

140



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ANALISIS DE OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGIA TERMICA EN UNA REFINERIA DE JARABES DE MAIZ

299056

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA
ALEXIS VLADIMIR MORA GARCIA



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

"Si yo hablase lenguas humanas y angélicas y no tengo amor, vengo a ser metal que resuena, o címbalo que retiñe.

Y si tuviese profecía, y entendiese todos los misterios y toda ciencia, y si tuviese toda la fe, de tal manera que trasladase los montes, y no tengo amor nada soy.

Y si repartiese todos mis bienes para dar de comer a los pobres, y si entregase mi cuerpo para ser quemado, y no tengo amor, de nada me sirve.

El amor es sufrido, es benigno; el amor no tiene envidia, el amor no es jactancioso, no se envanece; no hace nada indebido, no busca lo suyo, no se irrita, no guarda rencor; no se goza de la injusticia, más se goza de la verdad.

Todo lo sufre, todo lo cree, todo lo espera, todo lo soporta.

Y ahora permanecen la fe, la esperanza y el amor, estos tres; pero el mayor de ellos es el amor. "

Corintios 13:1-13

Te doy Gracias Señor Jesucristo por haberme dado la vida y guiado a través de mi camino, porque cuando estaba perdido tu me encontraste, porque cuando perdía el rumbo tu me orientaste, porque cuando me sentía solo tu estabas ahí, Gracias simplemente por estar conmigo en todo momento y cuidarme.

Te pido Señor que Bendigas a mis padres, familia y amigos por haberme apoyado incondicionalmente en todo momento en todos los sentidos, sin ustedes no lo hubiera logrado.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que me has dado a cambio de tan poco. Por enseñarme un poquito del inmenso universo, porque no solo eres libros y edificios, sino además un ser con vida. Porque aquí conocí a personas muy especiales como mi novia, amigos, profesores, trabajadores, etc. que me ayudaron en el camino y porque estoy orgulloso de ser universitario. Estoy en deuda contigo.

Gracias a ti Yadira porque desde que tu llegaste a mi vida, la vida se ve de una manera muy especial. Y a ti Rubén por tu amistad, gran nobleza y buen corazón.

Gracias a mi asesor, Ing. José Samano, por ayudarme cuando más lo necesitaba.

Que Dios les llene de bendiciones y amor sus vidas.

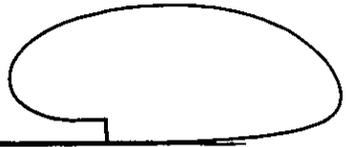
Jurado asignado:

Presidente	Prof. ERNESTO PÉREZ SANTANA
Vocal	Prof. RODOLFO TORRES BARRERA
Secretario	Prof. JOSÉ SABINO SAMANO CASTILLO
1er. Suplente	Prof. BALDOMERO PÉREZ GABRIEL
2do. Suplente	Prof. EDUARDO FLORES PALOMINO

Sitio donde se desarrollo el tema: Coordinación de Gestión de Calidad Productiva de la Secretaría de Investigación y Desarrollo, perteneciente a la Coordinación de la Investigación Científica, UNAM

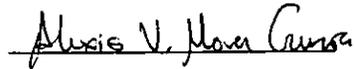
Nombre completo y firma del asesor del tema:

M. en I. JOSÉ SABINO SAMANO CASTILLO



Nombre completo y firma del sustentante:

ALEXIS VLADIMIR MORA GARCÍA



CONTENIDO

PÁGINA

RESUMEN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO II. PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS DE CALOR	4
2.1 Fuentes primarias	4
2.1.1 <i>Pérdidas de calor por radiación y convección</i>	5
2.1.2 <i>Fugas</i>	14
2.1.3 <i>Válvulas de seguridad</i>	16
2.1.4 <i>Trampas de vapor</i>	17
2.2 Fuentes secundarias	20
2.2.1 <i>Gases de desperdicio</i>	20
2.2.2 <i>Vapor de baja presión</i>	21
2.2.3 <i>Condensados</i>	22
2.2.4 <i>Purgas</i>	23
2.2.5 <i>Vapores de evaporadores y cristalizadores</i>	25
2.2.6 <i>Efluentes de agua caliente</i>	26
CAPITULO III. REDUCCIÓN DE CARGAS TÉRMICAS, APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS PROCESOS Y REUSOS DE CALOR	28
3.1 Reducción de temperaturas de proceso	29
3.2 Reducción de reproceso	30
3.3 Procesamiento eficiente de los materiales de proceso y operación a carga térmica de diseño	30
3.4 Separación mecánica de agua	31
3.5 Ventajas de reacciones exotérmicas y calores de disolución	33
3.6 Incremento de rendimiento	33
3.7 Reusos de calor	34

