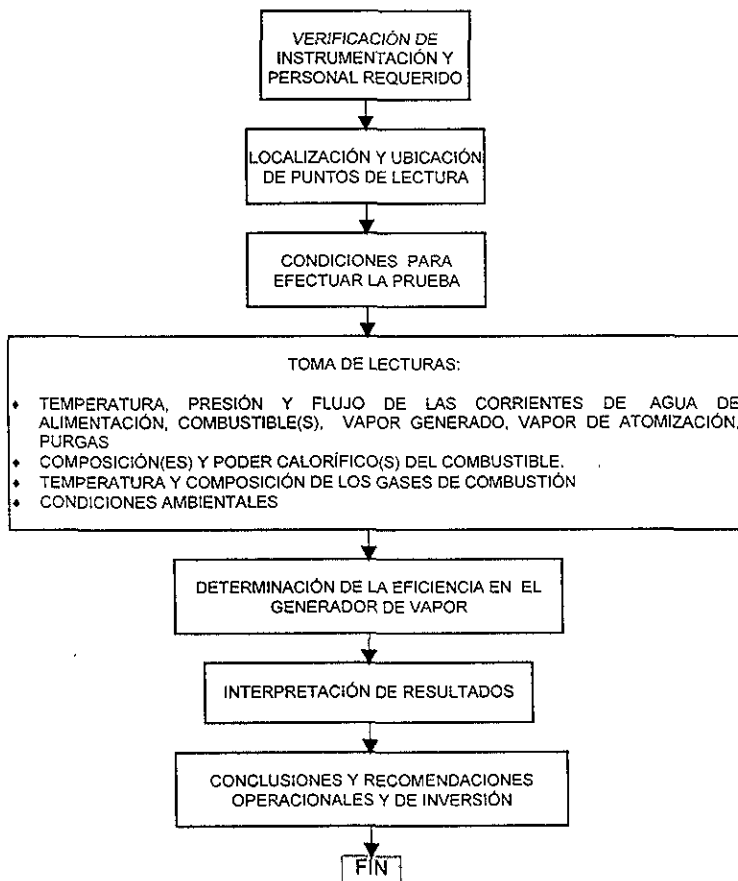


Figura VI.1. Secuencia del diagnóstico energético en generadores de vapor.

Es necesario contar con la instrumentación para medir las variables necesarias del equipo de generación de vapor para poder realizar un diagnóstico energético confiable. Las mediciones a realizar en generadores de vapor son las siguientes:

Presión :	Mediante un manómetro localizado en la tubería de fluido de proceso, para la medición de agua de alimentación y vapor generado.
Temperatura	Es necesario contar con termómetros calibrados para tomar la temperatura del agua de alimentación, vapor generado, de los dos combustibles, gases de combustión, temperatura del aire ambiente, y vapor de atomización.
Flujo :	Mediante un equipo de medición de flujo instalado como placa de orificio, en las corrientes de agua de alimentación, vapor generado y combustibles.
Bulbo húmedo	Es necesario contar con un psicrometro para tomar la temperatura de bulbo húmedo del aire.
Composición, Poder Calorífico, Densidad Relativa y Capacidad calorífica de los combustibles:	Es necesario contar con la especificación del proveedor del combustible o bien mediante el análisis de éstas variables.
Composición de los gases de combustión:	Mediante el equipo de análisis de gases de combustión para determinar el contenido de $O_2$ , $CO_2$ y $CO$ .

## VI.2. PRUEBA DE COMPORTAMIENTO. (RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN)

Deberán ser requeridos los siguientes datos generales del equipo en estudio:

- Número de la caldera
- Condiciones de operación
- Datos de la caldera
- Uso de vapor generado.
- Otros datos relevantes

El conocimiento previo al nivel de gabinete de la información anterior, permitirá tener una visión inmediata y suficiente del sistema próximo a evaluar. Se procederá a una recopilación de información detallada del equipo, la cual será mucho más redituable y efectiva por el hecho de conocer e inferir de antemano, la función y características operacionales del equipo en estudio.

La recopilación de información detallada de diseño y operacional del generador de vapor en campo, consiste en lo siguiente:

### VI.2.1. Localización e integración de documentos de diseño.

- Hojas de datos del generador de vapor, generada o proporcionada por el proveedor de equipo.
- Dibujo o plano del arreglo general de la caldera. También suministrado por el proveedor del equipo.
- Diagrama de tubería e instrumentación del equipo. Elaborado durante el desarrollo de la ingeniería.
- *Diagrama de flujo del proceso del cual la caldera es parte. Documento elaborado durante el desarrollo de la ingeniería de la instalación.*

### VI.2.2. Levantamiento y recopilación de datos operacionales.

- Requerimientos térmicos de las plantas de proceso.
- Mediante el empleo del formato **Figura VI.2** se recabará información de bitácora operacional, referidos a las variables termodinámicas:
  - ◆ Combustible
    - Tipo
    - Temperatura(°C)
    - Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
    - Flujo (ton/h)
    - Densidad Relativa
    - Poderes caloríficos superiores (kJ/Kg)
    - Capacidades caloríficas (kJ/kg°C)
    - Composición (% en mol y % en peso)
  - ◆ Aire para la combustión
    - Tbs (°C)
    - Tbh (°C)
    - Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
    - Altitud
    - Humedad
  - ◆ Gases de Combustión
    - Temperatura (°C)
    - Contenido de oxígeno (% en volumen)
    - Contenido de dióxido de carbono (% en vol.)
    - Contenido de monóxido de carbono (ppm)
  - ◆ Purga
    - Temperatura (°C)
    - Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
    - Flujo (ton/h)
  - ◆ Agua de alimentación
    - Temperatura(°C)
    - Presión (kg/cm<sup>2</sup>)
    - Flujo (ton/h)
- Estas variables se obtendrán de la prueba de comportamiento del generador de vapor realizada como lo recomienda el Código ASME (The American Society of Mechanical Engineers. Steam Generating Units, Power Test Codes 4.1), descrito en el anexo 3 de este trabajo de tesis.

### VI.3. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR.

Este punto consiste en el cálculo de la eficiencia del *generador de vapor con la información* recabada de las variables mencionadas en el punto anterior; utilizando para ello los métodos de cálculo aprobados por el código ASME:

#### VI.3.1. Método indirecto (Método de pérdidas de energía).

Este método consiste en la evaluación de las pérdidas de energía en el generador de vapor, así como la cuantificación de la energía suministrada a éste como son la energía del combustible y la energía de los créditos. Éste es el método recomendado.

Para la aplicación del método de pérdidas de energía, se requiere determinar el total de pérdidas de energía:

Perdidas de energía:	Total de energía que entra al generador de vapor
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por gases de combustión.</li> <li>• Por la humedad en el combustible</li> <li>• Por formación de CO.</li> <li>• Por la combustión del hidrógeno.</li> <li>• Por la humedad del aire</li> <li>• Por pérdidas de incalculables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor que entra con el combustible.</li> </ul>

La eficiencia se cuantifica mediante la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia} = (1 - \text{pérdidas}) * 100$$

#### VI.3.2. Método directo (Método de entradas y salidas).

Este método consiste en la cuantificación de la energía suministrada a la caldera, y cuanta de esta energía es aprovechada para la generación de vapor. Para la aplicación del método de entradas y salidas de energía se requiere determinar lo siguiente:

Total de energía suministrada:	Energía aprovechada en el vapor.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Créditos:             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Calor en el aire de entrada.</li> <li>◆ Calor sensible en el combustible.</li> <li>◆ Calor en el vapor de atomización</li> <li>◆ Calor que entra con la humedad del aire</li> </ul> </li> <li>• Calor que entra con el combustible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representa la energía ganada por el vapor (energía del vapor menos la energía del agua de alimentación)</li> </ul>

La eficiencia se cuantifica mediante la siguiente expresión.

$$\text{Eficiencia} = (Q \text{ aprovechado} / Q \text{ suministrado}) * 100$$

La memoria de cálculo se presenta en el anexo 2 al final de la tesis.

#### **VI.4. DICTAMEN ENERGÉTICO**

Con base a los datos recopilados durante la prueba de comportamiento en esta sección se dará el dictamen energético actual del generador de vapor a partir de los datos recopilados de diseño y de la evaluación energética: prueba de comportamiento, así como de la determinación de la eficiencia actual del generador de vapor.

El dictamen energético del generador de vapor consiste en comparar la eficiencia de diseño, con la eficiencia obtenida, a través de un balance de energía realizado con los datos registrados durante la prueba de comportamiento en campo. Se elabora una tabla de comparación entre valores de diseño y prueba. A partir de este valor se pueden determinar los potenciales de ahorro de energía en el generador de vapor.

#### **VI.5. RECOMENDACIONES OPERACIONALES Y/O DE INVERSIÓN**

A partir del levantamiento de información, el cálculo de la eficiencia del generador de vapor y conforme al dictamen energético elaborado, se darán las recomendaciones y sugerencias operacionales para eficientizar energéticamente el equipo. Las recomendaciones operacionales variarán dependiendo de cada caso particular. Se definirán cada uno de los potenciales de ahorro de energía y las medidas por aplicar dividiéndose en dos apartados: aquellas que no requieran inversión e involucren solo modificaciones a la operación o ajustes menores a los equipos existentes, y las que necesiten de una inversión.

En el caso donde se den recomendaciones de inversión es necesario considerar los puntos descritos el capítulo V referente a la evaluación económica y realizar un análisis de factibilidad técnico - económica donde se comparan principalmente los beneficios que se obtengan por implementar esta recomendación: la inversión que requiera y el tiempo que tarde en recuperarse.

Para cada una de las medidas de ahorro de energía que se hayan definido para el caso particularmente analizado, se realizará el análisis económico para integrar una cartera de proyectos viables que se someterán a consideración de la empresa en cuestión y permitirán formular un plan de acción.

#### **VI.6. EVALUACIÓN DEL AHORRO Y BENEFICIOS OBTENIDOS**

Esta parte se refiere a la cuantificación de los ahorros que se obtendrán al aplicar las recomendaciones, consecuencia del plan de acción que tome el comité de ahorro de energía de la planta, es decir, representan los posibles potenciales de ahorro que se tienen no sólo por la mejor operación de la caldera; completar, reparar y sustituir el aislamiento; y reparación y eliminación de fugas en el sistema de distribución y en trampas de vapor, si no que también existen beneficios económicos obtenidos por un menor consumo de combustible y de agua de reposición al sistema, así como reducción de emisiones contaminantes.

## CAPÍTULO VII

## CAPÍTULO VII

### VII. EJEMPLO PRÁCTICO DE EVALUACIÓN

#### VII.1. INTRODUCCIÓN

La evaluación energética de un generador de vapor se llevó a cabo en las instalaciones de una empresa Petroquímica; con el objetivo de identificar potenciales de ahorro de energía, así como las medidas correspondientes para su aprovechamiento.

La empresa Petroquímica tiene como función principal la producción de Acrilonitrilo, para poder llevar a cabo de forma eficiente, segura y confiable su operación, requiere del suministro de los principales servicios auxiliares tales como:

- Vapor
- Gas combustible
- Agua de enfriamiento
- Electricidad

La generación y el suministro de vapor a la planta de proceso se realizan de la forma siguiente:

- Mediante la recuperación de calor producto de la reacción en la planta de acrilonitrilo.
- Y mediante la operación de uno de los dos generadores de vapor, el cual complementa los requerimientos de vapor demandado en el proceso.

#### VII.1.1. Sistema analizado

Se definió por parte de las autoridades de la empresa evaluar el generador de vapor BH-901 A, cuyos datos principales de diseño son:

<b>Año de manufactura</b>	1978	<b>Tipo de vapor</b>	Sobrecalentado
<b>Tipo de generador</b>	Acuotubular	<b>Flujo (ton/h)</b>	35
<b>Capacidad (MJ/s - MMBtu/h)</b>	25.5 - 87.0	<b>Temperatura (°C)</b>	345
<b>Combustible</b>	Gas Natural	<b>Presión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	42
<b>1 Quemador semiautomático</b>	36% exceso aire	<b>Eficiencia térmica</b>	72

Tabla VII.1. Datos principales de diseño del generador de vapor BH-901-A.

## VII.2. EVALUACIÓN ENERGÉTICA

La evaluación energética del generador de vapor se llevó a cabo de acuerdo a la estructura metodológica de evaluación, descrita en el diagnóstico energético. Esta evaluación se realizó con el apoyo del personal técnico del centro de trabajo durante el mes de noviembre de 1999.

### VII.2.1. Prueba de comportamiento.

El levantamiento de información del generador de vapor BH-901-A durante la prueba de comportamiento se obtuvo aplicando el formato del capítulo 6, cuyos valores promedio resultados de las pruebas realizadas y requeridos en el cálculo de la eficiencia del generador de vapor; se muestran a continuación.

Corriente	FLUIDOS Y PARÁMETROS	UNIDADES	LECTURAS
Vapor generado	Flujo	ton/h	20
	Temperatura	°C	350
	Presión	kg/cm <sup>2</sup>	35
Agua de alimentación	Flujo	ton/h	20
	Temperatura (a calderas)	°C	100
	Presión	kg/cm <sup>2</sup>	38
Aire para la combustión	Presión barométrica	kg/cm <sup>2</sup>	0 796
	Temperatura bulbo seco	°C	15
	Temperatura bulbo húmedo	°C	9
Datos de combustible	Tipo		Gas natural
	Flujo @ Cond. Std 15.5 °C y 1 atm	m <sup>3</sup> /h	1,200
	Temperatura	°C	15
	Poder calorífico superior (std)	kcal/ m <sup>3</sup>	9200
Gases de Combustión	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	%	7.9
	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	%	8.46
	Monóxido de carbono (CO)	ppm	0
	Temperatura	°C	350

Tabla VII.2. Datos principales de operación del generador de vapor BH-901-A.

### VII.2.2. Determinación de la eficiencia actual de operación del generador de vapor BH-901-A.

Con base a la información recopilada, se procedió a calcular la eficiencia de operación actual del generador de vapor BH-901-A, empleando el método de pérdidas de acuerdo con el código ASME Power Test Code (Test Code for Steam Generating Units). La Tabla VII.3. muestra los resultados obtenidos de la eficiencia de operación actual del generador de vapor BH-901-A por el método de pérdidas. Las figuras VII.1 y VII.2, indican la distribución energética a condiciones actuales de operación en el generador de vapor BH-901-A.



ENERGÍA SUMINISTRADA			
	kJ/s	MMBtu/h	Porcentaje
Energía que entra en el combustible	19,863	67.78	100.00
Energía que entra en los créditos (aire, calor sensible del combustible)	0.0	0.0	0.0
<b>Total de energía suministrada</b>	<b>19,863</b>	<b>67.78</b>	<b>100.00</b>
DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA			
Pérdidas de energía	kJ/s	MMBtu/h	Porcentaje
Por gases secos	2,679	9.14	13.49
Por formación de CO	0	0	0
Por la combustión del hidrógeno	2,458	8.39	12.38
Por la humedad del aire	36	0.12	0.18
Por radiación	218	0.75	1.1
Incalculables	199	0.68	1.0
<b>Total de energía pérdida</b>	<b>5,590</b>	<b>19.08</b>	<b>28.14</b>
<b>Energía ganada por el vapor</b>	<b>14,273</b>	<b>48.70</b>	<b>71.86</b>

Tabla VII.3. Resumen de resultados obtenidos de la eficiencia de operación actual .

Eficiencia ( $\eta$ )	%	Exceso aire %
Diseño	72	36
Operación	71.86	54

Tabla VII.4. Comparación de la eficiencia del generador de vapor BH-901-"A"

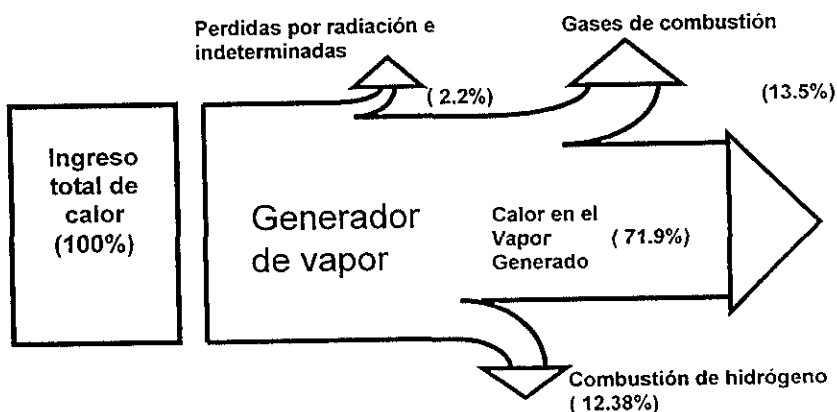


Figura VII.1. Distribución de la energía en el generador de vapor evaluado.

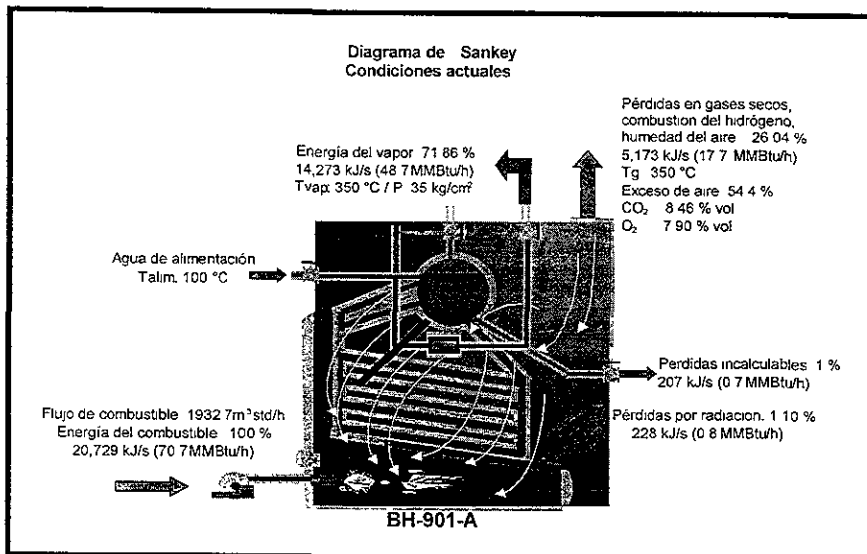


Figura VII.2. Diagrama de Sankey para la distribución de la energía en el sistema.

### VII.2.3. Dictamen energético

Del análisis de la información se determinaron las siguientes medidas de ahorro:

#### A) Medidas operativas

- Ajuste en el exceso de aire

De acuerdo con los valores reportados en las composiciones de oxígeno 7.9 % y dióxido de carbono 8.46 %, se determinó que el exceso de aire en el generador es del 54 % superior a lo establecido en la norma **NOM-085-ECOL-1994**. Es necesario realizar una serie de mediciones en los gases de combustión para determinar el exceso de aire que actualmente maneja el generador, ya que de los valores proporcionados de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> presentan una desviación con respecto a los valores estequiométricos (O<sub>2</sub> 7.9 y CO<sub>2</sub> 7.44 a un 54% exceso de aire y una eficiencia del 70%) para así ajustar al diseño original del quemador, cuyo exceso de aire de diseño es 36% y disminuir de esta forma las pérdidas de energía en los gases de combustión.