CAPITULO IV. SISTEMA EFICIENTE DE CALDERA	37
4.1 Sistema de combustión	40
4.2 Recuperación de calor	42
4.2.1 <i>Generación de vapor</i>	43
4.2.2 <i>Precalentamiento de agua de alimentación a calderas</i>	45
4.2.3 <i>Precalentamiento de aire de combustión</i>	46
4.2.4 <i>Super calentamiento de vapor</i>	46
4.2.5 <i>Precalentamiento a corrientes de proceso</i>	47
4.2.6 <i>Medio de circulación de calentamiento</i>	47
4.3 Tratamiento de agua	48
4.3.1 <i>Incrustación</i>	49
4.3.2 <i>Sedimentación</i>	50
4.3.3 <i>Corrosión</i>	50
4.3.4 <i>Índices de estabilidad</i>	51
4.3.5 <i>Arrastre de contaminantes</i>	52
4.3.6 <i>Sistema de control de impurezas</i>	53
4.4 Prácticas deficientes de operación	56
CAPÍTULO V. ELABORACIÓN DE ESTUDIOS ENERGÉTICOS INTEGRALES	58
5.1 Análisis de sistemas de cogeneración	58
5.2 Información requerida para el análisis	68
5.3 Principales factores que definen la viabilidad del proyecto	70
5.4 Selección y análisis del sistema de cogeneración	71
CAPÍTULO VI. LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA TÉRMICA	73
6.1 Programa de administración de energía	73
6.1.1 <i>Objetivos del programa de administración</i>	73
6.1.2 <i>Descripción del modelo de administración</i>	74
6.1.2.1 <i>Inventario de información técnica</i>	74
6.1.2.2 <i>Análisis histórico</i>	76
6.1.2.3 <i>Metas</i>	77
6.1.2.4 <i>Mejoras a la operación y mantenimiento</i>	78
6.1.2.5 <i>Análisis detallado del proceso</i>	79

6.1.2.6	<i>Definición de oportunidades</i>	82
6.1.2.7	<i>Evaluación económica y viabilidad de las oportunidades</i>	83
6.1.2.8	<i>Reporte final</i>	84
6.2	Descripción del proceso de molienda húmeda del maíz	85
6.3	Refinería de jarabes de maíz	88
6.3.1	<i>Descripción del proceso de fabricación de jarabes de maíz</i>	88
6.3.2	<i>Propiedades y aplicaciones de los jarabes de maíz</i>	93
6.4	Lineamientos estratégicos para la optimización de uso de energía	95
CAPITULO VII. CONCLUSIONES		98
CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA		100
ANEXO TÉCNICO		

LISTA DE TABLAS

No.	TITULO	PAGINA
1.	Conductividad térmica de diferentes materiales	9
2.	Pérdidas de calor en superficies planas	10
3.	Pérdidas de calor en tubería de 152.4 mm	13
4.	Flujo de vapor perdido debido a fugas	15
5.	Concentraciones estándar para agua de calderas	24

LISTA DE FIGURAS

No.	TITULO	PÁGINA
1.	Ahorro de energía por aislamiento	11
2.	Por ciento de flash de vapor	21
3.	Esquema general de cogeneración	59
4.	Cogeneración contra sistema convencional	61
5.	Turbina de Vapor a extracción-condensación	64
6.	Turbina de gas	65
7.	Esquema de ciclo combinado	66
8.	Esquema de motor alternativo	67
9.	Modelo de administración de energía	74
10.	Curva de energía del proceso	77
11.	Recepción de maíz	85
12.	Maceración del maíz	86
13.	Separadores ciclónicos de germen	86
14.	Separadores de fibra	87
15.	Hidrociclones lavadores de almidón	87
16.	Jarabe de maíz	88
17.	Diagrama de bloques de proceso de una planta de jarabes de maíz	92

LISTA DE ECUACIONES

No.	TITULO	PAGINA
1.	Ecuación de transferencia de calor	6
2.	Ecuación de Stefan-Boltzman	11
3.	Energía perdida por purgas	24
4.	Tiempo de retención promedio	30
5.	Reacciones de oxidación	40
6.	Reacción de formación de magnetita	50
7.	Reacción de formación de CO ₂ vía carbonato ácido	51
8.	Reacción de formación de CO ₂ vía carbonato	51
9.	Ecuación de Langelier	52
10.	Ecuación de estabilidad o Ryznar	52

RESUMEN

La competitividad de productos y servicios en el mercado, se mide básicamente en dos aspectos, calidad y costo. En la medida en que la dirección de una empresa invierta en programas para mejorar estos dos aspectos, estará asegurando su bienestar y porvenir financiero.

Los factores que inciden en el costo de operación, están gobernados por dos variables independientes. El incremento en los precios de los combustibles, y la baja eficiencia energética de operación de la planta.

El precio del combustible, es establecido por acuerdos políticos, comerciales y la demanda energética. El alza en los precios de los combustibles, aunado con elevados consumos y las cada vez más estrictas legislaciones ambientales, obligan a las empresas a implementar e invertir en programas enfocados en disminuir al mínimo posible el consumo energético.

El presente trabajo, surge de la necesidad de abatir los costos de operación al mínimo posible por concepto de consumo de energía térmica en una planta de jarabes de maíz, para fabricar productos al más bajo costo, por lo que está dirigido a los sistemas de generación, distribución y utilización de vapor; manejo de condensados y detección de pérdidas de calor por convección, radiación, conducción y fugas.

Para lograr el ahorro de energía y la eficiencia energética de las operaciones, se propone entre otros, disminuir las pérdidas de calor, reducir la carga térmica, el aprovechamiento energético de los procesos y reusos de calor, incrementar la eficiencia de operación de la caldera y elaborar estudios energéticos integrales. Estas acciones son analizadas y administradas por medio de un programa de administración de energía, que permite establecer lineamientos estratégicos generales para el ahorro de energía.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el mercado comercial se encuentra abierto a cualquier empresa que ofrezca sus productos y servicios. Para poder competir, las empresas invierten sus esfuerzos y recursos en proyectos, con el fin de elevar la calidad de sus productos y servicios, y disminuir sus costos, básicamente.

El concepto de calidad, se está implementando actualmente en todas las empresas que desean seguir compitiendo en los mercados tanto nacionales como internacionales. Estos sistemas, permiten a las empresas elaborar productos y proporcionar servicios de la más alta calidad, que satisfagan las necesidades de sus clientes. La calidad, implica una cultura que debe ser implementada en todas las áreas de la empresa, con el único propósito de satisfacer ampliamente a sus clientes. Para lograr este objetivo, se establece un sistema de calidad y los procedimientos necesarios para realizarlo. Sin embargo, una vez establecido, se requiere de una herramienta que permita mejorar las operaciones y actividades involucradas para aumentar la calidad de los productos y servicios, y llegar a anticiparse a las necesidades de sus clientes. El proceso que se emplea es el de mejora continua, el cual consiste de una serie de pasos secuenciales y lógicos que detectan las actividades productivas y no productivas, estableciendo así, procedimientos exitosos de operación. Cabe mencionar además, que este proceso es cíclico, ya que siempre es posible detectar nuevas oportunidades de hacer mejor las cosas.

Los beneficios de contar con un sistema de calidad son: satisfacción del cliente, la homogeneidad de los productos, abatimiento de producto no conforme, entregas a tiempo, y la creación de una nueva cultura de trabajo, contribuyendo la empresa a crear no solo bienes y servicios, sino además un aporte a la sociedad motivando el desarrollo humano del personal.

El costo de producción es el otro factor importante que determina el éxito en las operaciones de una empresa. Este costo se define, como la cantidad necesaria de recursos humanos y materiales que se requiere para elaborar productos y servicios en una planta totalmente instalada y equipada.

En una empresa, el costo de producción en general está formado por: materias primas; mano de obra directa e indirecta; materiales indirectos; insumos (energía eléctrica, agua, combustibles y productos químicos) y mantenimiento.

En la mayoría de las industrias (químicas, manufactureras, alimenticias, etc.), el uso de la energía es vital para llevar a cabo las transformaciones físicas o químicas de las materias primas. El impacto que la energía tiene sobre el costo de producción, varía de acuerdo al tipo de operaciones, costo de servicios, tecnología utilizada, administración y zona geográfica, entre otros.