Si el ajuste del exceso de aire de 54%(operación) a 36% (diseño) no pudiera realizarse de forma total y solo alcanzar un ajuste mínimo (50-45%) que dependerá de la vida útil del equipo; se analizan y se ponen a consideración de la empresa las siguientes medidas de ahorro que requieren inversión, a fin de encontrar la mejor alternativa para eficientar el sistema

## EVALUACIÓN ECONÓMICA.

### VII.3.1. Medida: Sustitución del quemador actual por uno de bajo exceso de aire

#### Acción concreta

Reducir el exceso de aire en el generador de vapor sustituyendo el quemador por uno de bajo exceso de aire y alto rendimiento

#### Antecedente

El generador de vapor evaluado opera con un exceso de aire de combustión muy alto (54%). Este exceso se puede disminuir hasta 10% con la instalación de un quemador de alto rendimiento y bajo exceso de aire que maneja un porcentaje de O<sub>2</sub> de 2% y CO<sub>2</sub> de 10.82%

Para evitar la presencia de humo negro en la chimenea del generador de vapor, generalmente se aumenta el aire de combustión. Un mayor exceso de aire sólo sirve para enfriar la llama y aumentar el volumen de gases producidos, los cuales tienen que ser evacuados a mayor velocidad, traduciéndose ambos aspectos en ineficiencia.

#### Beneficios

Para mostrar los beneficios obtenidos al aplicar esta medida de ahorro de energía se calcula primero la eficiencia del generador de vapor, el exceso de aire y el consumo específico de gas natural (m<sup>3</sup>std/h) bajo las condiciones actuales de operación. Posteriormente se calculan estos mismo parámetros cambiando únicamente los valores del análisis de gases (CO<sub>2</sub> 10.82%; O<sub>2</sub> 2%, anexo 5) y manteniendo constantes las demás variables y de esta forma se puede determinar los ahorros obtenidos. **Tabla VII.6.**

Parámetro	Condiciones actuales de operación	Reducción de exceso de aire por sustitución del quemador
Eficiencia %	71.86	75.02
Consumo de combustible (m <sup>3</sup> std /h)	1933	1852
Exceso de aire %	54 (O <sub>2</sub> de 7.9% y CO <sub>2</sub> de 8.46%)	10 (O <sub>2</sub> de 2% y CO <sub>2</sub> de 10.82%)
Potencial de Ahorro energético (m <sup>3</sup> /h) / (m <sup>3</sup> /mes)	-	81 / 58,320 (4.2% de ahorro)
Ahorro económico (\$/mes)	-	50,781
Disminución de CO <sub>2</sub> (Ton/mes)	-	112

**Tabla VII.6.** Beneficios obtenidos por la implementación de un quemador de alto rendimiento y bajo exceso de aire.

### VII.3.2. Medida : Instalación de un precalentador de aire

#### **Acción concreta**

Instalar un precalentador de aire de tipo tubular en el generador de vapor para precalentar el aire de alimentación

Esta acción requiere diseñar un equipo con características específicas, cabe remarcar, que si esta alternativa es seleccionada, considerando la evaluación representativa que aquí se presenta, será necesario realizar un análisis más detallado y riguroso con la asesoría de expertos en el área; ya que el balance energético para el diseño del equipo que se propone en el anexo 4 de acuerdo a la Figura VII.3, podría ser modificado de acuerdo a los criterios de expertos.

Para los fines prácticos en este trabajo de tesis, la evaluación económica que se hace de esta alternativa tiene como objetivo ejemplificar los métodos de evaluación de proyectos, y compararla con la evaluación económica de la medida anterior.

#### **Antecedentes**

La temperatura de gases de combustión del generador evaluado en operación es de 350°C.

Se puede recuperar gran parte de esta energía precalentando el aire de alimentación. Los equipos tubulares están especialmente diseñados para aplicaciones donde se desee recuperar calor contenido en los gases de escape. Su disposición puede ser tanto horizontal como vertical y su construcción puede ser realizada parcial o totalmente en acero inoxidable, implicando costos considerables. A pesar de esto es considerado en esta evaluación como una alternativa por el grado de mejoramiento esperado y ha de ser evaluada económicamente para ver la factibilidad de la misma.

Deben ser considerados dentro del capital de la inversión los costos iniciales y de funcionamiento de un ventilador para el tiro inducido y de otro para el tiro forzado. El primero es necesario para la reducción de la temperatura de los gases en el conducto de humos disminuirá sensiblemente la intensidad del tiro y el segundo se necesita para forzar el aire a través del calentador y los conductos hacia el hogar.

El aire expansionado creará mayor temperatura en el hogar, acelerará la combustión y la transmisión de calor, aumentará el tanto por ciento de CO<sub>2</sub> y hará subir la producción de vapor a una cifra que no podría conseguirse sin el precalentamiento

#### **Beneficios**

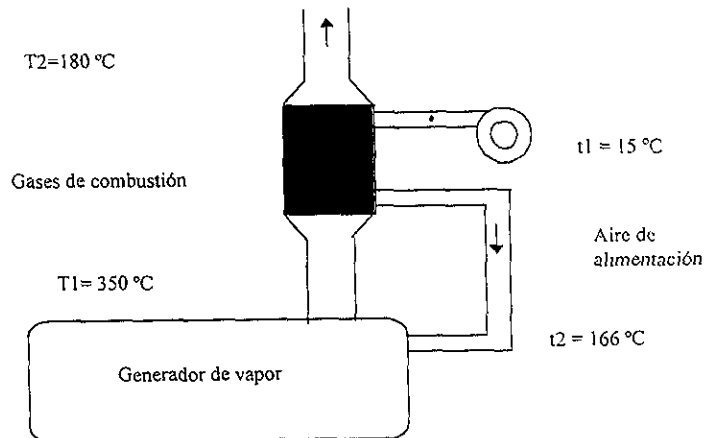
Los beneficios que se obtendrían al aplicar esta medida de ahorro de energía se determinan a partir del cálculo del consumo específico de gas natural (m<sup>3</sup>std/h) bajo las condiciones actuales de operación (considerando un 10% de exceso de aire), y posteriormente se calcula el mismo valor incrementando la temperatura del aire de

combustión y disminuyendo la temperatura de salida de los gases. Tabla VII.7. Para determinar estas temperaturas se realizó el balance energético mostrado en el anexo 4.

Parámetro	Condiciones actuales de operación	Instalación de precalentador de aire.
Eficiencia %	71.86	80.0
Consumo de combustible (m <sup>3</sup> std /h)	1933	1733
Temperatura de gases de salida del generador de vapor (°C)	350	180
Temperatura de aire de alimentación al generador (°C)	15	166
Potencial de Ahorro energético (m <sup>3</sup> /h) / (m <sup>3</sup> /mes)	-	200 / 144,000 (10.3% de ahorro)
Ahorro económico (\$/mes)	-	125,387
Disminución de CO <sub>2</sub> (Ton/mes)	-	277

Tabla VII.7. Beneficios obtenidos por la implementación de un precalentador de aire al generador.

Figura VII.3. Temperaturas en el sistemas de precalentamiento de aire .



#### Ahorro energético

$$(1933 - 1733) \text{ m}^3/\text{h} \times 8640 \text{ h/año} \times 38,518 \text{ kJ/m}^3 = 6.656 \times 10^{10} \text{ kJ/año}$$

#### Ahorro económico

$$(1933 - 1733) \text{ m}^3/\text{h} \times 8640 \text{ h/año} \times 0.870747 \text{ \$/m}^3 = 1,504,651 \text{ \$/año}$$

## Inversión

La inversión necesaria para implementar esta medida consiste en la compra e instalación de un precalentador de aire de tipo tubular de acero inoxidable.

Se considera que la inversión total involucrada en esta medida será aportada por la misma empresa, y que el horizonte de planeación será de 10 años.

Se estima el costo de este equipo, precalentador de aire tubular, en \$ 120,000 dls equivalente a \$1,128,000 pesos (9.4\$/ dls) con los accesorios correspondientes. En base a este costo se calcula la inversión total para la implementación de esta medida. (anexo 6), considerando otros gastos dentro de este estimado:

(ICF) Inversión total en números enteros (capital fijo) = **\$1,130,000**

### Resumen

Potencial de ahorro	KJ/s	2140
Ahorro esperado	\$/año	1,504,654
Inversión total	\$	1,130,000
Periodo de recuperación	Años	1.02

### Comentarios.

Para fines reales en la implementación de este equipo, será necesario un estudio más riguroso bajo los criterios de un experto; ya que la instalación de este equipo es cuantiosa y debe garantizarse el cumplimiento de los requerimientos energéticos en donde sea instalado así como los ahorros de energía en el mismo.

La evaluación económica de cada medida de ahorro propuesta se resume en la tabla VII.8 y se encuentra representada numéricamente en las gráficas del Anexo 6.

Tabla VII.8. Evaluación económica de las medidas de ahorro y uso eficiente de energía.

Medida de ahorro / Beneficios	Sustitución de quemador	Instalación de precalentador de aire
Ahorro de combustible m <sup>3</sup> /año	699,840	1,728,000
Ahorro energético KJ /s	867	2,140
Ahorro económico \$/año	609,384	1,504,651
Ahorro económico \$/mes	50,782	125,388
INVERSIÓN \$	80,000	1,130,000
Periodo de recuperación años (1)	0.180	1.02
VPN \$	1,515,730	4,329,221
TIR %	682.0%	119%
RELACION BENEFICIO/COSTO	19.95	4.83
VIDA ECONOMICA ESPERADA	5 años	10 años

## Consideraciones

- (1) El cálculo no involucra el valor del dinero en el tiempo  
 (2) Se consideraron los siguientes valores para el estudio económico  
 (3) El cálculo económico se utilizó una tasa de interés del 21% anual

Gas natural (\$/Gcal)	95.55
Gas natural (\$/Mm <sup>3</sup> )	870.747
PCS std	9.200

### VII.3. RESULTADOS

- Al evaluar energéticamente el generador de vapor acuotubular BH-901-"A" se obtuvo una eficiencia de operación de 71.86% .
- La empresa analizada no tenía disponible la eficiencia de diseño del equipo y en base sólo al exceso de aire de diseño con el que se contaba se estimó ésta, para tener un parámetro de referencia.
- De acuerdo con el dictamen energético se concluye que la baja eficiencia se debe principalmente a las altas temperaturas de los gases de combustión (350°C) y al exceso de aire (54%) manejado en el generador de vapor.
- La relación de aire - combustible se considera alta (54 %) comparados con los valores actuales que manejan los quemadores aplicando tecnología de punta (10 %), cuando se utiliza gas natural como combustible.
- Se identifican principalmente tres potenciales de ahorro de energía, siendo dos de ellos de gran relevancia por los beneficios y ahorros estimados: Sustitución de quemadores y la implementación de un sistema de precalentamiento de aire. Ambas medidas requieren inversión.
- Se realizó la evaluación económica considerando diferentes horizontes de planeación para cada medida propuesta, encontrando los valores reportados en la tabla anterior VII.8.
- De acuerdo a los datos obtenidos de la evaluación económica se consideran ambas alternativas rentables. Sin embargo solo una de ellas cumple técnicamente: instalar un quemador de bajo exceso de aire.
- Comparando las alternativas desde el punto de vista económico se observa que la instalación de un precalentador de aire es la mejor elección, debido a que los ahorros de combustible anuales que se tiene son muy significativos en comparación a aquellos obtenidos por la instalación de un quemador de bajo exceso de aire; también el período de recuperación es atractivo considerando que en un año se paga el equipo y en los años restantes de la vida económica esperada se tendrán ahorros importantes. A pesar de esto, esta alternativa se rechaza desde el punto de vista técnico por ser considerada sin grandes expectativas; ya que el generador de vapor evaluado es de 1978 y no hay una seguridad que este equipo sea capaz de seguir operando diez años más (vida útil de 25 años) con la instalación del precalentador de aire y por tanto no tendría justificación la alta inversión que involucra esta alternativa. Además de que la implementación de este equipo no resulta ser fácil, no solo por el costo que involucra si no también se deben considerar rigurosamente el diseño especial que involucren los aspectos particulares del proceso. A partir de esto surge otra alternativa, no evaluada en este estudio, pero que podría ser considerada si la empresa así lo requiere: la instalación de un nuevo generador de vapor.

La elección final de la empresa, en este caso en particular, deberá contemplar el análisis de los beneficios involucrados. económico, energético y ambiental; y dependerá de la visión y solvencia que tenga la empresa, es decir habría que analizar qué es lo que resulta más atractivo para ellos: la alta inversión en un principio que generará altas ganancias y mejoras ambientales significativas en periodos futuros o bien si no se tiene grandes sumas de inversión y solo se desea seguir operando en un tiempo determinado.

Aunque cabe remarcar que el factor ambiental debería influir más en la decisión que se tome ya que se deberá tener en cuenta la cantidad de contaminantes que podrían dejarse de emitir como resultado de la aplicación de una u otra medida de ahorro para una decisión final adecuada



# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Al haber cubierto los alcances establecidos para la elaboración de este trabajo de tesis se tienen las conclusiones siguientes:

- Los generadores de vapor deben ser considerados equipos potenciales para la implementación de medidas de ahorro y uso eficiente de energía en procesos industriales, debido a que son equipos que consumen la mayor cantidad de combustibles fósiles (gas natural, diesel y combustóleo) y se puede determinar el comportamiento energético de éstos para corregir su funcionamiento continuamente.
- Ya que son equipos funcionando en casi todos los procesos de transformación industrial; la gran cantidad de ellos en conjunto representan en términos de ahorro de energía, un potencial significativo que se conseguirá mediante la implementación de acciones de tipo técnico-operativo o por acciones que requieran inversión.
- La metodología de evaluación energética para generadores de vapor en operación, elaborada en este trabajo de tesis ha sido diseñada para identificar áreas de oportunidad y establecer planes de acción para su implementación y de esta manera evitar el desperdicio de energía o a través de tecnologías de punta hacerlo eficiente acorde a la vida útil del generador de vapor.
- El ahorro de energía, no solo en los generadores de vapor, si no de forma global, se hace importante ya que la situación nacional; que ha tenido una gran dependencia de los hidrocarburos en la estructura de abasto de energía primaria, actualmente tiende a un alto grado de vulnerabilidad debido a los costos y demanda de ésta. Por tanto si existe una forma de ahorrar energía, en particular, en los procesos industriales, los beneficios colaterales que traerá ello significaran una mejora global dentro del contexto nacional.
- Actualmente debe tomarse mayor conciencia sobre el daño ecológico que causa la generación de vapor, cuando se comprenda esto se incrementaran la aplicabilidad de las medidas de ahorro resultadas del estudio energético respectivo y podrá saberse con veracidad los beneficios alcanzados. El deterioro ambiental por generadores de vapor se ha debido principalmente a sus productos de combustión; aunque el calor de desperdicio y el ruido también han afectado directamente el ambiente
- Los antecedentes de este trabajo de tesis ponen de manifiesto, la necesidad de una reforma en los valores normativos actuales, que rigen las emisiones contaminantes por equipos de combustión de fuentes fijas; a fin de poder afrontar en un futuro no muy lejano, lo referente a la normatividad ecológica.

- En el proceso de globalización mundial que se vive, las tendencias normativas sobre emisiones contaminantes podrían llegar a ser internacionales; y de ser así, el país será capaz de regirse y competir bajo las mismas normas si se establecen con mas rigor en un tiempo temprano, y a su vez se podrían evitarse multas o impuestos ( tendientes a ser ejecutables en el futuro) por las altas emisiones de contaminantes generadas.
- La conservación de energía, consecuentemente, enfrenta un fuerte y oportuno incentivo para escudriñar el criterio de diseño y características de construcción y operación no solo para los generadores de vapor si no para todos los equipos y procesos industriales, de tal forma que se apliquen tecnologías de vanguardia, asumiendo los criterios de uso eficiente de energía y de impactos ambientales mínimos.
- El desarrollo económico y los aspectos demográficos del país que se esperan en los próximos años esta inmerso en una dinámica que plantea enormes retos, uno de ellos: la creciente demanda de electricidad y energía. Nosotros, ingenieros de hoy, deberemos aplicar la ingeniería; ciencia de vida, naturaleza y futuro, para enfrentarlos y resolverlos a fin de contribuir al crecimiento y prosperidad de la sociedad
- Se ha mostrado en este trabajo de tesis que aplicando la ingeniería se obtienen resultados que determinan las acciones a seguir si se quiere mejorar y tener ventajas competitivas; estableciendo que el uso racional y eficiente de energía, punto de interés principal de este trabajo de tesis, será parte de la solución para satisfacer la creciente demanda de electricidad y energía que se espera en el futuro.
- Estos aspectos futuros marcan la importancia de crear una nueva cultura orientada hacia el uso eficiente y racional de la energía en todos los aspectos. Aunado a esto se debe promover, fomentar y difundir los estudios relacionados con la utilización y conservación de la energía, así como la investigación, desarrollo y difusión de tecnologías para el ahorro y uso eficiente de energía; con el objeto de incrementar la realización de acciones de ahorro energético. El presente trabajo ha coadyuvado a tales fines, con una información específica de la gran diversidad que hay al respecto y que se esta realizando actualmente en el país.
- Finalmente, la importancia y prioridad hacia el ahorro de energéticos primarios así como el impacto que representa en la mitigación de contaminación ambiental han sido los factores fundamentales para la elaboración de este trabajo de tesis.

## BIBLIOGRAFÍA

**BIBLIOGRAFÍA**

- Ambriz, J.J., y Romero, R.H. (1993). **Administración y ahorro de energía**. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa. D.F. México.
- American Petroleum Institute. (1995-1999). **Global climate Change**. Artículo consultado en [www. api.org/global climates/](http://www.api.org/global-climates/)
- Ashutosh,G. y Garg,A. (1994). **Specify better low- NOx burners for furnaces**. Chem.Eng.,90 (1):46-47.
- ASME POWER TEST CODE**, (1964). Código PTC 4.1 de pruebas de potencia para unidades de generación de vapor.
- Balance Nacional de energía**, (1998). Secretaria de Energía. D.F. México.
- Babcock & Wilcox Co. (1956) **Steam, Its Generation and Use**. By the Babcock & Wilcox Co.
- Bazúa, E. (1988). **Cálculos energéticos en hornos, calderas, y calentadores a fuego directo**. En material didáctico del diplomado: Bases termodinámicas para el uso eficiente de la energía. Facultad de Química, UNAM. D.F. México.
- Cancino R.J. (1984) **Sistemas de control protección e instrumentación para generadores de vapor**. Tesis de Maestría en ingeniería química(proyectos). UNAM. México D.F.
- CCME. Comisión del Consejo Mundial de Energía, (1993). **Energía par el Mundo del mañana**. Realidades, opciones, objetivos. Madrid, Comité Español del World Energy Council. España.
- Clayton de México S.A. de C.V.**, (2000). Información sobre quemadores. y equipos de recuperación de calor. Catálogos de productos. D.F. México.
- Energy Terminology**, (1990) A multilingual Glossary. Consejo Mundial de la energía Pergamon Press, England.
- EPA. (1995). **Emission factor documentation for AP-42 section 1.4 Natural Gas Combustion**. Environmental Protection Agency U.S.A. Tech Support Division, Office of Air Quality Planning Standards. Washington, D.C. USA.
- Eurocombustión S.A. de C.V.**, (2000). Información sobre quemadores. Catálogos de productos por representantes en México. D.F. México.
- Finkelman, J. (1990). **Medio ambiente y desarrollo en México**. Vol. 2. Porrúa. D.F. México.
- Grant, E.L. y Leavenworth S. **Principios de Ingeniería económica** (1980) Compañía Ed. Continental, D.F México .
- Huang, F.F. (1997). **Ingeniería termodinámica**. Ed. Compañía editorial continental. D.F. México.
- Keenan, J.H., Hill P.G., Keyes F.G. y Moore J.G. (1969). **Steam tables**. Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases (English Units), John Wiley & Sons Inc., U.S.A.

- Kern, Q. (1992). **Procesos de transferencia de calor**. Ed. Compañía editorial continental. D.F. México
- Molina I. L.A., (1984). **Manual de eficiencia energética térmica en la industria**. Tomo I y II, Centro para el Ahorro y Desarrollo Energético y Minero, S.A. (CADEM), Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Bilbao, España.
- Mycocok, J.C. y McKenna, J.D. (1995) **Handbook of air pollution control engineering and Technology**. Ed. Louis Theodore and Lewis Publishers. Nueva York. USA.
- NOM-085-ECOL-1994**, Norma Oficial Mexicana. Contaminación atmosférica sobre protección ambiental. Diario oficial de la Federación. D.F. México.
- NOM-002-ENER-1995**, Norma Oficial Mexicana. Eficiencia térmica de calderas paquete. Diario oficial de la Federación. D.F. México.
- NOM-012-ENER-1996**, Norma Oficial Mexicana. Eficiencia térmica de calderas de baja capacidad. Diario oficial de la Federación. D.F. México.
- Perry, R. Green, D.W. y Maloney, J. (1992). **Manual del Ingeniero Químico**. Tomo I. Ed. McGraw Hill., D.F. México.
- Plauchú L. A. (1995). **Eficiencia en calderas**. Ed. Aries. México, D.F.
- Pull E. (1980) **Calderas de vapor**. Ed. Gustavo GILI. Barcelona España
- Roselló, F.C. y Arreola, Q.L. (1983) **Energía y Máquinas térmicas**. Ed. Limusa México D F México.
- Sepúlveda, J.A. **Ingeniería económica**. (1990). McGraw Hill, Inc., U.S.A.
- Selmec, (1976.) Equipos Industriales, S.A. de C.V., **Manual Selmec de Calderas**
- Shields, Carl D. (1982) **Calderas. Tipos, Características y sus funciones**. Ed. Continental. México D.F México
- Smith, J.M. y Van Ness, H.C. (1995) **Introduction to Chemical engineering thermodynamics**. McGraw Hill, Inc., U.S.A.
- Thumann, Albert y Mehta, D. Paul. (1991) **Handbook of energy engineering**. Second Edition, The Fairmont Press Inc., U.S.A.
- Wood, S (1994). **Select the right NOx control technology**. Chem. Eng., 90 (1):33-37

# ANEXOS

## ANEXO 1. FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS

### PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA.

*"La cantidad total de energía es constante aunque adopte diferentes formas, cuando desaparece una forma de energía surge simultáneamente con otra apariencia"*

Al aplicar la primera ley a un proceso dado, la esfera de influencia del proceso se divide en dos partes: el sistema y sus alrededores. El primero se refiere a la parte en que ocurre el proceso; todo lo demás que no está incluido en el sistema, constituye los alrededores.

La primera ley se aplica al sistema y los alrededores y no únicamente al sistema. En su forma básica la primera ley se expresa como:

$$\Delta(\text{energía del sistema}) + \Delta(\text{Energía de los alrededores}) = 0 \quad (1.1)$$

Las transformaciones de energía de una forma a otra y su transferencia de un lugar a otro ocurren por los mecanismos de calor y trabajo. El calor y el trabajo se refieren a energías en tránsito a través de la frontera entre el sistema y los alrededores. Si la frontera del sistema no permite la transferencia de masa entre el sistema y los alrededores, se dice que el sistema es cerrado y su masa necesariamente constante. Por tanto el cambio total de la energía de los alrededores iguala a la transferencia neta de energía de ellos o hacia ellos como calor y trabajo; entonces el segundo término de la ecuación anterior reemplaza por:

$$\Delta(\text{Energía de los alrededores}) = Q - W$$

Si la masa del sistema es constante y sólo intervienen cambios en las energías interna cinética y potencial,

$$\Delta(\text{energía del sistema}) = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Con esas sustituciones, la ecuación (1.1) queda:

$$\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = Q - W \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) establece que la energía total del sistema es igual al calor agregado al sistema menos el trabajo realizado por este. Esta ecuación se aplica a los cambios que ocurren durante un cierto tiempo en sistemas cerrados. Con frecuencia, en estos sistemas los procesos no presentan cambios en la energía cinética y potencial externa sino solamente variaciones de la energía interna, reduciendo en este caso la ecuación (1.2) a.

$$\Delta U = Q - W \quad (1.3)$$

### SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA.-

Es posible establecer enunciados que sirvan para expresar la segunda ley, uno de los más comunes es:

*"Ningún aparato puede operar en forma tal que su único efecto (en el sistema y los alrededores) sea la conversión completa del calor absorbido por el sistema, en trabajo"*

El enfoque clásico de la segunda ley se basa en una perspectiva macroscópica de las propiedades independientemente de toda la información sobre la estructura de la materia o del comportamiento molecular. Surge el estudio de la máquina térmica, que es un mecanismo o máquina que produce trabajo a partir del calor de un proceso cíclico. Como ejemplo se tiene una planta de potencia de vapor, donde el fluido de trabajo (vapor de agua) periódicamente regresa a su estado original.

El fluido de trabajo de una máquina térmica en operación absorbe calor  $Q_C$  de un depósito caliente, produce una cantidad neta de trabajo  $W$ , rechaza calor  $Q_F$  al depósito frío y regresa a su estado inicial. La primera ley se reduce a:

$$W = Q = Q_C - Q_F \quad (1.4)$$

Si se define la eficiencia térmica de una máquina como:

$$\eta = \frac{\text{trabajo neto entregado}}{\text{Calor absorbido}}$$

$$\text{Se tiene: } \eta = \frac{W}{Q_C} = \frac{Q_C - Q_F}{Q_C} \quad \therefore \quad \eta = 1 - \frac{Q_F}{Q_C}$$



Otro postulado en la segunda ley que no se aplica a este trabajo de tesis y que quizás pueda ser tema de estudio mas adelante es lo referente al postulado de entropía

"Existe una propiedad extensiva de un sistema llamada entropía, S, la entropía de un sistema aislado nunca puede decrecer"

$$(\Delta S)_{AIS} \geq 0$$

$$(\Delta S)_{SISTEMA} + (\Delta S)_{ALREDEDORES} \geq 0$$

Donde la igualdad corresponde al caso ideal de un proceso irreversible.

Las implicaciones de la segunda ley son múltiples. La condición del incremento de entropía puede usarse para predecir que procesos, reacciones químicas, transformaciones entre varios tipos de energía o direcciones de transferencia de calor y trabajo pueden o no ocurrir. Partiendo de la condición de que a sistema de dos partes, en un estado de equilibrio, corresponde un máximo de entropía del sistema, pueda demostrarse que la condición de equilibrio térmico, mecánico y químico corresponde respectivamente a una equivalencia de temperatura, presión y potencial químico. Además la segunda ley gobierna los límites de conversión de las diferentes formas de energía llevándolos al concepto de Calidad de la energía. A partir de esta consideración de la naturaleza microscópica de la materia a través de la aproximación estadística, la entropía puede mostrarse como una medida del azar microscópico y de la incertidumbre resultante a cerca del estado microscópico.

Para realizar un balance más riguroso quizás mas realista y eficiente que el presentado en este trabajo de tesis, sería analizar el mismo balance considerando los conceptos de:

Trabajo perdido: Asociado a la energía que se vuelve inaprovechable para producir trabajo como resultado de la irreversibilidad del proceso y se define como la diferencia entre el trabajo ideal y el trabajo real para un proceso dado:

$$W_{perdido} = W_{ideal} - W_{real}$$

Exergía: El método de exergía es una manera sistemática de aplicar los principios de la primera y la segunda ley de la termodinámica, donde la exergía de un sistema es una medida de la calidad de la energía que contiene, y de su alejamiento con respecto al medio que la rodea. La aplicación de análisis exergéticos complementados con consideraciones de mercado y de toxicidad podrán ayudar hacia la optimización de procesos industriales.

**En este trabajo de tesis el objetivo principal es proporcionar una metodología para evaluar energéticamente generadores de vapor en operación, que sirva como herramienta para identificar potenciales de ahorro de energía.**

**Se considero omitir una evaluación energética más rigurosa haciendo uso de los conceptos antes mencionados debido entre otros, a los factores siguientes:**

- La evaluación energética se realiza mediante un balance térmico usando la metodología del código ASME como herramienta de cálculo programada en excel, para disminuir el tiempo de cálculo en comparación a otro método de simulación necesasamente para aplicar los conceptos antes mencionado y que al parecer por lo nuevo y complejo de ellos, en una primera instancia no resulta ser muy significativo para los directivos de las empresas
- Debido que es aplicable a los equipo en operación y cuyos registros (1995, Plauchú) sobre los años de puesta en operación de los generadores de vapor en las diferentes industrias arrojan a la década de los 70's; sería necesario evaluar que tan factible es hacer uso de los conceptos arriba mencionados para evaluar equipos con casi 30 años de operación en comparación a aquellos otros cuya tecnología mas reciente ha evolucionado y son susceptibles de optimizar
- Falta de herramientas de cálculo para la evaluación in situ. Para hacer una evaluación mas rigurosa en campo considerando los conceptos de exergía y trabajo perdido se requiere de simuladores de procesos para evaluar las propiedades del proceso en sí y en el cual interviene el generador de vapor, los cuales no todos los centros de trabajo tienen acceso a ello.

## ANEXO 2. MEMORIA DE CALCULO. EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR.

Previamente al seguimiento de éste método, se debe de haber realizado el diagnóstico energético. Se presentan los Métodos de Pérdidas (Método Indirecto), y el Método de Entradas y Salidas (Método Directo), los cuales son aprobados por el Código ASME. Power Test Codes Steam Generating Units. 4.1.

Los programas en excel para calcular la eficiencia del generador de vapor cuando se emplea combustible líquido, combustible gas, y para el caso en el que se empleen al mismo tiempo ambos, tienen las modificaciones correspondientes, siguiendo la misma secuencia de cálculo que se presenta en esta sección

### Cálculos preliminares:

#### Flujo de nitrógeno

$$W_{N_2} = ((28.02 * N_2 / (12.01 * (CO_2 + CO))) * (C + 12.01 * S / 32.07) / 100)$$

En donde:

$W_{N_2}$	Flujo de nitrógeno	kg <sub>N2</sub> / kg cq
$N_2$	Nitrógeno en los gases de combustión	% mol
$CO_2$	Bióxido de carbono en los gases combustión	% mol
$CO$	Monóxido de carbono en los gases de combustión	% mol
$C$	Carbono en el combustible	% peso
$S$	Azufre en el combustible	% peso
kg <sub>N2</sub>	Kilogramos de nitrógeno	kg
kg cq	Kilogramos de combustible quemado	kg

#### Flujo de aire seco

$$W_a = (W_{N_2} - N_{2\text{ comb}} / 100) / 0.7685$$

En donde

$W_a$	Flujo de aire seco	kg as / kg cq
$W_{N_2}$	Flujo de nitrógeno	kg <sub>N2</sub> / kg cq
$N_{2\text{ comb}}$	Nitrógeno en el combustible	% peso
kg as	Kilogramos de aire seco	kg

#### Flujo de gases de combustión

$$W_g = \{(44.01 * CO_2 + 32 * O_2 + 28.02 * N_2 + 28.01 * CO) * (C + 12.01 * S / 32.07)\} / \{12.01 * (CO + CO_2) * 100\}$$

En donde:

$W_g$	Flujo de gases de combustión secos	kg gas / kg cq
$CO_2$	Bióxido de carbono en los gases combustión	% mol
$O_2$	Oxígeno en los gases de combustión	% mol
$N_2$	Nitrógeno en los gases de combustión	% mol
$CO$	Monóxido de carbono en los gases de combustión	% mol
$C$	Carbono en el combustible	% peso
$S$	Azufre en el combustible	% peso
kg gas	Kilogramos de gases de combustión secos	kg

#### Relación carbono / hidrógeno

$$C / H = C / H_2$$

En donde:

C	Carbono en el combustible	% peso
H <sub>2</sub>	Hidrógeno en el combustible	% peso

### Presión parcial de la humedad en el flujo de gases de combustión

$$m_g = 8.936 \cdot H_2 / 100 + W_a \cdot W_{aw} + M_f / 100 + W_z$$

En donde:

m <sub>g</sub>	Contenido de humedad en los gases de combustión	kg agua / kg cq
H <sub>2</sub>	Hidrógeno en el combustible	% peso
W <sub>a</sub>	Flujo de aire seco	kg as / kg cq
W <sub>aw</sub>	Humedad en el aire	kg agua / kg as
M <sub>f</sub>	Humedad en el combustible	% peso
W <sub>z</sub>	Flujo de vapor atomizado	kg vapor / kg cq
kg <sub>agua</sub>	Kilogramos de agua	kg
kg <sub>vapor</sub>	Kilogramos de vapor	kg

$$P_{mg} = P_b / \{ 1 + (1.5 \cdot C / m_g \cdot (CO_2 + CO)) \}$$

En donde:

P <sub>mg</sub>	Presión parcial de la humedad en el flujo de gases de combustión	kPa
P <sub>b</sub>	Presión barométrica del lugar	kPa
m <sub>g</sub>	Contenido de humedad en los gases de combustión	kg agua / kg cq
CO <sub>2</sub>	Bióxido de carbono en los gases de combustión	% mol
CO	Monóxido de carbono en los gases de combustión	% mol
C	Carbono en el combustible	% peso

### Aire teórico

$$A_t = \{ 11.51 \cdot C + 34.3 \cdot (H_2 - O_2 / 7.937) + 4.335 \cdot S \} / 100$$

En donde:

A <sub>t</sub>	Aire teórico (estequiométrico)	kg as / kg cq
C	Carbono en el combustible	% peso
H <sub>2</sub>	Hidrógeno en el combustible	% peso
S	Azufre en el combustible	% peso
O <sub>2</sub>	Oxígeno en el combustible	% peso

### Exceso de aire

$$E_a = 100 \cdot (O_2 - CO/2) / \{ 0.2682 \cdot N_2 - (O_2 - CO/2) \}$$

En donde:

E <sub>a</sub>	Exceso de aire	%
CO	Monóxido de carbono en los gases de combustión	% mol
O <sub>2</sub>	Oxígeno en los gases de combustión	% mol
N <sub>2</sub>	Nitrógeno en los gases de combustión	% mol

### Cálculo de créditos:

#### Calor en el aire de entrada

$$B_a = W_a \cdot c_{p,as} (T_a - T_{ref})$$

En donde:

B <sub>a</sub>	Calor en el aire de entrada	kJ / kg cq
----------------	-----------------------------	------------

W <sub>a</sub>	Flujo de aire seco	kg as / kg cq
cp <sub>as</sub>	Calor específico del aire seco	kJ / kg as °C
T <sub>a</sub>	Temperatura del aire	°C
T <sub>ref</sub>	Temperatura de referencia	°C

**Calor sensible en el combustible**

$$B_f = C_{pf} * (T_f - T_{ref})$$

En donde:

B <sub>f</sub>	Calor sensible en el combustible	kJ / kg cq
C <sub>pf</sub>	Calor específico del combustible	kJ / kg °C
T <sub>f</sub>	Temperatura del combustible	°C

**Calor en el vapor de atomización**

$$B_z = W_{va} * (h_{va} - h_{vsat}) / W_f$$

En donde:

B <sub>z</sub>	Calor en el vapor de atomización	kJ / kg cq
W <sub>va</sub>	Flujo de vapor de atomización externo a la unidad	kg / s
h <sub>va</sub>	Entalpía del vapor de atomización	kJ / kg
h <sub>vsat</sub>	Entalpía del vapor saturado a T <sub>ref</sub>	kJ / kg
W <sub>f</sub>	Flujo de combustible	kg / s

**Calor suministrado con la humedad que entra con el aire**

$$B_m = W_a * W_{aw} * c_{pv} * (T_a - T_{ref})$$

En donde:

B <sub>m</sub>	Calor suministrado con la humedad que entra con el aire	kJ / kg cq
W <sub>a</sub>	Flujo de aire seco	kg as / kg cq
W <sub>aw</sub>	Humedad en el aire	kg agua / kg as
c <sub>pv</sub>	Calor específico del vapor	kJ / kg °C
T <sub>a</sub>	Temperatura del aire a quemadores	°C
T <sub>ref</sub>	Temperatura de referencia	°C

**Total de créditos**

$$B = B_a + B_f + B_z + B_m$$

En donde:

B	Calor total en los créditos	kJ / kg cq
---	-----------------------------	------------

**Combustible:****Calor que entra con el combustible**

En donde:

H <sub>f</sub>	Calor suministrado con el combustible (poder calorífico del combustible)	kJ / kg
----------------	---	---------

**Energía que entra al sistema:**

$$H_f + B$$

En donde:

Hf + B Calor que entra al sistema kJ / kg

### Cálculo de la eficiencia

#### Método de pérdidas de energía (Método Indirecto):

A continuación se presenta la memoria de cálculo para determinar la eficiencia de operación del generador de vapor, por el método de pérdidas de energía, la cual se determina por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia (Método de pérdidas } n_p) &= 100 - \text{Pérdidas totales de energía en el generador} \\ &= 100 - (L / (H_f + B)) * 100 \end{aligned}$$

En donde:

$n_p$	Eficiencia del generador de vapor, por el método de pérdidas de energía	%
L	Pérdidas en el generador de vapor	kJ / kg cq
Hf	Calor suministrado con el combustible	kJ / kg cq
B	Créditos	kJ / kg cq

#### Cálculo de pérdidas de energía:

##### **Pérdidas de energía por gases de combustión**

$$L_g = W_g * C_{pg} * (T_{gas} - T_{ref})$$

En donde:

$L_g$	Pérdidas de energía por gases de combustión secos	kJ / kg cq
$W_g$	Flujo de gases de combustión	kg gas / kg cq
$C_{pg}$	Calor específico de los gases de combustión	kJ / kg °C
$T_{gas}$	Temperatura de los gases de combustión	°C
$T_{ref}$	Temperatura de referencia	°C

$$\text{Porcentaje de pérdidas de energía por gases secos: } L_g * 100 / (H_f + B) \quad \%$$

##### **Pérdidas de energía por formación de CO**

$$L_{co} = (CO * 10160 * 1.0549 * 2.205 * C / 100) / (CO_2 + CO)$$

En donde:

$L_{co}$	Pérdidas de energía por la formación de CO	kJ / kg cq
$CO_2$	Dióxido de carbono en los gases de combustión	% mol
$CO$	Monóxido de carbono en los gases de combustión	% mol
C	Carbono en el combustible	% peso

$$\text{Pérdidas de energía por formación de CO: } L_{co} * 100 / (H_f + B) \quad \%$$

##### **Pérdidas de energía por la humedad producto de la combustión del H<sub>2</sub>**

$$L_h = 8\,936 * H_2 * (h_{pv} - h_{wsat}) / 100$$

En donde:

$L_h$	Pérdidas de energía por la humedad producto de la combustión del H <sub>2</sub>	kJ / kg cq
$H_2$	Hidrogeno en el combustible	% peso
$h_{pv}$	Entalpía del vapor a la presión P <sub>mg</sub> y T <sub>gas</sub>	kJ / kg

hwsat Entalpía del líquido saturado a  $T_{ref}$  kJ / kg  
 Pérdidas de energía por la humedad producto de la combustión del hidrógeno:  $L_h * 100 / (H_f + B)$  %

#### Pérdidas de energía por la humedad del aire

$$L_{ma} = W_a * W_{aw} * (h_{pv} - h_{wsat})$$

En donde,

L<sub>ma</sub> Pérdidas de energía por la humedad del aire kJ / kg cq  
 W<sub>a</sub> Flujo de aire seco kg as/ kg cq  
 W<sub>aw</sub> Humedad en el aire kg agua / kg as  
 h<sub>pv</sub> Entalpía del vapor a la presión P<sub>mg</sub> y T<sub>gas</sub> kJ / kg  
 h<sub>wsat</sub> Entalpía del vapor saturado a T<sub>ref</sub> kJ / kg

$$\text{Pérdidas de energía por la humedad del aire} = L_{ma} * 100 / (H_f + B) \quad \%$$

#### Pérdidas de energía por la humedad en el combustible

$$L_{mf} = H_2O * (h_{pv} - h_{wsat}) / 100$$

En donde:

L<sub>mf</sub> Pérdidas de energía por la humedad en el combustible kJ / kg cq  
 H<sub>2</sub>O Humedad en el combustible % peso  
 h<sub>pv</sub> Entalpía del vapor a la presión P<sub>mg</sub> y T<sub>gas</sub> kJ / kg  
 h<sub>wsat</sub> Entalpía del líquido saturado a T<sub>ref</sub> kJ / kg

$$\text{Pérdida de energía por la humedad del combustible} = L_{mf} * 100 / (H_f + B) \quad \%$$

#### Pérdidas de energía por el vapor de atomización

$$L_z = W_{va} * (h_{pv} - h_{wsat}) / W_f$$

En donde:

L<sub>z</sub> Pérdidas de energía por el vapor de atomización kJ / kg cq  
 W<sub>va</sub> Flujo de vapor de atomización externo a la unidad kg / s  
 h<sub>pv</sub> Entalpía del vapor a la presión P<sub>mg</sub> y T<sub>gas</sub> kJ / kg  
 h<sub>wsat</sub> Entalpía de vapor saturado a T<sub>ref</sub> kJ / kg  
 W<sub>f</sub> Flujo de combustible kg / s

$$\text{Pérdidas de energía por el vapor de atomización. } L_z * 100 / (H_f + B) \quad \%$$

#### Pérdidas de energía por radiación y convección

$$L_r = \text{Pérdidas de energía por radiación y convección} \quad \%$$

(Valor leído de la gráfica V.5 del anexo V) %

#### Pérdidas de energía no determinadas

$$L_i = \text{Pérdidas de energía no determinadas proporcionada por el fabricante} \quad \%$$

#### Pérdidas de energía no determinadas, estimadas

Pérdidas de energía	Condición
1.0 %	Combustibles líquidos y gaseosos
1.5 %	Combustibles sólidos

**Porcentaje de pérdidas de energía en el generador de vapor**

Pérdidas por gases de combustión	$L_g * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por la formación de CO	$L_{co} * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por la humedad producto de la combustión del H <sub>2</sub>	$L_h * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por la humedad del aire	$L_{ma} * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por la humedad en el combustible	$L_{mf} * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por el calor en el vapor de atomización	$L_z * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas por radiación y convección	$L_r * 100 / (H_f + B) \%$
Pérdidas no determinadas	$L_i * 100 / (H_f + B) \%$

$$L = L_g + L_{co} + L_h + L_{ma} + L_{mf} + L_z + L_r + L_i$$

En donde:

$$L \quad \text{Pérdidas totales de energía en el generador de vapor} \quad \%$$

**Eficiencia del generador de vapor por el Método de Pérdidas:**Eficiencia(Método de pérdidas  $\eta_p$ ) = 100 - Pérdidas totales de energía en el generador

$$= 100 - (L / (H_f + B)) * 100$$

**Cálculo de la eficiencia****Método de entradas y salidas (Método Directo):**

A continuación se presenta la memoria de cálculo para determinar la eficiencia de operación del generador de vapor, por el método de entradas y salidas (de energía), la cual se determina por la ecuación siguiente:

$$\text{Eficiencia } (\eta_{e,s}) = (\text{energía aprovechada en el vapor} / \text{energía de entrada}) * 100$$

$$(\text{Método de entradas y salidas}) = W_{va} * (h_{pv} - h_{aa}) / (W_f * (H_f + B)) * 100$$

En donde:

$\eta_{e,s}$	Eficiencia del generador de vapor, por el método de entradas y salidas	%
$W_{va}$	Flujo del vapor de salida	kg / s
$H_{va}$	Entalpía del vapor de salida	kJ / kg
$H_{aa}$	Entalpía del agua de alimentación (de entrada)	kJ / kg
B	Créditos (energía de los créditos) de entrada	kJ / kg
Hf	Energía suministrada con el combustible de entrada	kJ / kg
$W_f$	Flujo de combustible de entrada	kg / s

## ANEXO 3. LINEAMIENTOS PARA LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO EN SITU

### 3.1. PREPARACIÓN DE LA PRUEBA.

Las condiciones del equipo para efectuar la prueba, deberán de seguir las siguientes recomendaciones previo y durante el desarrollo de la misma como se explica:

- Todas las superficies de transferencia, internas y externas, deberán estar comercialmente limpias (operaciones normales de limpieza), antes de empezar la prueba. Durante la prueba sólo se permitirá realizar limpieza para mantener éstas en condición normal.
- La prueba de comportamiento deberá de empezar tan pronto esté la caldera en condiciones estables.
- Se recomienda realizar una prueba preliminar con el propósito de: revisar la operación de todos los instrumentos, entrenamiento del personal, realizar ajustes menores y establecer las condiciones apropiadas de combustión.
- Así mismo se recomienda realizar al menos dos corridas aproximándose a la carga de prueba. Si los resultados obtenidos difieren, se requerirá de una tercera corrida. La eficiencia de la caldera será el promedio de las dos corridas para las cuales tengan menor desviación en su eficiencia.
- Se procederá a realizar el levantamiento de información después de que la caldera haya alcanzado la estabilidad.
- La caldera será revisada completamente para detectar cualquier tipo de fugas. También se deberán de revisar las fugas internas del aire y deberán ser corregidas.
- Antes de realizar la prueba, se determinará si la cantidad de combustible empleado es el que se tiene la intención de usar.
- En el levantamiento de información se hará notar claramente las condiciones del equipo, limpieza de las superficies de intercambio, características del combustible y carga de la caldera.

#### Condiciones de operación.

Las limitaciones para la realización de la prueba y que son mandatorias para dar validez a la misma, son las siguientes:

#### 3.1.1. Arranque y paro de prueba.

- Las condiciones de prueba deberán, como sea posible, ser las mismas al principio y al final de la prueba, como son las condiciones de combustión, flujo de combustible, flujo de agua de alimentación, y presiones del sistema, así como otras condiciones que pudieran afectar el resultado de la prueba.
- En algunos casos será necesario detener la prueba antes de finalizarla, debido a la variación de las lecturas de las variables de operación.
- Para lograr las condiciones deseadas de operación cuando se quema combustible sólido, es esencial que la mayor limpieza y condiciones del lecho de combustible sean cumplidas.
- La cantidad de combustible sólido empleado deberá de mantenerse constante al principio y al final de la prueba. La trampa de ceniza deberá ser vaciada justo después de iniciar y finalizar la prueba.
- En el caso que la prueba sea para determinar la máxima condición a la cual la caldera puede ser operada, la prueba empezará tan pronto la máxima condición sea lograda.

#### 3.1.2. Duración de la prueba.

- Se recomienda que la duración de la prueba para combustibles líquidos y gaseosos sea de una hora.

#### 3.1.3. Frecuencia y consistencia de las lecturas.



- La frecuencia de tomas de lecturas deberá ser de intervalos de 15 minutos. Sin embargo, si se presentan fluctuaciones, las lecturas deberán ser tomadas con la frecuencia necesaria para determinar el promedio
- Cuando la cantidad de combustible o agua de alimentación es recopilada por los instrumentos que están instalados en planta, estas lecturas deberán realizarse cada hora.
- Si la cantidad de combustible sólido tiene que ser pesada, la frecuencia con la que se debe pesar es usualmente determinada por la precisión de los instrumentos empleados, pero los intervalos deberán ser tales que el total pueda ser obtenido para cada hora de prueba.
- Cuando se empleen medidores de flujo o manómetros, empleando tubos venturi, tubo pitot o placa de orificio para obtener las mediciones, las lecturas de flujo deberán ser leídas en intervalos de cinco minutos.

#### 3.1.4. Aceptación de las lecturas.

- El levantamiento de información no será aceptado si se tienen inconsistencias en los resultados obtenidos durante la prueba. Cuando la prueba de la caldera no cumpla con los puntos antes mencionados, deberá ser repetida, para lograr el objetivo de la prueba

#### 3.1.5. Reporte de la prueba y observaciones

- Todas las observaciones, las lecturas y mediciones deberán ser registradas para cumplir con el objetivo de la prueba.

#### 3.1.6. Instrumentos y métodos de medición.

- Los instrumentos necesarios y procedimientos para realizar las mediciones deberán estar de acuerdo al Código ASME (Power Test Codes Supplements on Instruments and Apparatus), y otras publicaciones involucradas en la prueba de las calderas de vapor.

### 3.2. TOMA DE LECTURAS.

La duración de la prueba una vez localizados los puntos de lectura y posterior a la revisión y verificación de las condiciones en el generador, se tomará con una frecuencia de lecturas con intervalos regulares de quince minutos de tal manera que se presente poca variación.

Se sugiere que previo a la prueba, se mantenga la carga del generador de vapor durante un lapso de una hora para que los parámetros de presión, temperatura y flujo se estabilicen. A partir de los 30 minutos, se tomarán lecturas para verificar la estabilidad y en el caso de que ésta se haya logrado, se procederá a iniciar la prueba

Antes de realizar las pruebas y las mediciones correspondientes, es conveniente hacer una inspección completa al sistema para verificar la operación de todos los instrumentos, incluyendo los equipos portátiles. El equipo de trabajo dará indicaciones al personal que participará en las mediciones y en la prueba con el propósito de que todos los datos necesarios para el cálculo sean obtenidos.

Es recomendable que para caracterizar la caldera se realicen, de ser posible, pruebas a diferentes cargas: al 50% (carga baja), 75% (carga media) y al 100% (carga máxima de trabajo), de acuerdo al proceso productivo. Cada prueba se realizará durante una hora y se tomarán mediciones cada 15 minutos que se registrarán en el formato del anexo 6. Los valores medidos no deben tener discrepancias mayores del 5% entre sí en cada prueba, pues de lo contrario ésta tendrá que repetirse. Para los cálculos, se tomará el valor promedio de los valores obtenidos

La medición plantea un problema diferente para cada planta de acuerdo con el servicio, las necesidades y la calidad requerida por los equipos, sin embargo hay una serie de opciones o artificios que pueden ser empleados por el ejecutor de las pruebas y de los cuales, sin que esto sea limitativo, se exponen a continuación.

### 3.2.1. Distribución de carga.

Las plantas que cuentan con más de una caldera en disponibilidad; ya sea en servicio todas o con unidades en reserva, tendrán siempre posibilidades de operar con otras unidades para lograr el nivel deseado en cada carga o régimen seleccionado para efectuar la medición.

Lo anterior, sin embargo, presenta varias condicionantes, entre otras: que las calderas alimenten al mismo sistema, que operen a la misma presión de trabajo o que no sean de capacidades muy distintas.

### 3.2.2. Programación de acuerdo con el perfil de carga normal.

Esta opción normalmente requiere de un tiempo más amplio en la ejecución de las mediciones ya que para tener representados diferentes niveles de carga debe ajustarse al perfil de un período típico de operación que incluya los valores mínimo y máximo de carga en la planta. El período puede ser diario, semanal o mensual.

### 3.2.3. Programación de acuerdo a pruebas con producción programada.

Si el perfil y procesos normales de producción no permiten representar los niveles de carga en toda la gama deseada, existe la posibilidad de convenir temporalmente y por mínimo tiempo posible, algunas operaciones del proceso ya sea para desplazar una operación respecto de otra o para hacerlas coincidir.

Lo anterior puede convenirse en fechas, horas y duración, con los responsables a cargo de producción y de áreas específicas de proceso y permitirá realizar las pruebas en menor tiempo que en la opción anterior.

### 3.2.4. Variación del régimen de combustión independientemente de la generación de vapor.

En muchos casos podrá realizarse la variación temporal del régimen de combustión de un generador de vapor y realizar mediciones de combustión a diferentes regímenes entre el mínimo y el máximo independientemente de la generación de vapor instantánea.

Lo anterior es posible de acuerdo con los siguientes razonamientos.

- La gran mayoría de las calderas industriales en México, medianas y pequeñas, con capacidades de generación nominales de 500 CC y menores, está equipada con sistemas de control de combustión tipo posicionador - paralelo y control de dos posiciones y un elemento para el sistema de agua de alimentación (o de nivel).
- El control de agua de alimentación, por otro lado, opera en forma independiente y únicamente obedece a señales de arranque y paro de la bomba de alimentación, a través de señales de un interruptor en el casco (envolvente - coraza - cuerpo) o domo de la caldera según el tipo
- En el caso de control de combustión, lo anterior significa que para cada valor de presión dentro de la banda de desviaciones permisibles del control de presión de vapor, corresponde una posición angular del eje maestro y para cada ángulo de la manivela de éste hay una posición fija del mecanismo de leva/seguidor o manivela en la válvula de control, según el tipo de combustible correspondiente, con una posición fija de las compuertas de registros y de regulación de aire.
- Un buen número de calderas tienen controles de agua de alimentación de dos posiciones (dentro-fuera) cuyas características e influencia en el control de combustión pueden aprovecharse adecuadamente para estas maniobras
- Esta configuración permite el operar por períodos cortos el control de combustión a diferente régimen de fuego independientemente que se tenga alta o baja evaporación en la caldera.
- Las calderas pueden operarse manualmente y conseguir una situación favorable de combinación presión de vapor-nivel de agua adecuada para la operación por corto tiempo a un régimen de combustión distinto al de la generación instantánea.
- Además, en calderas medianas y pequeñas, la estabilidad en las condiciones de combustión y análisis de gases puede lograrse en pocos minutos, así como la temperatura se estabiliza con un factor de corrección que no influye en la veracidad de los resultados

Si se analizan los conceptos anteriores se entenderá que es relativamente fácil operar manualmente, ya sea con desconexión de mecanismos maestros o sin necesidad de éstos y lograr prácticamente cualquier nivel de régimen de combustión dentro de las capacidades del sistema, para obtener una información completa de las unidades y lograr un diagnóstico adecuado.

Lo anterior se consigue variando manualmente el nivel o régimen de combustión desde el tablero de control, cuando se tiene control manual remoto, o bien desconectando el varillaje del servomotor de control de presión, que permita operar manualmente el eje maestro al ángulo o posición que requiere el régimen de combustión deseado.

Esta condición permite obtener mediciones confiables de combustión y análisis de gases para cualquier condición de generación de vapor y con bajo margen de error en la temperatura de gases. Lo anterior es más cierto en las calderas de tubos de humo, las que por otra parte, permiten también un margen en tiempo de estas condiciones de "carga ficticia" dada la mayor relación de almacenamiento de agua a producción de vapor con respecto a las calderas de tubos de agua.

En los casos de calderas con sistemas de control más elaborado como el posicionador en serie, también se aplicará lo anterior y cuando las calderas estén equipadas con control modulante de agua de alimentación.

### 3.3. MEDICIÓN DE LAS VARIABLES EN LAS DIFERENTES CORRIENTES DE INVOLUCRADAS.

Los principios básicos que la medición emplea son sencillos y sólidos. Su conocimiento es fundamental para interpretar con buen criterio los resultados que se obtengan y el levantamiento de información en las plantas puede requerir algunos días de esfuerzo de buena ingeniería.

#### 3.3.1. Mediciones de vapor.

**a. Flujo.** Su medición se realiza por medio de medidores de flujo (de toberas, orificio) instalados en la tubería de salida del generador de vapor o en el ramal de la red de distribución en los puntos o secciones convenientes

##### *Métodos Alternativos.*

- Para el caso específico de producción de vapor de un generador se medirá la variación de nivel en el tanque de agua de alimentación, manteniendo cerradas la purga continua y de superficie del generador de vapor durante la medición. En el caso de tanques cilíndricos con eje horizontal, se utilizará la tabla del Anexo No. V para la obtención del volumen (%) en función de la altura del nivel del líquido en %.
- Conociendo el flujo de agua de alimentación, restándole la purga en la caldera.

**b. Temperatura.** Por medio del termómetro ya instalado en la tubería de salida del generador de vapor. En el caso de tener medición de temperatura en los tableros de control o en gráficos, podrán tomarse dichos valores.

##### *Método Alternativo.*

- Si se trata de vapor saturado, que es el más común, con la medición de la presión y el uso de tablas de vapor podemos obtener el valor de este parámetro.
- Si se trata de vapor sobrecalentado y no existen termómetros en el generador de vapor o cuarto de control, una alternativa empírica es medir la temperatura en la superficie de la tubería en un punto conveniente que esté desnudo y limpio, y sumarle 15 °C.

**c. Presión.** Por medio de un manómetro ya instalado en la tubería de salida del generador de vapor.

##### *Método Alternativo*

- Si se trata de vapor saturado y se conoce su temperatura, se puede determinar mediante tablas de vapor

- Conociendo la presión del agua de alimentación y restándole la caída de presión en la caldera especificada en el diseño.

### 3.3.2. Mediciones en el agua de alimentación.

**a. Flujo.** Por medio de medidores ya instalados: pueden ser toberas, orificios o medidores de flujo de desplazamiento positivo.

*Método Alternativo:*

- En algunos casos, éste se puede estimar si se conoce la potencia demandada real, el modelo y el diámetro del impulsor de la bomba del agua de alimentación al generador de vapor, el flujo se determina de acuerdo a la presión de descarga promedio de la bomba, y utilizando las curvas proporcionadas por el fabricante de la misma.