Dos de los principales combustibles utilizados para la generación de energía son el gas natural y el diesel (en México proporcionados únicamente por PEMEX). Estos combustibles, se utilizan en centrales de generación de energía eléctrica y en empresas para generar medios de intercambio de energía térmica (gases calientes, vapor de agua, fluidos térmicos, etc.).

Los combustibles utilizados son provenientes de fuentes orgánicas no renovables, por lo que sus precios tienden a incrementarse al disminuir las reservas y aumentar la demanda, sin embargo, muchas veces estos precios se pueden fijar en acuerdos internacionales entre los principales países productores.

En México, desde el año de 1999 el gas natural y el diesel han registrado incrementos mensuales constantes en su costo, en el gas natural varía desde el 30% hasta el 200%, mientras que el diesel ha registrado un aumento constante del orden del 15%.

El incremento de los precios de los energéticos y la baja eficiencia de operación energética, son los factores que ponen en desventaja a las empresas al tratar de competir en el mercado.

Por lo anterior los objetivos son:

1. Identificar oportunidades de ahorro en energía térmica en un planta de jarabes de maíz.

2. Proponer una herramienta que permita la administración eficiente de la energía utilizada y consumida.
3. Identificar y abatir las principales fuentes de pérdidas de calor.
4. Identificar las prácticas de dirección y operación que propician la ineficiencia energética.
5. Motivar la recuperación de energía a partir de corrientes con alto contenido energético.
6. Disminuir la cantidad de emisiones gaseosas y efluentes a la atmósfera.
7. Señalar la necesidad de llevar a cabo estudios energéticos integrales.
8. Establecer las bases para la realización de un proyecto más riguroso de ahorro de energía.

Este trabajo, aporta a la empresa una metodología sistemática que permitirá tener un control preciso sobre la cantidad de energía requerida y utilizada, además de predecir el comportamiento energético de la planta a diversas condiciones, y finalmente así, poder llegar a establecer las bases para determinar el envejecimiento tecnológico.

Las limitaciones del estudio radican; en la validación práctica; el acceso a información técnica, diagramas de proceso, servicios, tuberías e instrumentación, manuales de operación, especificaciones y diseños de equipo, pruebas de equipo; reportes de fallas y mantenimiento, datos de operación, etc. También la falta de parámetros de comparación de plantas similares contra la planta de estudio, ya que es información confidencial.

El método que se propone para alcanzar los objetivos, consiste de un programa de administración de energía complementado y soportado con información técnica a partir de experiencias prácticas en la industria.

La ventaja de esta propuesta, radica en la flexibilidad de plantear objetivos y estrategias a seguir, primeramente de tal manera que se alcancen ahorros sustanciales con el mínimo de inversión, para después, a mediano y largo plazo depurar el sistema y alcanzar mayores logros; además, con los ahorros logrados en la primera parte se podría empezar a autofinanciar parte del proyecto.

CAPITULO II. PREVENCIÓN DE PÉRDIDAS DE CALOR

El calor es una forma de energía muy utilizada en la industria. Su aplicación útil abarca desde los procesos unitarios (separaciones físicas, procesos de transferencia de calor, flujo de fluidos, etc.), químicos (reacciones químicas y catálisis) hasta la generación de energía mecánica transformada a eléctrica. Los medios más utilizados en la industria, para el transporte y utilización de la energía térmica son: el vapor de agua, gas de combustión, agua y aire caliente, además de fluidos térmicos.

Es el vapor de agua el medio comúnmente utilizado, debido a sus excelentes propiedades: transporta un alto contenido de calor, cede su calor a temperatura constante, es producido a través de una fuente barata, es limpio, sin olor y sin sabor, el calor puede ser usado y reutilizado varias veces, puede generar potencia y proporcionar calentamiento como beneficio secundario, además de ser de fácil transporte y manejo.

Cuando el vapor se genera, distribuye, utiliza y acondiciona nuevamente para su subsiguiente generación, ocurren pérdidas de calor hacia el medio ambiente a lo largo de todo el proceso, debido a la existencia de grandes gradientes de temperatura (fuente motriz de la transferencia de calor) que se intercambian a través de los mecanismos de transferencia de calor (convección, conducción y radiación). La otra fuente de pérdida de energía se debe a los desperdicios de vapor vivo debido a fugas en líneas, accesorios, equipos de proceso, trampas de vapor, etc.

Sobre la base del sentido físico de observar las pérdidas de calor se pueden clasificar en fuentes primarias y secundarias.

2.1 Fuentes Primarias.

Las fuentes primarias se les conocen a aquellas que pierden vapor o medio de calentamiento de forma visible. A este vapor perdido se le conoce como "*vapor virgen*" ya que este se ha perdido sin que haya cedido su energía al proceso. Este tipo de pérdidas se encuentran principalmente en las tuberías o superficies calientes que no se encuentran aisladas o presentan aislamiento deficiente, en fugas de líneas de vapor y accesorios, en

emisiones a través del sistema de seguridad de recipientes a presión y en trampas de vapor. La característica más importante de las fuentes primarias es su facilidad de identificación, en estos casos no es necesario realizar algún análisis energético para conocerlas, bastan unos cálculos sencillos para conocer la magnitud de la pérdida. Debido a la sencilla identificación de estas causas, es de igual forma el solucionar los problemas que acarrea, soluciones que requieren escasa inversión para obtener grandes resultados.

La causa de las pérdidas de calor de este tipo se debe: aislamiento defectuoso o falta de, el desgaste de equipo e instalación por el uso, la falta de mantenimiento y servicio tanto preventivo como correctivo, selección de sistemas inadecuados de trampas de vapor y deficientes prácticas de operación principalmente.

La estrategia de solución de este tipo de problemas se basa, desde la selección adecuada de sistemas de aislamiento térmico, válvulas de seguridad y trampas de vapor; implementación de programas de servicio y mantenimiento a sistemas de tuberías, aislamiento térmico, válvulas de seguridad y trampas de vapor; hasta la eliminación inmediata de fugas de vapor o energía.

2.1.1. Pérdidas de calor por convección y radiación.

Cualquier sistema que genera, distribuye, utiliza y acondiciona un medio de calentamiento a un nivel energético superior al medio ambiente, cederá parte de su energía hacia el mismo hasta que ambos sistemas alcancen el equilibrio térmico; dependiendo de las condiciones de proceso, los tres mecanismos de transferencia de calor se llevan a cabo mutuamente, donde alguno de ellos es más predominante que los demás.

En el sistema generador de vapor, las pérdidas más notables son aquellas debido a la falta de aislamiento del sistema, ya que este puede llegar a alcanzar los 1000 C, dependiendo del tipo, capacidad y condiciones de operación, con lo cual pierde calor el sistema por radiación. La otra fuente de pérdida son los gases de desperdicio, que se analizarán en la sección 2.2.1.

El vapor y condensado se transportan a través de tuberías de diversas dimensiones físicas y materiales; a condiciones de presión y temperatura de acuerdo a la carga térmica

y al tipo de proceso a realizar (calentamiento y/o generación de potencia). Las pérdidas de calor del sistema de transporte se transmiten en forma de conducción, a través de cualquier superficie que se encuentre directamente en contacto con la superficie caliente (por lo general cualquier soporte utilizado, válvulas, trampas, accesorios, etc.); los mecanismos de convección natural y radiación se manifiestan en el intercambio de calor hacia el medio ambiente.

La cantidad de calor perdido a través de estos sistemas se cuantifica de acuerdo a la **Ecuación 1**, Ecuación de transferencia de calor :

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T. \text{ ———(1).}$$

Donde:

Q = cantidad de calor perdido (kJ/hr).

A = área de transferencia de calor (m²).

U = coeficiente global de transferencia de calor (kJ/hr *m²*C).

ΔT = es la diferencia de temperatura entre el vapor y el medio ambiente (K).

Para minimizar la cantidad de calor perdido a la atmósfera el objetivo es disminuir lo más posible el U, ya que el área de transferencia de calor y la diferencia de temperaturas son inherentes al sistema. Esto se logra utilizando barreras o fronteras que tienen la propiedad de ser malos conductores del calor, a este tipo de materiales se les conoce como aislantes, que tienen como objetivo el reducir la temperatura de la superficie expuesta, para abatir la transferencia de calor por convección y además interponer una capa opaca entre la superficie caliente y los alrededores para evitar la transferencia por radiación.

El aislamiento se define como aquellos materiales o combinación de los mismos, los cuales retardan el flujo de calor entre dos medios y sus principales objetivos son:

1. Conservación de la energía térmica por la reducción de pérdidas de calor.
2. Control de la temperatura superficial para protección y seguridad del personal.
3. Facilitar el control de temperatura del proceso.
4. Incrementar la eficiencia de operación térmica y uso de vapor.
5. Prevenir o minimizar el daño a equipo por exposiciones al fuego o atmósferas corrosivas.