**b. Temperatura.** Por medio del termómetro ya instalado

*Método Alternativo.*

- Medir la temperatura con sonda de inmersión en el tanque de agua de alimentación

**c. Presión** Por medio de un manómetro ya instalado

### 3.3.3. Cantidad de purga continua.

**a. Flujo de la purga.** Se obtiene por la diferencia entre el flujo de vapor y flujo de agua de alimentación (es adecuado sino hay fugas de agua en los tubos del generador de vapor). Como esta medición es indirecta, depende de la exactitud y confiabilidad de las mediciones realizadas

**b. Temperatura y presión.** Se obtiene mediante el equilibrio termodinámico del agua y vapor

### 3.3.4. Mediciones de vapor de atomización.

**a. Flujo** Se debe de estimar la cantidad empleada de vapor para atomizar el vapor.

**b. Presión y temperatura** Se obtiene de igual manera que el vapor principal

### 3.3.5. Combustible.

Utilizar de preferencia la información del combustible del proveedor, o realizar un análisis de laboratorio de una muestra de combustible, o en caso diferente a los anteriores procedimientos, se pueden utilizar las tablas del Anexo 5 para obtener los datos del análisis y poder calorífico del combustible.

#### a. Flujo de combustible.

Gaseoso. Por medio de medidor de flujo de orificio, generalmente se instala en la caseta de medición y es proporcionado por el vendedor de combustible (PEMEX). El medidor es compensado por temperatura, presión y densidad.

Líquido. Por medio de medidor de flujo, generalmente de desplazamiento positivo o de área variable, compensado por temperatura o por diferencias de nivel.

Otros combustibles: Usar el método de medición utilizado por la empresa diagnosticada.

*Método Alternativo.*

- En el caso de que se cuente con un cabezal para el suministro de combustible a varios generadores de vapor la determinación del gasto por generador de vapor se realizará de la siguiente forma:

Se podrá cuantificar proporcionalmente a la carga de cada uno de los generadores de vapor, esto es, se asignará un porcentaje de consumo de combustible a cada generador de vapor en función a su carga y potencia, mediante el siguiente procedimiento

- Se calcula una capacidad  $C_i$  para cada generador de vapor, mediante la siguiente ecuación:

$$C_i = (\text{Capacidad del generador de vapor} \times \text{porcentaje de carga}) / 100$$

donde:

$i$  = No de generador de vapor.

- Se obtiene una capacidad total del sistema de generación de vapor:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

- Se determina el factor para cada generador de vapor:

$$F_i = C_i / C_t$$

donde:

$i$  = no de generador de vapor y,

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1$$

- Se obtiene el consumo de combustible para cada generador de vapor y para el sistema de generación de vapor, mediante las siguientes ecuaciones:

$$W_i = W_c \times F_i$$

donde:

$i$  = No. de generador de vapor

$W_c$  = Consumo de combustible medido de entrada al sistema de generación de vapor

$F_i$  = Factor para el generador  $i$

- Además, la suma de todos los consumos calculados para los generadores de vapor debe ser igual al consumo de combustible medido.

$$\sum_{i=1}^n W_i = W_c$$

En el caso de que la operación lo permita, se aislará cada uno de los generadores de vapor de manera que el combustible suministrado al cabezal, sea el combustible consumido por el generador de vapor.

**b. Temperatura del combustible.** Por medio de termómetro ya instalado.

*Método Alternativo:*

- Para el caso de combustibles gaseoso y sólidos, la temperatura del combustible es comúnmente la temperatura ambiente. Para el caso de combustibles líquidos, es común precalentarlo por lo que se deberá reportar a esta temperatura.

**c. Presión del combustible.** Por medio de un manómetro ya instalado

### 3.3.6. Análisis de los gases.

**a. Composición.** Por medio del analizador de gases de combustión Orsat o analizador electrónico de gases de combustión. Se deberán tomar muestras a diferentes penetraciones del ducto de escape de gases

En caso de que no existan los puertos para realizar las mediciones correctamente, se puede hacer un orificio de toma de muestras en el ducto de descarga de gases, cuidando que éste no se localice en puntos donde exista infiltración de aire o cambio de dirección del flujo de gases. Se recomienda realizar este orificio a la salida del generador de vapor.

**b. Temperatura de Gases.** Por medio de un termómetro o termopar en el mismo orificio donde se tomó la muestra de gases. Es recomendable que también se realice la medición a diferentes penetraciones del ducto, con el objeto de obtener la temperatura promedio de los gases. En el caso de utilizar un analizador de gases electrónico, éste ya incluye la sonda de temperatura junto con la de gases.

### 3.3.7. Mediciones de condiciones ambientales.

**a. Temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo.** Corresponde a la temperatura normal del ambiente y es medida por un termómetro de bulbo o cualquier otro Tipo. Estas lecturas deberán realizarse en el cuarto de maquinas

*Método Alternativo.*

- Se toma la temperatura con un psicrómetro; un termómetro de vidrio o digital, con una mecha húmeda que se agita. Se reporta el valor cuando se estabilice la lectura.

**b. Presión barométrica.**

Se determina con un barómetro, aneróide o conociendo o consultando las tablas incluidas en el Anexo III, que muestra la altura de diferente partes de la República Mexicana. Con esta altura se puede calcular la presión barométrica de un lugar conociendo su elevación sobre el nivel del mar, válida entre 500 y 4000 m.

$$P = 10,33 - ((h-500)/1000) \quad \text{m.c.a.}$$

donde:

P. Presión barométrica en m columna de agua  
h: Elevación del lugar en m

*Método Alternativo:*

- Se podrá usar la presión barométrica del lugar determinada por las "Normales Climatológicas" del Servicio Meteorológico Nacional.

### 3.4. INICIO DE LA PRUEBA, EQUIPO Y PERSONAL REQUERIDO

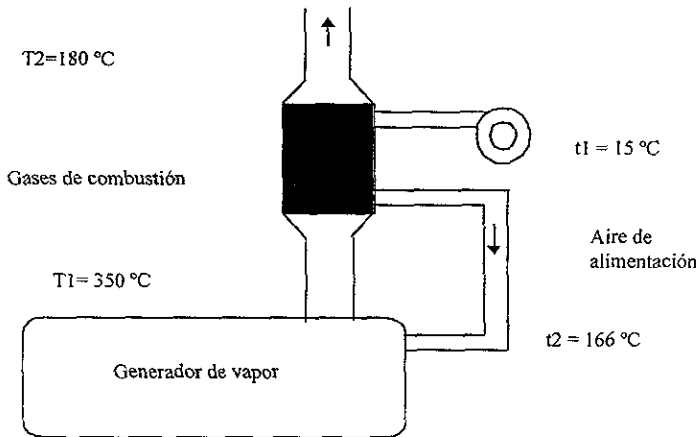
La hora de inicio para la toma de lecturas deberá de ser de preferencia, en la mañana en donde se puede realizar el levantamiento de información con seguridad

El equipo y personal requerido para efectuar la prueba es el necesario para cubrir todas las mediciones.

Los requerimientos adicionales que se necesitan son los siguientes.

- Equipo de seguridad tal como arnés con cable de vida, overoles, cascos, botas, guantes, lentes de seguridad, protector de oídos; así como seguir los requerimientos de seguridad implantados en el centro de trabajo.

## ANEXO 4. BALANCE ENERGÉTICO PARA LA INSTALACION DEL PRECALENTADOR



Q cedido por los gases de combustión = Q absorbido por el aire de alimentación

$$Q_{c \text{ gas}} = Q_{a \text{ air}} \quad (\text{kJ} / \text{h})$$

$$M_{\text{gas}} * C_{p_{\text{gas}}} * (T_2 - T_1)_{\text{gas}} = M_{\text{air}} * C_{p_{\text{air}}} * (t_2 - t_1)_{\text{air}}$$

$$t_{2,\text{air}} = (Q_{c \text{ gas}} / M_{\text{air}} * C_{p_{\text{air}}}) + t_{1,\text{air}}$$

Donde:

$M_{\text{gas}}$ : Masa de los gases de combustión	kg / h
$C_{p_{\text{gas}}}$ : Cp de los gases de combustión	kJ / kg°C
$T_{2_{\text{gas}}}$ : Temperatura de los gases de combustión a la salida del precalentador	°C
$T_{1_{\text{gas}}}$ : Temperatura de los gases de combustión a la entrada del precalentado	°C
$M_{\text{air}}$ : Masa del aire de alimentación	kg / h
$C_{p_{\text{air}}}$ : Cp de los aire de alimentación	kJ / kg°C
$t_{2,\text{air}}$ : Temperatura del aire de alimentación a la salida del precalentador	°C
$t_{1,\text{air}}$ : Temperatura del aire de alimentación a la entrada del precalentador	°C

Sustituyendo los valores, lo cuales fueron obtenidos del calculo de la eficiencia del generador de vapor considerando una  $T_{2_{\text{gas}}} = 180 \text{ °C}$  se tiene:

$$Q_{c \text{ gas}} = 21,419 * 0.96 * (180 - 350) = - 3, 494,697 \text{ (kJ} / \text{h)}$$

Haciendo las sustituciones correspondientes se tiene

$$t_{2,\text{air}} = 165.5 \text{ °C}$$

## ANEXO 5. GRAFICAS Y TABLAS

### Ejemplo de Aplicación de la Figura 5.6

Una empresa cuenta con un generador de vapor que tiene una capacidad máxima de 7.788 t/h y cuenta con tres paredes de agua. Se necesita calcular las pérdidas por radiación

$$\text{Capacidad Máxima} = 7.788 \frac{\text{t}}{\text{h}} \times 2'709,230 \frac{\text{kJ}}{\text{t}} = 21.1 \text{ millones de kJ}$$

De la Figura 5.6, en el eje de las abscisas "ENTREGA REAL EN MILLONES DE kJ", se localiza el valor de 21 y se traza una línea perpendicular a dicho eje hasta hacer contacto con la curva denominada "PÉRDIDA POR RADIACIÓN A ENTREGA MÁXIMA CONTINUA".

Se traza una línea paralela al eje de las abscisas, que parte del punto de intersección de la línea trazada anteriormente y de la curva "PÉRDIDA POR RADIACIÓN A ENTREGA MÁXIMA CONTINUA" hasta contacto con el subeje superior denominado "NUMERO DE PAREDES ENFRIAMIENTO"

En el caso que generador tenga paredes enfriadas por agua, se continua por la trayectoria inclinada, que ajusta el valor de las pérdidas por radiación, hasta hacer con el numero de paredes existentes en el generador, se continua de forma paralela al eje de las abscisas hasta hacer contacto con el eje principal de las ordenadas denominado "PERDIDAS POR RADIACIÓN EN % DEL CALOR BRUTO SUMINISTRADO", que para este caso que se tienen tres paredes de agua el valor de las pérdidas será de 1.13%.

Para el caso de que se tengan paredes enfriadas por aire se utiliza el factor de (0.90) que multiplica a las pérdidas por radiación sin paredes (1.4); con lo que se obtiene el valor de 1.26 % de pérdidas por radiación