El aislamiento térmico según la North American Insulation Manufacturers Association, (NAIMA) se clasifica de acuerdo a la región de temperatura, de los -73.3 C a los 815 C (-

100°F a 1500°F), las temperaturas por debajo de este intervalo se le conoce como la zona criogénica y por arriba de este se utilizan materiales conocidos como refractarios. Este intervalo se subdivide en:

- A. Aislamiento térmico de baja temperatura de -73.9 C a 15.6 C (-101°F a 60°F).
- B. Aislamiento térmico de temperatura intermedia de 16.1 C a 315.6 C (61°F a 600°F).
- C. Aislamiento térmico de alta temperatura de 316.1 C a 815.6 C (601°F a 1500°F).

Existen en el mercado diferentes tipos y formas de aislamiento, el tipo depende de la composición del material (vidrio o plástico) y la estructura interna (celular o fibrosa). La forma depende del tipo de aplicación (tuberías, superficies planas y preformadas).

Los tipos de aislamiento son:

- A. Aislamiento fibroso. Es un compuesto de fibras de diámetro pequeño que dividen finamente el espacio. Las fibras pueden ser perpendiculares u horizontales a la superficie a ser aislada, y pueden o no ser vinculadas entre sí. Los materiales utilizados son la sílica, fibra y lana mineral, fibras de alúmina y sílica. Los más comunes son la fibra de vidrio y la lana mineral.
- B. Aislamiento celular. Están compuestos de pequeñas células separadas unas de otras. El material celular puede ser de vidrio o un plástico espumado como el poliestireno (conocido como de célula cerrada), poliuretano, poliolefinas y elastoméricos.
- C. Aislamiento granular. Los materiales de este tipo están compuestos de pequeños módulos los cuales contienen espacios huecos o libres. No se considera un material verdaderamente celular, ya que el gas puede ser transferido entre los espacios individuales. Este tipo puede ser producido como un material disgregado o poroso, o combinado con compuestos aglomerantes y fibras, para producir un aislamiento rígido. Por ejemplo: silicato de calcio, vermiculita expandida, perlita, celulosa, tierras diatomáceas y PS expandido.

Las formas se fabrican de acuerdo a las funciones y aplicaciones del aislamiento, la combinación de la forma y el tipo determinan el método apropiado de su instalación. Las formas más utilizadas son:

- 1 Bloques rígidos, hojas y formas preformadas tales como medias cañas, segmentos curvos, etc. Los tipos utilizados para estas formas son el celular, granular y fibroso.

- 2 Hojas flexibles y formas preformadas, éstas se utilizan en aislamientos celulares y fibrosos.
- 3 Colchonetas flexibles, utilizados con materiales fibrosos.
- 4 Cementos (aislamiento y terminado), producidos de materiales fibrosos y granulares con cemento, se utilizan en montajes hidráulicos o del tipo de secado por aire.
- 5 Espumas, es un método práctico para rellenar áreas irregulares y huecos. El spray se utiliza principalmente en superficies planas (NAIMA, 2001)

Una de las principales propiedades de un buen aislante es que contenga la mayor cantidad de aire en su estructura, ya que es un conductor del calor 10,000 veces peor que el cobre. La formación de una capa aislante de aire sobre la superficie caliente que es calentada y reemplazada por otra más fría debido a su mayor densidad (convección natural), es el fenómeno de pérdida de calor. Este mecanismo se minimiza mediante la prevención de corrientes de aire que motiven la transferencia de calor. La radiación se limita utilizando un objeto que opaque o refleje la radiación, ya que si este material absorbe las radiaciones se calentará rápidamente y para evitar que este cuerpo irradie la energía, debe ser un mal conductor de la energía térmica. Muy pocos cuerpos son tan malos conductores como los gases.

El mejor material de aislamiento es el que consiste de una "esponja" microscópica donde todas las células se encuentran llenas con aire, además de ser un mal conductor del calor, opaco y que refleja la radiación. Las células deben ser muy pequeñas para evitar que las corrientes de convección se formen dentro de la red y transfieran el calor. El material además debe ser resistente mecánica y térmicamente.

En la **Tabla 1** se muestra una selección de materiales y su correspondiente conductividad térmica.