Figura 5.1 Calor Especifico del Combustóleo a 1 Atmósfera

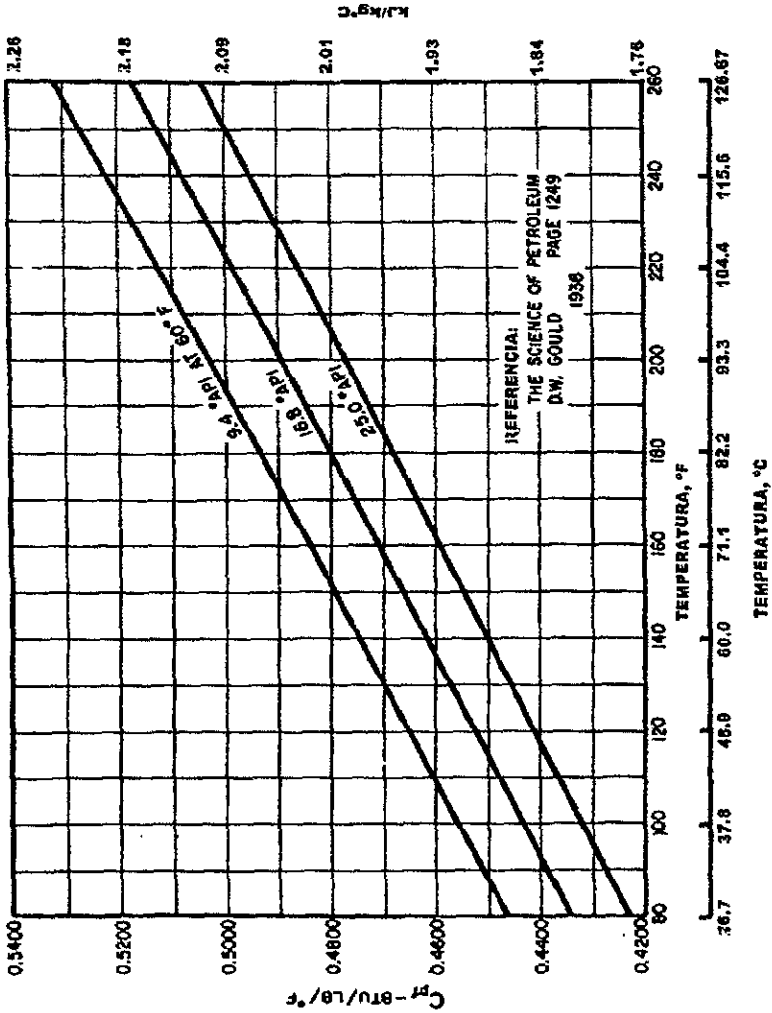


Figura 5.2 Calor Específico del Gas Natural

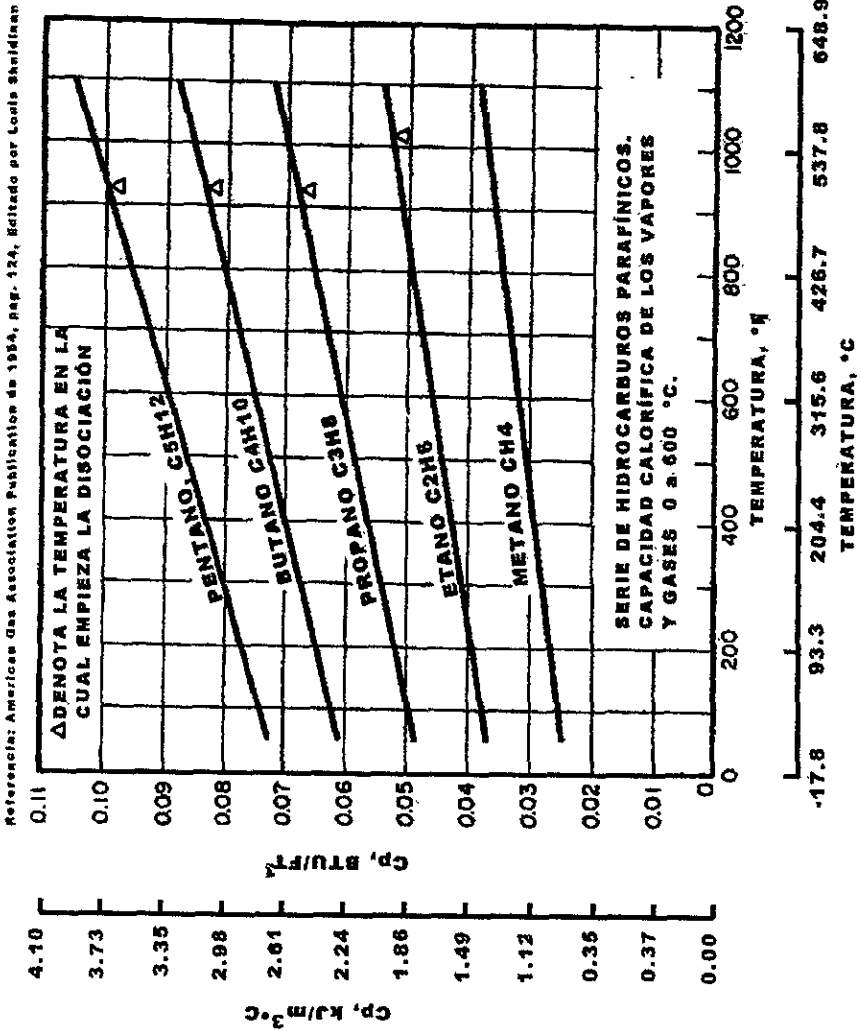


Figura 5.3 Calor Especifico del Aire

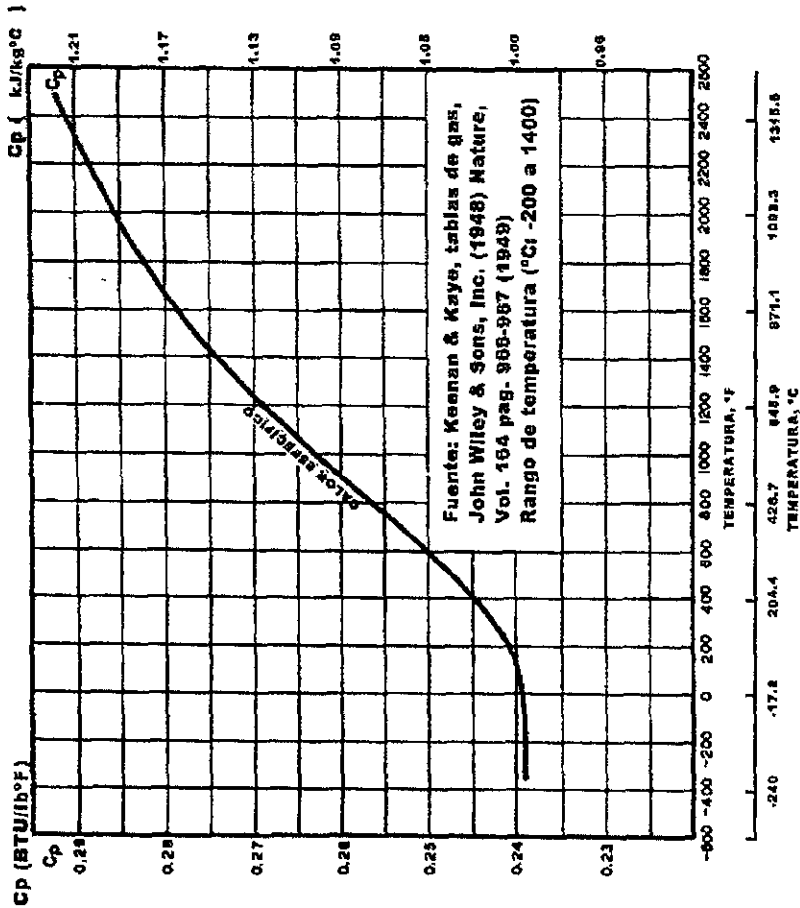


Figura 5.4 Calor Específico del Combustóleo en Función de la Relación C-H

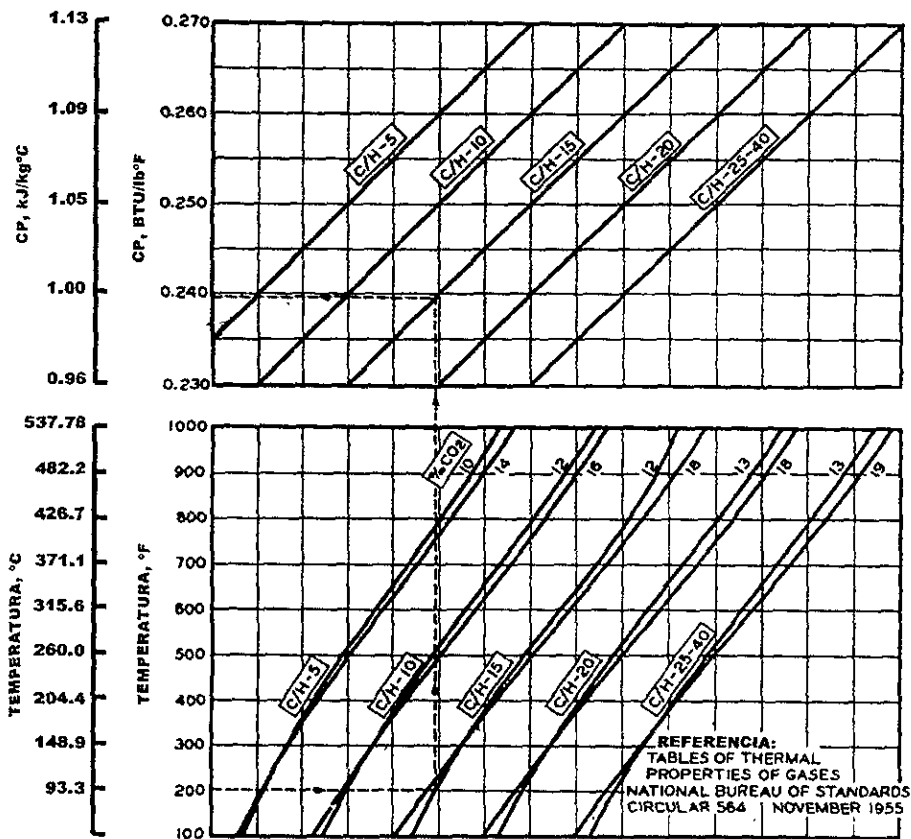


Figura 5.5 Calor Especifico del Vapor

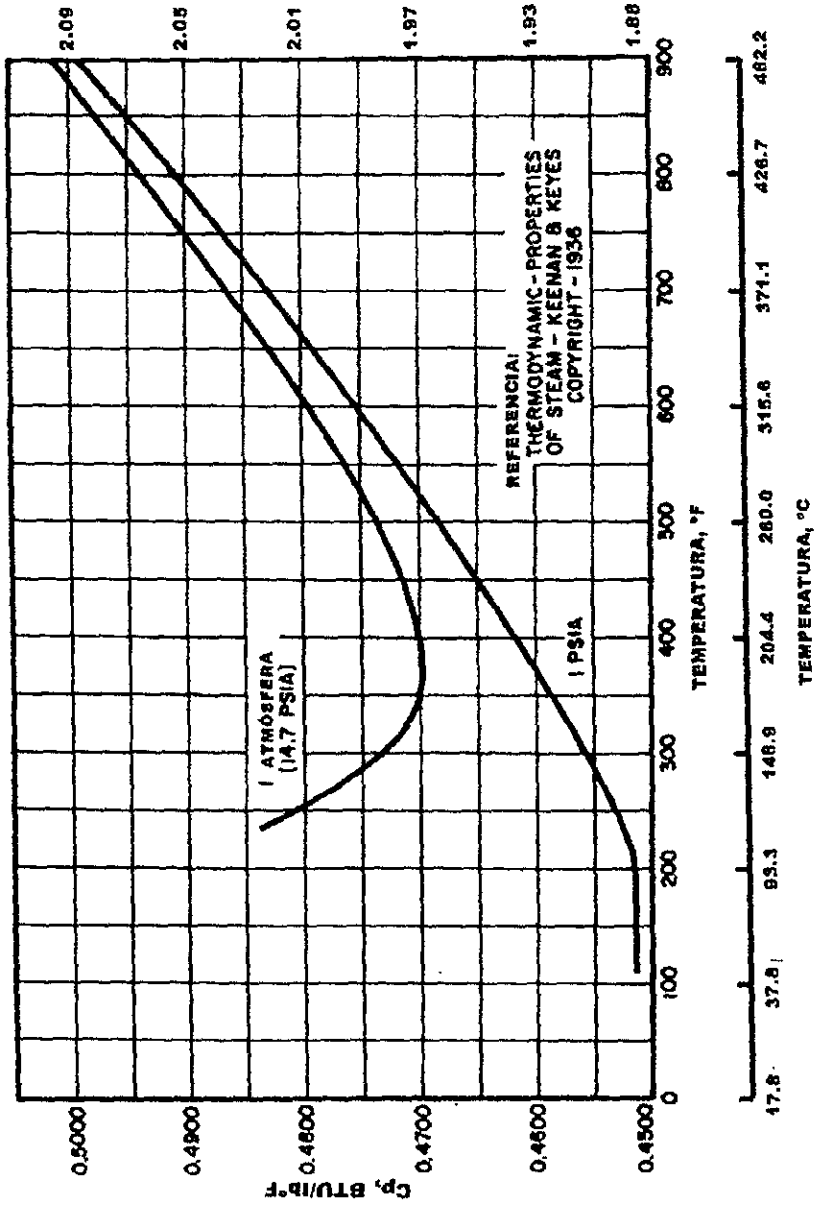


Figura 5.6 ABMA, Pérdidas Estándar por Radiación

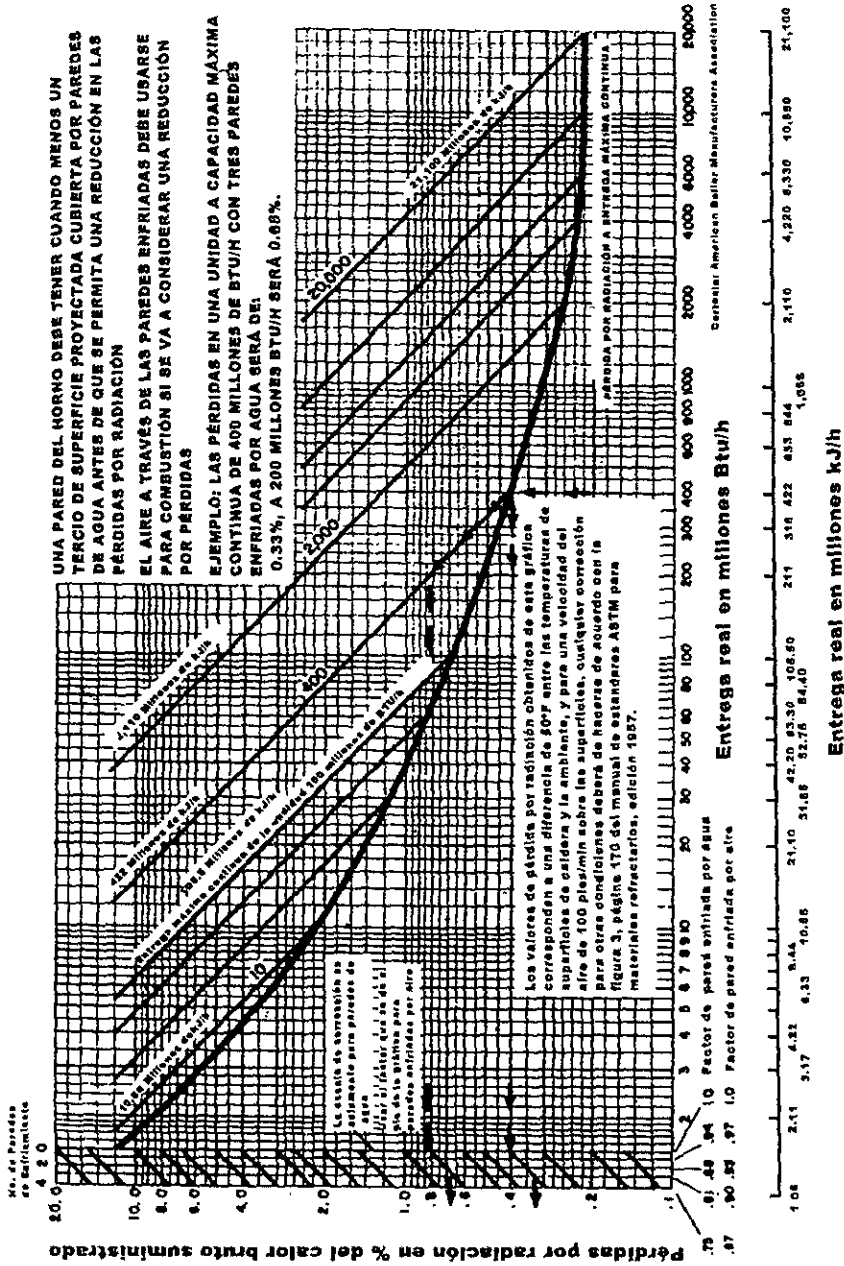


Figura 5.7 Tabla de equivalencias

	KG-H	LI-ALM	CC-ALM	BPC	BPCI	PC GAS NAT	0% C.O	LS CARBON	LS PLASERA	LS PASURA	LS VAPOR
2006	1 0197E-08	9 0689E-10	9 8697E-07	1 5397E-17	1 1707E-17	5 478E-14	6 6346E-16	7 098E-15	1 1848E-14	2 3695E-14	0 0666E-14
2007	0 010197	0 00906894	9 06923267	5 5797E-10	1 1707E-10	9 478E-07	6 6346E-09	7 099E-08	1 1848E-07	2 3695E-07	0 0666E-07
OR-CAL	0 42665	0 04131207	41 3132945	6 6142E-10	4 8994E-10	5 9685E-06	2 778E-07	3 3071E-07	4 9606E-07	9 9277E-07	3 3774E-06
LO-CAL	426 65	41 3120714	41 3132945	6 6142E-07	4 8994E-07	5 9685E-03	2 778E-05	0 00033071	0 00049606	0 00099277	0 00337745
PIEACN	4 2665E-14	4 1312E-13	4 1313E+16	6 6142E-06	4 8993E-272	3 9685E-9	2 779E-06	3 3070E-33	4 9606E-500	9 9277E-000	3 3774E-9
LI-CAL	0 42712916	0 04133909	41 3403134	6 6165E-10	4 9026E-10	3 9711E-06	2 779E-06	3 3092E-07	4 9639E-07	9 9277E-07	3 3797E-06
LI-HR	367 09	35 5297945	35 5297945	6 6883E-07	4 2136E-07	0 001413	2 3697E-05	0 00028442	0 00042663	0 00066325	0 00290468
KW-HR	3 67E-05	35 529 7945	35 529 672	0 00056883	0 00042136	3 413	0 02389107	0 28491667	0 426625	0 85325	2 904680885
HP-HR	2 24E-05	26 493 5753	26 493 936	0 00042416	0 00031421	2 54508	0 01761558	0 21209	0 318135	0 63627	2 16602553
BTU	107 365	10 4097268	10 410 0297	1 6667E-07	1 2348E-07	0 001	7E-06	8 333E-05	0 000125	0 00025	0 00085106
LI-0	0 138252	0 01338061	13 3809893	2 1423E-10	1 5889E-10	1 2854E-06	8 9278E-09	1 0712E-07	1 6068E-07	3 2135E-07	1 094E-06
KG-H	10 333	1 09677732	9 67600471	1 5494E-09	1 1477E-09	9 2967E-06	6 5077E-06	7 7472E-07	1 621E-06	2 3242E-06	7 912E-06
LI-ALM	0 01033271	0 00099997	1 000 02823	1 6011E-08	1 186E-08	9 6064E-06	6 7245E-07	8 0053E-06	1 2008E-05	2 4016E-05	8 1757E-05
CC-ALM	645 390 000	62 458 361	6 246E+10	1 601E-11	1 1859E-11	9 6064E-08	6 7243E-10	8 0051E-09	1 2008E-08	2 4015E-08	8 1754E-08
BPC	071 276 500	84 318 787	8 4321E+10	1 35	1	6 000	42 000042	300	750	1500	5 106 34298
BPCI	107 565	10 409 7268	10 410 021	0 00016667	0 00012346	1	6 000	6 75	1 012 5	2025	6 093 6702
PC GAS NAT	15 365 413	1 487 102 3	1 48714E+9	0 0238095	0 01763667	142 857	1	0 00333333	0 125	0 25	0 85108393
LO CARBON	1 290 788	124 916 722	124 920 249	0 002	0 000148148	12	0 08400006	1	1 5	3	10 212766
LS PASERA	660 520	63 277 8146	63 280 166	0 00133333	0 00098765	6	0 05600006	0 66666667	1	1	6 80851064
LS PASURA	430 269	41 638 9074	41 640 093	0 00066667	0 00049383	4	0 02000003	0 33333333	0 5	1	3 40425532
LS VAPOR	126 388 875	12 231 429	12 231 774	0 00039583	0 00014506	1 175	0 00022501	0 09791667	0 146875	0 29375	1

EJEMPLO 1 KW-HR = 0 00042136 BPCI

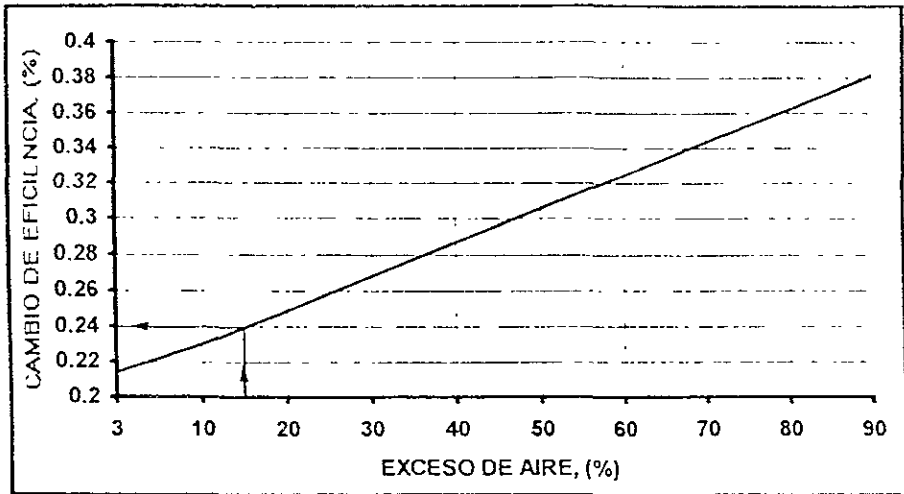


Figura 5.8. Cambio de eficiencia por variación en exceso de aire.

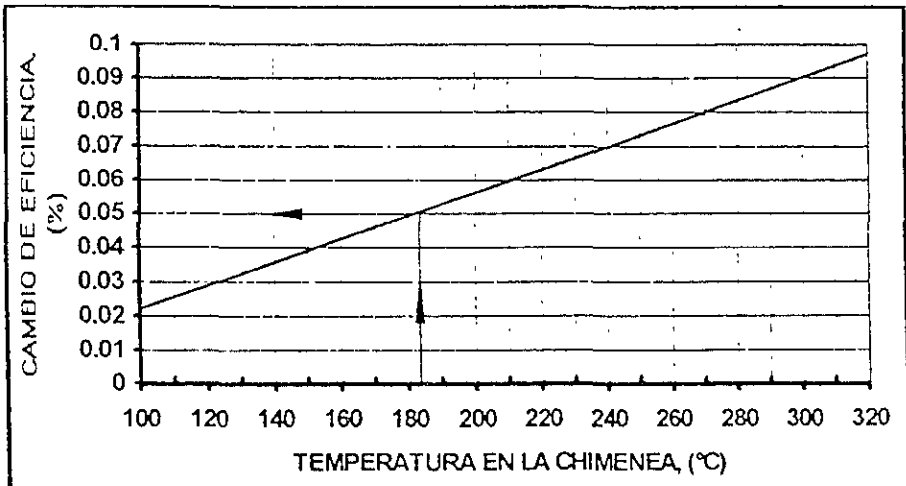


Figura 5.9. Cambio de eficiencia por variación de temperatura en chimenea.



# Parámetros de la combustión del gas natural

O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	AIRE EXCESO (POR UNDA) (KG/NM <sup>3</sup> )	GASES	PÉRDIDAS EN GAS DE COMBUSTIÓN (%), EN FUNCIÓN DE (TEMP. GAS) - TEMP. AMBIENTE (°C)																
				100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	
0.00	11.97	1.00	14.22	4.0	4.9	5.7	6.5	7.4	8.2	9.1	9.9	10.8	11.6	12.5	13.4	14.2	15.1	16.0	16.9	
0.50	11.68	1.02	14.52	4.1	5.0	5.8	6.7	7.5	8.4	9.2	10.1	11.0	11.9	12.7	13.6	14.5	15.4	16.3	17.2	
1.00	11.40	1.04	14.83	4.2	5.1	5.9	6.8	7.7	8.5	9.4	10.3	11.2	12.1	13.0	13.9	14.8	15.7	16.6	17.5	
1.50	11.11	1.06	15.16	4.3	5.2	6.1	6.9	7.8	8.7	9.6	10.5	11.4	12.3	13.2	14.2	15.1	16.0	16.9	17.9	
2.00	10.82	1.09	15.50	4.4	5.3	6.2	7.1	8.0	8.9	9.8	10.7	11.7	12.6	13.5	14.5	15.4	16.3	17.3	18.2	
2.50	10.54	1.12	15.87	4.5	5.4	6.3	7.2	8.2	9.1	10.0	11.0	11.9	12.9	13.8	14.8	15.7	16.7	17.7	18.6	
3.00	10.25	1.15	16.25	4.6	5.5	6.5	7.4	8.3	9.3	10.3	11.2	12.2	13.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.0	19.0	
3.50	9.96	1.18	16.66	4.7	5.6	6.6	7.6	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.4	15.4	16.4	17.5	18.5	19.5	
4.00	9.68	1.21	17.09	4.8	5.8	6.8	7.7	8.7	9.7	10.7	11.7	12.8	13.8	14.8	15.8	16.8	17.9	18.9	19.9	
4.50	9.39	1.24	17.54	4.9	5.9	6.9	7.9	9.0	10.0	11.0	12.0	13.1	14.1	15.2	16.2	17.3	18.3	19.4	20.4	
5.00	9.10	1.28	18.03	5.0	6.1	7.1	8.1	9.2	10.2	11.3	12.3	13.4	14.5	15.5	16.6	17.7	18.8	19.9	20.9	
5.50	8.81	1.32	18.55	5.2	6.2	7.3	8.4	9.4	10.5	11.6	12.7	13.8	14.9	16.0	17.1	18.2	19.3	20.4	21.5	
6.00	8.53	1.36	19.10	5.3	6.4	7.5	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.1	15.3	16.4	17.5	18.7	19.8	20.9	22.1	
6.50	8.24	1.40	19.69	5.5	6.6	7.7	8.8	10.0	11.1	12.3	13.4	14.6	15.7	16.9	18.0	19.2	20.4	21.5	22.7	
7.00	7.95	1.45	20.32	5.6	6.8	7.9	9.1	10.3	11.4	12.6	13.8	15.0	16.2	17.4	18.6	19.8	21.0	22.2	23.4	
7.50	7.67	1.50	21.00	5.8	7.0	8.2	9.4	10.6	11.8	13.0	14.2	15.5	16.7	17.9	19.1	20.4	21.6	22.9	24.1	
8.00	7.38	1.56	21.73	6.0	7.2	8.5	9.7	10.9	12.2	13.4	14.7	16.0	17.2	18.5	19.8	21.1	22.3	23.6	24.9	
8.50	7.09	1.62	22.53	6.2	7.5	8.8	10.0	11.3	12.6	13.9	15.2	16.5	17.8	19.1	20.4	21.8	23.1	24.4	25.8	
9.00	6.81	1.68	23.39	6.4	7.8	9.1	10.4	11.7	13.1	14.4	15.7	17.1	18.5	19.8	21.2	22.6	23.9	25.3	26.7	
9.50	6.52	1.75	24.32	6.7	8.1	9.4	10.8	12.2	13.6	14.9	16.3	17.7	19.1	20.6	22.0	23.4	24.8	26.3	27.7	
10.00	6.23	1.83	25.34	7.0	8.4	9.8	11.2	12.7	14.1	15.5	17.0	18.4	19.9	21.4	22.8	24.3	25.8	27.1	28.8	
10.50	5.95	1.91	26.46	7.2	8.7	10.2	11.7	13.2	14.7	16.2	17.7	19.2	20.7	22.3	23.8	25.3	26.9	28.4	30.0	
11.00	5.66	2.00	27.69	7.6	9.1	10.7	12.2	13.8	15.3	16.9	18.5	20.1	21.7	23.3	24.9	26.5	28.1	29.7	31.3	
11.50	5.37	2.10	29.06	7.9	9.5	11.2	12.8	14.4	16.1	17.7	19.4	21.0	22.7	24.3	26.0	27.7	29.4	31.1	32.8	
12.00	5.08	2.22	30.57	8.3	10.0	11.7	13.4	15.1	16.9	18.6	20.3	22.1	23.8	25.6	27.3	29.1	30.8	32.6	34.4	
12.50	4.80	2.34	32.27	8.8	10.6	12.3	14.1	15.9	17.8	19.6	21.4	23.2	25.1	26.9	28.8	30.6	32.5	34.3	36.2	
13.00	4.51	2.49	34.19	9.3	11.2	13.0	14.9	16.9	18.8	20.7	22.6	24.5	26.5	28.4	30.4	32.4	34.3	36.3	38.3	
13.50	4.22	2.65	36.36	9.8	11.8	13.8	15.9	17.9	19.9	21.9	24.0	26.0	28.1	30.2	32.2	34.1	36.4	38.5	40.6	
14.00	3.94	2.83	38.86	10.5	12.6	14.8	16.9	19.1	21.2	23.4	25.6	27.8	30.0	32.2	34.4	36.6	38.8	41.0	43.3	
14.50	3.65	3.05	41.74	11.2	13.5	15.8	18.1	20.4	22.7	25.1	27.4	29.7	32.1	34.5	36.8	39.2	41.6	44.0	46.4	
15.00	3.36	3.30	45.11	12.1	14.6	17.1	19.5	22.0	24.5	27.0	29.6	32.1	34.6	37.1	39.7	42.3	44.8	47.4	50.0	

**ANEXO 6. MEMORIA DE CALCULO. EVALUACION ECONOMICA.**

La memoria de calculo se ejemplifica considerando la instalación del precalentador de aire

INVERSION TOTAL		
Equipo principal	dls \$	\$
Recuperador de calor	120,000	1,128,000
<b>Costos varios</b>		
INSTALACIÓN Y ARRANQUE(10% del costo del equipo)	Costos estimados dentro del	
OBRA CIVIL (incluida en costos de instalacion)	precio del equipo	
INGENIERIA Y SUP DE CONST (5% del costo de equipo)		
ARRAN,TRANSP,SEGURO,IMP,ETC (5 % del costo de equipo)		
<b>Total</b>	<b>120,000</b>	<b>1,128,000</b>

Se considera 1 dls\$ igual a 9.40 \$pesos

Se considera 3 cifras significativas para los calculos realizados en este trabajo de tesis

**FLUJO NETO DE EFECTIVO AÑO 1****INGRESO**

Ahorros por el ahorro de combustible

**EGRESO**

Costo de mantenimiento y operación

Amortización de capital (AmC) = (financiamiento)

Total de egreso

Flujo neto de efectivo (FNE)

$$\text{INGRESO} - \text{EGRESO} = \text{FNE}$$

FNEacum = (FNE anterior + FNE ejercicio actual)

Tasa de interés = 21%

n = numero de año

Valor presente neto anual =  $\text{FNE} / (1+i)^n$

Valor presente neto (VPN)= Suma del valor presente anual

Relacion beneficio/ costo =  $\text{VPB}/\text{VPNC}$

Tasa interna de retorno = Es la i que hace que el  $\sum \text{FNE} / (1+i)^n = \text{lo}$

Recuperación de la inversión = es el año en que  $\text{FNEacum} = 0$

**TABLA 6.A.EVALUACION ECONOMICA PARA LA INSTALACION DE UN QUEMADOR DE BAJO EXCESO DE AIRE**

**PARAMETROS BASICOS.**

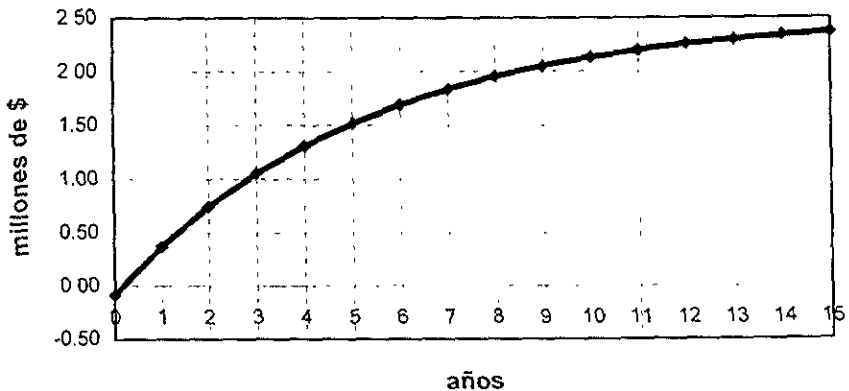
inversión:	80,000	\$
horizonte:	5	años
ahorro neto mensual:	50,782	\$
tasa de descuento:	21%	

**RESULTADOS PRINCIPALES.**

inversión:	80,000	\$
VP ahorro anual:	545,376	\$

VP PROYECTO:	1,515,761	\$
BENEFICIO/COSTO:	19.95	
TIR:	682%	
TIEMPO RECUP.DESC.:	0.18	años

**FUNCION DEL VALOR PRESENTE**



**TABLA 6.B.EVALUACION ECONOMICA PARA LA INSTALACION DE UN PRECALENTADOR DE AIRE**

**PARAMETROS BASICOS.**

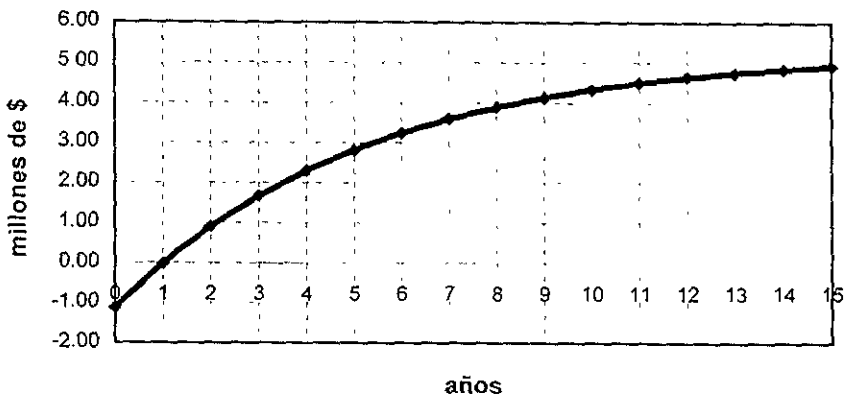
inversión.	1,130,000	\$
horizonte.	10	años
ahorro neto mensual.	125,387	\$
tasa de descuento:	21%	

**RESULTADOS PRINCIPALES.**

inversión:	1,130,000	\$
VP ahorro anual:	1,346,600	\$

VP PROYECTO:	4,329,221	\$
BENEFICIO/COSTO:	4.83	
TIR:	119%	
TEMPO RECUP.DESC.:	1.02	años

**FUNCION DEL VALOR PRESENTE**



## ANEXO 7.

# DIRECTORIO PRODUCTO - PROVEEDOR PARA EQUIPAMIENTOS PRINCIPALES

### ANALIZADORES DE COMBUSTION

ac	A&B SISTEMAS S.A. DE C.V.*
ac	AMETEK, INC. PROCESS & ANALYTICAL INSTRUMENTS DIV.*
ac	AUROTRONICS*
ac	BACHARACH, INC.*
ac	BAILEY MEXICO, S.A. DE C.V.*
ac	CLEAVER-BROOKS*
ac	COSMOS GAS DETECTION SYSTEMS DIV. OF SAM DICK INDUSTRIES
ac	DAVIS INSTRUMENTS MFG. CO. INC.*
ac	DWYER INSTRUMENTS, INC.*
ac	INTEC CONTROLS INC.
ac	METROSONICS, INC.
ac	MINE SAFETY APPLIANCES CO.*
ac	PANAMETRICS, INC.*
ac	ROSEMOUNT ANALYTICAL, INC.*
ac	SENSIDYNE, INC.
ac	SIERRA MONITOR CORP.*
ac	SOLOMAT NEOTRONICS
ac	TELEDYNE ANALYTICAL INSTRUMENTS*

### ACOPLAMIENTOS

aco	DODGE/RELIANCE ELECTRIC*
aco	FALK CORP., THE*
aco	GENERAL SIGNAL PUMP GROUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL
aco	HARMONIC DRIVE TECHNOLOGIES, TEIJIN SEIKI BOSTON, INC.
aco	LOVEJOY, INC.*
aco	RENBRANDT, INC.
aco	WOOD'S, T. B. SONS CO.*

### ALARMAS

al	AMETEK INC., PANALARM DIV.*
al	CLARK RELIANCE
al	DREXELBROOK ENGINEERING CO.*
al	FISCHER & PORTER*
al	GREAT LAKES INSTRUMENTS*
al	HANSEN TECHNOLOGIES
al	HONEYWELL INC.*
al	SEABORD ELECTRONICS
al	WARRICK CONTROLS, INC.*

### BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACION

baa	ALYAN PUMP, L. J. ALYAN CORP.
baa	AURORA PICSA*
baa	BURKS PUMPS
baa	BYRON JACKSON CO. S.A. DE C.V.*
baa	CLAYTON INDUSTRIES INC.*

**BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACION ( CONT. )**

baa CLEAVER-BROOKS\*  
baa COLUMBIA BOILER CO.  
baa DEMING DE MEXICO. S A. DE C.V.  
baa DUNHAM BUSH. INC. DUNHAM DIV  
baa FAIRBANKS MORSE  
baa FULTON COS. THE. FULTON BOILER WORKS. INC. FULTON THERMAL CORP  
baa GENERAL SIGNAL PUMP GROUP. A UNIT OF GENERAL SIGNAL  
baa GRUNDFOS PUMPS CORP.\*  
baa HURST BOILER CO. INC  
baa ITT FLUID HANDLING\*  
baa INDUSTRIAL STEAM  
baa INGERSOLL-RAND\*  
baa JOHNSTON\*  
baa KEWANEE BOILER CO., INC.\*  
baa KSB\*  
baa LATTNER MANUFACTURING CO  
baa NASH U.S.\*  
baa PVI INDUSTRIES. INC.  
baa PACO PUMPS. INC.  
baa PARKER BOILER CO  
baa RILEY STOKER CORP.  
baa ROTH PUMP CO.  
baa SENTINEL\*  
baa SIHI PUMPS. INC.  
baa SULZER\*  
baa STERLING INC., HEATING SPECIALTIES DIV.  
baa SUSSMAN AUTOMATIC CORP  
baa WILLIAMS & DAVIS BOILERS. INC.  
baa WORTHINGTON\*

**BOMBAS Y SISTEMAS DE RETORNO DE CONDENSADO**

bsc ALYAN PUMP, L. J. ALYAN CORP  
bsc ARMSTRONG\*  
bsc BESTOBELL\*  
bsc BRYAN STEAM CORP.  
bsc CLEAVER-BROOKS\*  
bsc COCHRANE ENVIRONMENTAL SYSTEMS. DIV., CRANE CO.\*  
bsc COLUMBIA BOILER CO.  
bsc CRANE CO.\*  
bsc DUNHAM BUSH. INC.  
bsc FULTON COS., THE. FULTON BOILER WORKS. INC., FULTON THERMAL CORP.\*  
bsc GELBER INDUSTRIES  
bsc GENERAL SIGNAL PUMP GROUP A UNIT OF GENERAL SIGNAL  
bsc ITT FLUID HANDLING\*  
bsc INDUSTRIAL BOILER CO.  
bsc JOHNSON CORP.\*  
bsc LATTNER MANUFACTURING CO  
bsc MODINE MFG. CO.  
bsc NASH U.S.\*  
bsc PACO PUMPS. INC.

*\*Fabricación o representación en México*

## BOMBAS Y SISTEMAS DE RETORNO DE CONDENSADO (CONT)

bsc ROTH PUMP CO  
bsc SPIRAX SARCO\*  
bsc STERLING INC HEATING SPECIALTIES DIV  
bsc SUSSMAN AUTOMATIC CORP  
bsc WILLIAMS & DAVIS BOILERS INC

## CALDERAS Y GENERADORES DE VAPOR

cg A C NIELSEN COMPANY \*  
cg B & W MEXICANA, S A DE C V \*  
cg BABCOCK AND WILCOX DE MEXICO, S A, DE C V \*  
cg BRYAN STEAM CORP  
cg BURNHAM CORP  
cg CERREY S A DE C V \*  
cg CHROMALOX, WEIGAND INDUSTRIAL DIV, EMERSON ELECTRIC CO \*  
cg CLARK RELIANCE  
cg CLAYTON DE MEXICO S A DE C V \*  
cg CLEAVER-BROOKS\*  
cg DALLAS BOILER MEXICANA, S A \*  
cg EUCO TECH PRODUCTS, INC  
cg FEDERAL BOILER CO  
cg FOSTER-WHEELER MEXICANA S A DE C V  
cg FULTON COS THE FULTON BOILER WORKS, INC, FULTON THERMAL CORP.\*  
cg HURST BOILER CO., INC  
cg IBW\*  
cg INTERNATIONAL BOILER WORKS CO THE  
cg JOHNSTON BOILER CO  
cg KEWANEE BOILER CO.\*  
cg LUKAUT\*  
cg MYRGGO S A, CALDERAS\*  
cg NEBRASKA  
cg PARKER BOILER CO  
cg POWERMASTER  
cg RILEY STOKER CORP  
cg SEMCO INC.  
cg SUSSMAN AUTOMATIC CORP.  
cg TELEDYNE LAARS\*  
cg WILKINS DIV, ZURN INDUSTRIES, INC  
cg WILLIAMS & DAVIS BOILERS, INC.  
cg YORK-SHIPLEY DIV, DONLEE TECHNOLOGIES, INC.\*

## COMPONENTES FISICOS DE GENERADOR DE VAPOR

cof AQUA-FLO, INC.  
cof BABCOCK & WILCOX DE MEXICO S A DE C V \*  
cof B & W MEXICANA, S.A. DE C.V.\*  
cof BRYAN STEAM CORP.  
cof BURNHAM CORP.  
cof CERREY, S.A. DE C.V.\*  
cof CHROMALOX, WEIGAND INDUSTRIAL DIV EMERSON ELECTRIC CO.\*  
cof CLARK RELIANCE  
cof CLEAVER-BROOKS\*

#### COMPONENTES FISICOS DE GENERADOR DE VAPOR (CONT)

caf EURO-TECH PRODUCTS, INC.  
caf FEDERAL BOILER CO.  
caf FULTON COS., THE FULTON BOILER WORKS, INC., FULTON THERMAL CORP.\*  
caf HURST BOILER CO., INC.  
caf ITT MCDONNELL & MILLER\*  
caf INTERNATIONAL BOILER WORKS CO., THE  
caf JOHNSTON BOILER CO.  
caf KEWANEE BOILER CO.\*  
caf PARKER BOILER CO.  
caf RILEY STOKER CORP.  
caf SEMCO INC.  
caf SUSSMAN AUTOMATIC CORP  
caf TELEDYNE LAARS\*  
caf WATTS REGULATOR CO.\*  
caf WILKINS DIV., ZURN INDUSTRIES, INC.  
caf WILLIAMS & DAVIS BOILERS, INC.  
caf WING CRAFT INDUCER CO.  
caf WOOD ENERGY SYSTEMS, INDUSTRIAL BOILER CO., INC.  
caf YORK-SHIPLEY DIV., DONLEE TECHNOLOGIES, INC.\*

#### CONDENSADORES

cond ALFA LAVAL, S.A. DE C.V.\*  
cond EVAPCO, INC.  
cond KETEMA, INC., HEAT TRANSFER DIV.  
cond SWECOMEX\*

#### CONTROLES DE COMBUSTION

contc AIR MONITOR CORP.  
contc ALLEN BRADLEY CO.\*  
contc ARMTEC/RAGEN, INC.  
contc BABCOCK & WILCOX DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
contc B & W MEXICANA, S.A. DE C.V.\*  
contc CSI CONTROL SYSTEMS INTERNATIONAL, INC.  
contc CERREY, S.A. DE C.V.\*  
contc CLAYTON DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
contc CLEAVER-BROOKS\*  
contc DANFOSS AUTOMATIC CONTROLS, DIV. OF DANFOSS, INC.\*  
contc ECLIPSE, INC.  
contc FENWAL  
contc FISCHER & PORTER CO.\*  
contc FISCHER-ROSEMOUNT SYSTEMS, INC.\*  
contc FOXBORO CO., THE\*  
contc HONEYWELL INC.\*  
contc LEEDS & NORTHRUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL\*  
contc NAO, INC.\*  
contc ROSEMOUNT ANALYTICAL, INC.\*  
contc SAXTON AIR SYSTEM, INC.  
contc TOTAL TEMPERATURE INSTRUMENTATION, INC.  
contc TRIAD TECHNOLOGIES, INC.  
contc WHITE-RODGERS DIV., EMERSON ELECTRIC CO.