Tabla 1. Conductividad térmica de diferentes materiales

	Material	$\frac{\text{kJ aprox.}}{\text{hr} \cdot \text{m}^2 \cdot \Delta T^* (25.4 \text{ mm espesor})}$
Superficies calientes	Cobre	53,552
	Aluminio	29,229
	Latón	14,716
	Acero al carbón	6,949
	Acero	6,336
	Plomo	4,905
Películas	Agua a 32 °F	81
	Agua a 200 °F	102
	Aire	4
	Incrustación	20 a 245
Materiales Aislantes	Tierras diatomáceas	20.4
	85% magnesia	12.2
	Aglomerado de asbesto	8.1
	Lana de vidrio	8.1
	Pelo de animal	6.1
	Corcho	6.1

Fuente: (Lyle, 1963)

En la **Tabla 2** se presenta un aproximado de las pérdidas de calor en superficies planas con y sin aislamiento, a temperatura ambiente de 21 C (70°F), y en la **Tabla 3** se muestran las pérdidas de calor aproximadas de una tubería de 152.4mm (6") de diámetro con y sin aislamiento a temperatura ambiente de 21 C (70°F).

Tabla 2. Pérdidas de calor en superficies planas.

Temp. Interna °C	kJ/ m ² / hr						
	Espesor del aislante mm. (pulg)						
	Sin aislante	25.4 (1)	38.1 (1 1/2)	50.8 (2)	63.5 (2 1/2)	76.2 (3)	101.6 (4)
38	681	113	79	—	—	—	—
65	1,759	283	227	—	—	—	—
93	3,348	510	340	283	—	—	—
121	5,107	737	510	397	—	—	—
149	7,320	964	681	510	454	—	—
177	9,931	1,191	851	681	510	—	—
204	12,939	1,418	1,021	794	624	511	—
232	16,457	1,702	1,191	908	737	624	—
260	20,543	1,986	1,418	1,078	851	738	—
315	30,304	—	1,816	1,362	1,135	965	738
371	42,562	—	—	1,702	1,418	1,192	908
427	57,885	—	—	3,000	1,702	1,475	1,135

Fuente: (Lyle, 1963)

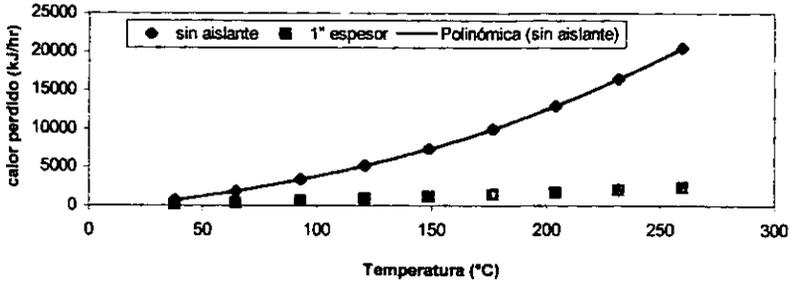
Tabla 3. Pérdidas de calor en una tubería de 152.4mm (6").

Temp. Interna °C	kJ/ m ² * hr						
	Espesor del aislante mm. (pulg)						
	Sin aislante	25.4 (1)	38.1 (1 1/2)	50.8 (2)	63.5 (2 1/2)	76.2 (3)	101.6 (4)
38	658	125	96	—	—	—	—
65	1,884	352	281	—	—	—	—
93	3,360	590	443	363	—	—	—
121	5,153	840	624	511	—	—	—
149	7,322	1,112	828	681	579	—	—
177	9,943	1,385	1,032	851	726	—	—
204	12,962	1,680	1,248	1,021	874	772	—
232	16,480	1,997	1,486	1,203	1,033	908	—
260	20,543	2,315	1,725	1,396	1,192	1,056	—
315	30,315	—	2,508	1,816	1,543	1,362	1,135
371	42,562	—	—	2,270	1,929	1,702	1,407
427	57,998	—	—	2,747	2,349	2,065	1,714

Fuente: (Lyle, 1963)

En la **Figura 1**, ahorro de energía por aislamiento, se muestran las pérdidas de calor para una línea de 152.4 mm (6") de diámetro a temperatura ambiente de 21 C.

Figura 1. Ahorro de energía por aislamiento



En la figura, se observa que la diferencia entre la pérdida de calor sin aislante y con aislante se hace cada vez mayor a medida que la temperatura del fluido aumenta, por lo que, de la gráfica se observa que a mayor temperatura se obtienen mayores ahorros de energía. El comportamiento de la gráfica sin aislar de acuerdo a los datos, corresponde a un polinomio de cuarto orden, que de acuerdo a la **Ecuación 2** (ecuación de Stefan-Boltzman), muestra que la pérdida de calor es proporcional a T^4 , con lo cual el mecanismo que predomina es la transferencia de calor por radiación.

$$Q/A = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \text{ ----- (2).}$$

Donde:

Q = flux de calor perdido (kJ/m²*hr).