## CONTROLES DE CONDUCTIVIDAD

contad GREAT LAKES INSTRUMENTS\*  
contad LEEDS & NORTHRUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL\*  
contad ROSEMOUNT ANALYTICAL, INC.\*  
contad STRANCO, INC

## CONTROLES DE VELOCIDAD VARIABLE

cw ABB SISTEMAS, S.A. DE C.V.\*  
cw AC TECHNOLOGY CORP  
cw ALLEN-BRADLEY CO.\*  
cw BALDOR ELECTRIC CO.\*  
cw BOSTON GEAR/CIBAD S.A. DE C.V.\*  
cw BARNANT CO.  
cw CATTRON, INC.  
cw CONTROL TECHNIQUES DRIVES, INC  
cw CUTLER-HAMMER, WESTINGHOUSE & CUTLER-HAMMER PRODUCTS\*  
cw DBS MFG.  
cw DODGE/RELIANCE ELECTRIC\*  
cw EATON, CUTLER HAMMER PRODUCTS\*  
cw FALK CORP., THE\*  
cw FINCOR ELECTRONICS DIV., IMO INDUSTRIES, INC  
cw FIRING CIRCUITS, INC  
cw FURNAS ELECTRIC, CO.  
cw GE-CO., GE BUSINESS INFORMATION CTR.\*  
cw GENERAL SIGNAL PUMP GROUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL  
cw GRAHAM CO.\*  
cw HALMAR ROBICON GROUP  
cw HARMONIC DRIVE TECHNOLOGIES, TEIJIN SEIKI BOSTON, INC.  
cw IDM CONTROLS  
cw KOLLMORGEN CORP., INLAND MOTOR  
cw LOVEJOY, INC.\*  
cw MAGNETEK\*  
cw MELINK CORP.  
cw MITSUBISHI ELECTRONICS AMERICA, INC.\*  
cw REXNORD CORP., LINK BELT DRIVE DIV  
cw SEW-EURODRIVE, INC.  
cw SCHNEIDER NORTH AMERICA\*  
cw SEPAC, INC.  
cw SIEMENS ENERGY & AUTOMATION, INC.\*  
cw SQUARE D COMPANY\*  
cw SUMITOMO MACHINERY CORP. OF AMERICA\*  
cw SYSTECON, INC.  
cw MOTORES U.S. DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
cw WOOD'S, T.B. SONS CO.\*  
cw YORK INTERNATIONAL, APPLIED SYSTEMS DIV.

## ...ECONOMIZADORES PARA CALDERAS

ec ABCO INDUSTRIES, INC.  
ec BABCOCK & WILCOX DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
ec B & W MEXICANA, S.A. DE C.V.\*  
ec CLAYTON INDUSTRIES, INC.\*

*\*Fabricación o representación en México*

## ECONOMIZADORES PARA CALDERAS (CONT.)

ec	CLEAVER-BROOKS*
ec	FULTON COS., THE FULTON BOILER WORKS, INC., FULTON THERMAL CORP.*
ec	HONEYWELL INC., COMMERCIAL BUILDINGS GROUP*
ec	INDUSTRIAL STEAM
ec	INTERNATIONAL BOILER WORKS CO., THE
ec	ISTA ENERGY SYSTEMS CORP
ec	KEWANEE BOILER CO., INC.*
ec	PARKER BOILER CO.
ec	RILEY STOKER CORP
ec	SCHOTT PROCESS SYSTEMS, INC.
ec	SIEBE ENVIRONMENTAL CONTROLS, INC
ec	WILLIAMS & DAVIS BOILERS, INC.
ec	YORK-SHIPLEY DIV., DONLEE TECHNOLOGIES, INC.*
ec	ZURN INDUSTRIES, INC., ENERGY DIV

## EQUIPO DE COMBUSTION

eqc	BABCOCK & WILCOX DE MEXICO, S.A. DE C.V.*
eqc	B & W MEXICANA, S.A. DE C.V.*
eqc	CERREY*
eqc	CLEAVER-BROOKS*
eqc	CROWN BOILER CO
eqc	DUNHAM BUSH, INC.
eqc	ECLIPSE, INC.
eqc	ENERCO TECHNICAL PRODUCTS, INC.
eqc	GORDAN-PIATT ENERGY GROUP
eqc	HURST BOILER CO.
eqc	INDUSTRIAL COMBUSTION, DIV. OF AQUA-CHEM, INC.
eqc	INTERCITY PRODUCTS CORP., AIRQUEST, HEIL & ZONEAIRE DIVS.
eqc	KEWANEE BOILER CO., INC.*
eqc	MAXON CORP.*
eqc	NAO, INC.*
eqc	PVI INDUSTRIES, INC.
eqc	POWER FLAME, INC.
eqc	POWERMASTER*
eqc	RILEY STOKER CORP.
eqc	TAMPELLA KEELER
eqc	WEBSTER ENGINEERING & MFG. CO., INC.
eqc	WHITE-RODGERS DIV., EMERSON ELECTRIC CO.
eqc	YORK-SHIPLEY DIV., DONLEE TECHNOLOGIES, INC.*
eqc	ZINK, JOHN, CO.

## EQUIPO DE MEDICION Y O CONTROL DE PURGAS

eqm	AQUA-FLO, INC.
eqm	AUTOMATION PRODUCTS, INC.
eqm	BRYAN STEAM CORP.
eqm	CLEAVER-BROOKS*
eqm	COCHRANE ENVIRONMENTAL SYSTEMS DIV., CRANE CO.
eqm	COLUMBIA BOILER CO.
eqm	DIVERSEY WATER TECHNOLOGIES, INC.
eqm	ITT FLUID HANDLING*

*\*Fabricación o representación en México*

#### EQUIPO DE MEDICIÓN Y O CONTROL DE PURGAS (CONT.)

eqm ITT MCDONNELL & MILLER\*  
eqm INDUSTRIAL BOILER CO., INC  
eqm LATTNER MANUFACTURING CO  
eqm NALCO CHEMICAL CO\*  
eqm O'BRIEN INDUSTRIES INC  
eqm ROSEMOUNT ANALYTICAL INC.\*  
eqm WEBER-JARCO INC  
eqm WILLIAMS & DAVIS BOILERS INC.  
eqm YORK-SHIPLEY DIV. DONLEE TECHNOLOGIES, INC.\*

#### EQUIPO DE TRATAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACION

eqt ALFA LAVAL S A DE C V\*  
eqt ASTRO-PURE WATER PURIFIERS  
eqt AQUA-CHEM\*  
eqt AQUAMEX, S A. DE C V\*  
eqt BRUNER CORP\*  
eqt CLEAVER-BROOKS\*  
eqt COCHRANE ENVIRONMENTAL SYSTEMS DIV. CRANE CO.\*  
eqt CRANE CO.  
eqt CULLIGAN\*  
eqt DEGREMONT\*  
eqt INDUSTRIAS MASS, S A. DE C V\*  
eqt LAWSOO\*  
eqt NALCO CHEMICAL CO\*  
eqt PELLETIER & CO\*  
eqt PERMUTIT CO INC.\*  
eqt QUIMICA ECOTEC, S A. DE C.V  
eqt SMITH & LOVELESS  
eqt U.S. FILTER\*

#### FILTROS PARA AGUA DE ALIMENTACION

fa AMETEK INC. PLYMOUTH PRODUCTS DIV.\*  
fa AQUA-FLO, INC.  
fa AQUAMEX\*  
fa ASTRO-PURE WATER PURIFIERS  
fa BRUNER CORP\*  
fa CPC ENGINEERING CORP.  
fa CLEAVER-BROOKS\*  
fa COCHRANE ENVIRONMENTAL SYSTEMS DIV. CRANE CO.\*  
fa CULLIGAN USA\*  
fa HALCO PRODUCTS, DIV. OF HALE ENGINEERING CO., INC.  
fa PERMUTIT CO., INC.\*  
fa POLYMER EQUIPMENT  
fa SMITH & LOVELESS

#### INTERCAMBIADORES DE CALOR MISCELANEOS

ic ARMSTRONG PUMPS, INC.\*  
ic BROWN FINTUBE\*  
ic BRYAN STEAM CORP  
ic CLEAVER-BROOKS\*

#### INTERCAMBIADORES DE CALOR MISCELANEOS (CONT.)

ic DOUCETTE INDUSTRIES, INC.  
ic DUNHAM-BUSH, INC.  
ic ITT FLUID HANDLING\*  
ic INDUSTRIAL COMBUSTION, DIV. OF AQUA-CHEM  
ic KETEMA, INC., HEAT TRANSFER DIV  
ic PARKER HANNIFIN CORP  
ic SWECOMEX\*  
ic THERMAL TRANSFER CORP

#### INTERRUPTORES DE NIVEL

in ADVANCED CONTROL TECHNOLOGY, INC  
in DWYER INSTRUMENTS, INC.\*  
in ITT MCDONELL & MILLER\*  
in POTTER ELECTRIC SIGNAL CO.

#### MEDIDORES DE VAPOR

mev BAILEY MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
mev EMCO\*  
mev FISCHER & PORTER, INC.\*  
mev GH FLOW AUTOMATION  
mev HERSEY MEASUREMENT CO.\*  
mev ISTA ENERGY SYSTEMS CORP.  
mev KOBOLD INSTRUMENTS, INC.\*  
mev PANAMETRICS\*

#### MOTORES ELECTRICOS

mot ABB MOTORES\*  
mot BALDOR DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
mot BURGESS-SAIA, INC.  
mot DRESSER-RAND CO., STEAM TURBINE, MOTOR & GENERATOR DIV.  
mot EASTERN AIR DEVICES  
mot ELECTRIC MOTORS & SPECIALTIES, INC.  
mot EMERSON MOTOR DIV.\*  
mot FASCO INDUSTRIES, INC., MOTOR DIV.  
mot FRANKLIN ELECTRIC  
mot GE CO., GE BUSINESS INFORMATION CTR.\*  
mot GENERAL DYNAMICS ELECTRO DYNAMIC  
mot IDEAL ELECTRIC CO.  
mot KOLLMORGEN CORP., INLAND MOTOR  
mot LINCOLN ELECTRIC CO., THE  
mot LITTON POLY SCIENTIFIC  
mot MAGNETEK  
mot MANNESMAN DEMAG CORP.  
mot MARATHON ELECTRIC MFG. CORP.  
mot PACO PUMPS, INC.  
mot PEERLES-WINSMITH, INC.  
mot RAPIDSYN DIV., AMERICAN PRECISION INDUSTRIES, INC.  
mot RELIANCE ELECTRIC\*  
mot RONK ELECTRICAL INDUSTRIES  
mot SEW-EURODRIVE, INC.

*\*Fabricación o representación en México*

## MOTORES ELECTRICOS (CONT)

mot SIEMENS\*  
mot SUMITOMO MACHINERY CORP OF AMERICA  
mot SUPERIOR ELECTRIC  
mot TECO AMERICAN, INC  
mot TOSHIBA INTERNATIONAL CORP  
mot U S DE MEXICO, S A DE C V \*  
mot IEM, S A, DE C V \*

## PRECALENTADORES DE AIRE TUBULARES O REGENERATIVOS

pa ABCO INDUSTRIES, INC.  
pa BABCOCK & WILCOX DE MEXICO S A DE C V \*  
pa BABCOCK MEXICANA, S A, DE C V \*  
pa BEAIRD INDUSTRIES INC  
pa CERREY\*  
pa CLAYTON INDUSTRIES INC \*  
pa DES CHAMPS LABORATORIES, INC  
pa ENERCORP  
pa HURST, BOILER CO, INC.  
pa INTERNATIONAL BOILER WORKS CO, THE  
pa JOHNSTON BOILER CO  
pa RILEY STOKER CORP  
pa SUPERIOR BOILER WORKS  
pa VAPOR-MARK IV  
pa VAPORPHASE ENGINEERING CONTROLS INC.  
pa YORK-SHIPLEY DIV., DONLEE TECHNOLOGIES INC \*  
pa ZINK, JOHN, CO.  
pa ZURN INDUSTRIES, INC., ENERGY DIV.

## SENSORES / CONTROLADORES DE NIVEL, PRESION Y TEMPERATURA

sc ABB KENT, INC \*  
sc AMETEK INC, PMT DIV \*  
sc BAILEY MEXICO, S A, DE C.V.\*  
sc BRISTOL BABCOCK, INC.\*  
sc CONTROL ENGINEERING, INC.  
sc COPE'S VULCAN INC.\*  
sc DAVIS INSTRUMENTS MFG. CO, INC.\*  
sc DREXELBROOK ENGINEERING CO.\*  
sc DWYER INSTRUMENTS, INC.\*  
sc FISCHER & PORTER CO.\*  
sc FISCHER CONTROLS INTERNATIONAL INC.\*  
sc FOXBORO\*  
sc GREAT LAKES INSTRUMENTS\*  
sc HANSEN TECHNOLOGIES  
sc HONEYWELL INC.\*  
sc ITT MCDONELL & MILLER\*  
sc LEEDS & NORTHRUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL\*  
sc MASONIELAN DRESSER\*  
sc WARRICK CONTROLS, INC \*  
sc WATT'S REGULATOR CO \*  
sc YARWAY CORP., KEYSTONE INTERNATIONAL, INC \*

## SENSORES DE FLUJO

sf AB3 KENT, INC.\*  
sf BAILEY MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
sf CARLON METER CO., INC.  
sf COPEL VULCAN INC.\*  
sf DREXELBROOK ENGINEERING CO.\*  
sf DWYER INSTRUMENTS, INC.\*  
sf EMCO\*  
sf FISCHER & PORTER CO.\*  
sf FLOW DESIGN, INC.  
sf FOXBORO\*  
sf GREAT LAKES INSTRUMENTS\*  
sf GRINNELL CORP.\*  
sf ITT FLUID HANDLING\*  
sf HONEYWELL INC.\*  
sf LEEDS & NORTHROP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL\*  
sf WATTS REGULATOR CO.\*

## SISTEMAS DE AISLAMIENTO TERMICO Y REFRACTARIO

siat A. F. GREEN DE MEXICO\*  
siat AMERICAN THERMAL PRODUCTS, INC.  
siat BISCO PRODUCTS  
siat CALORTEC\*  
siat CELL-U-FOAM\*  
siat COOPERHEAT, INC.  
siat CHILDERS PRODUCTS CO., INC.  
siat DOW PLASTICS  
siat DRITHERM, INC.  
siat ESPECIALIDADES TERMICAS SULTANA\*  
siat GOODTEMP\*  
siat HALSTEAD INDUSTRIES, INC.  
siat JOHNS MANVILLE\*  
siat KNAUF FIBERGLASS  
siat NACIONAL DE AISLANTES TERMICOS\*  
siat OWENS-CORNING FIBERGLAS CORP.\*  
siat PABCO\*  
siat PAMSIL-ROLAN\*  
siat PITTSBURGH CORNING\*  
siat RATSA\*  
siat SANDEX, INC.  
siat SANDEX, DIV. OF COOPERHEAT, INC.  
siat SCHULLER INTERNATIONAL\*  
siat VITROFIBRAS, S.A.\*  
siat WOOD, E. O., CO., INC.

## SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO

sidf ABB KENT, INC.\*  
sidf BAILEY MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
sidf FISCHER & PORTER CO.\*  
sidf FLOW DESIGN, INC.  
sidf FOXBORO CO., THE\*

## SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO (CONT.)

sicf GREAT LAKES INSTRUMENTS\*  
sicf HONEYWELL INC.\*  
sicf LEEDS & NORTHRUP, A UNIT OF GENERAL SIGNAL\*

## TRAMPAS DE VAPOR

iv ARMSTRONG INTERNATIONAL\*  
iv BESTOBELL STEAM, DIV OF RICHARD INDUSTRIES\*  
iv CLARK RELIANCE  
iv DUNHAM-BUSH INC.  
iv GRINNELL CORP.\*  
iv ITT FLUID HANDLING\*  
iv NICHOLSON STEAM TRAP, INC  
iv OGONTZ CONTROLS CO  
iv SPENCE ENGINEERING CO., INC.\*  
iv SPIRAX SARCO, S.A. DE C.V.\*  
iv STERLING, INC., HEATING SPECIALTIES DIV  
iv THERMAL ANALYSIS SYSTEMS  
iv WATTS REGULATOR CO.\*  
iv WRIGHT-AUSTIN CO  
iv YARWAY CORP., KEYSTONE INTERNATIONAL, INC.\*

## TRANSMISIONES MECANICAS O HIDRAULICAS

ix BURGESS-SAIA, INC  
ix CONE DRIVE/TEXTRON  
ix DBS MFG.  
ix DODGE/RELIANCE ELECTRIC\*  
ix FALK CORP., THE\*  
ix HARMONIC DRIVE TECHNOLOGIES TEIJIN SEIKI BOSTON, INC.  
ix PHILADELPHIA GEAR CORP.\*  
ix REDUCTORES JIV DE MEXICO, S.A. DE C.V.\*  
ix SUMITOMO MACHINERY CORPORATION OF AMERICA\*  
ix U.S. DE MEXICO S.A. DE C.V.\*

## VALVULAS DE CONTROL

vc ASAHI AMERICA\*  
vc COPES VULCAN INC.\*  
vc DANFOSS AUTOMATIC CONTROLS\*  
vc DEZURIK\*  
vc DWYER INSTRUMENTS, INC.\*  
vc ERIE MANUFACTURING CO  
vc FISHER CONTROLS INTERNATIONAL INC.\*  
vc FOXBORO CO., THE\*  
vc GRINNELL CORP.\*  
vc HAMMOND VALVE  
vc HANSEN TECHNOLOGIES  
vc HONEYWELL INC.\*  
vc ITT FLUID HANDLING\*  
vc JOHNSON CONTROLS INC.\*  
vc JORDAN VALVE\*  
vc KEYSTONE VALVE USA, INC.\*

#### VALVULAS DE CONTROL (CONT.)

vc MASONIELAN DRESSER\*  
vc NELES-JAMESBURY CORP.\*  
vc NORGREN\*  
vc PARKER HANNIFIN CORP., SCHRADER BELLOWS DIV.\*  
vc ROSS VALVE MFG. CO., INC.\*  
vc SPIRAX SARCO, S.A. DE C.V.\*  
vc VALTEK\*  
vc WATTS AUTOMATIC CONTROL VALVE\*  
vc WATTS REGULATOR CO.\*  
vc WAUKESHA FLUID HANDLING, A UNITED DOMINION CO.  
vc WORCESTER CONTROLS CORP.\*  
vc XOMOX CORP.  
vc YARWAY CORP., KEYSTONE INTERNATIONAL DIV.\*

#### VALVULAS DE PURGA

vp ANCHOR/DARLING VALVE CO.  
vp BIRKETT/RICHARDS\*  
vp CONTROMATICS, COMMERCIAL DIV.  
vp ITT MCDONNELL & MILLER\*  
vp MILWAUKEE VALVE CO. INC.  
vp TRUSEAT\*  
vp WAUKESHA FLUID HANDLING, A UNITED DOMINION CO.  
vp YARWAY CORP., KEYSTONE INTERNATIONAL INC.\*

#### VENTILADORES DE TIRO FORZADO Y TIRO INDUCIDO

vt ACME ENGINEERING & MFG. CORP.  
vt BAYLEY FAN GROUP  
vt BUFFALO FORGE S.A. DE C.V.\*  
vt CHICAGO BLOWER CORP.\*  
vt FIELD CONTROLS CO., THE  
vt HOWDEN SIROCCO, INC.  
vt INDUSTRIAL AIR  
vt PENN VENTILATOR CO.\*  
vt ROBINSON INDUSTRIES, INC.  
vt TWIN CITY FAN & BLOWER CO., INC.  
vt WING DRAFT INDUCER CO.  
vt ZURN INDUSTRIES, INC., AIR SYSTEMS DIV.