σ = constante de Stefan – Boltzman, 1.381E-23 J/ K o (0.173E-08 Btu/hr*ft²*R⁴).

($T_1^4 - T_2^4$) = Diferencia de temperaturas entre ambas superficies (K).

El beneficio inmediato de aislar líneas que manejan fluidos a alta temperatura, es el ahorro de energía, pero existen otros beneficios extra como la reducción de la carga térmica de la caldera lo que permite operaciones más eficientes y seguras, además de producir un vapor de buena calidad, es decir, sin condensado presente ya que es el responsable de ocasionar bajos coeficientes de transferencia de calor y problemas de mantenimiento.

A continuación se describen brevemente las características y propiedades de los principales aislantes utilizados en la industria:

1. Silicato de calcio. Este material está hecho de cal y sílica, reforzado con fibras orgánicas e inorgánicas y moldeado en forma rígida. El intervalo de temperatura de servicio aplica de los 37.8 C a 648.9 C (100°F a 1200°F). El esfuerzo a la flexión es bueno. El silicato de calcio es un material absorbente de agua. Sin embargo puede desecarse sin deterioro. Es incombustible y utilizado principalmente sobre tuberías y superficies calientes. El enchaquetamiento de recipientes es su mayor campo de aplicación.
2. Vidrio. Existe en dos presentaciones la fibrosa y la celular.
 - A. Fibra. Se encuentra disponible en placa flexible, bloque rígido, medias cañas y otras formas preformadas. Su temperatura de servicio aplica desde -40 C a 573.3 C (-40°F a 1000°F). Es neutral, aunque el aglomerante utilizado puede tener un factor en el pH. No es combustible y tiene buenas propiedades de absorción del sonido.
 - B. Celular. Disponible en bloque, medias cañas y otras formas. Temperaturas de -267.8 C a 482.2 C (-450°F a 900°F). Presenta buena resistencia estructural y pobre al impacto. Material no combustible, no absorbedor de agua y resistente a muchos químicos.
3. Fibra mineral. Roca y lana mineral son mezclados juntos con un compuesto resistente al calor para disponer de una fibra o lana mineral disponible en forma de colchoneta, bloque, media caña y formas moldeadas. El límite superior puede alcanzar los 1037.8C (1900°F). El material es prácticamente de pH neutro, no es combustible y tiene buenas cualidades de control de sonido.
4. Sílica expandida o perlita. La perlita está hecha a partir de silicatos de roca volcánica combinada con agua. La roca es expandida por el calentamiento del agua que se vaporiza y expande en el volumen de la roca. Esto crea una estructura celular de minutas células de aire rodeado por producto vitrificado. La adición de aglomerantes resistentes a la penetración de la humedad y fibras inorgánicas refuerzan la estructura. El material presenta bajo encogimiento y opera en el intervalo de temperatura intermedia y alta. Está disponible en forma rígida preformada y en bloque.
5. Elastómero. Las resinas espumadas combinadas con elastómeros producen un material flexible y celular. Se encuentra disponible en formas preformadas y películas, poseen buenas características de corte y muestran baja permeabilidad al agua y

vapor. El límite superior de temperatura es de 104.4 C (220°F). Este tipo de material es eficiente económicamente para aplicaciones de baja temperatura donde no se requiere enchaquetamiento. La elasticidad es alta. Se deben tomar precauciones como material retardador del fuego.

6. Plástico espumado. Es un aislamiento producido a partir de resinas plásticas espumadas que crea materiales predominantemente rígidos de estructura celular cerrada. El valor de la conductividad térmica disminuye después del uso inicial debido a que el gas que está atrapado dentro de la estructura celular es con el tiempo reemplazado por el aire. Los plásticos espumados son de bajo peso con excelentes propiedades de corte y resistencia a la humedad. El contenido químico varía en cada fabricante. Se encuentra disponible en formas preformadas y placas, estos materiales se utilizan generalmente en servicios de temperatura baja e intermedia baja de -182.8C a 148.9 C (-297°F a 300°F). Se deben tener consideraciones de seguridad como material retardador del fuego.
7. Fibra refractaria. Este tipo de aislamiento está hecho de fibra mineral o cerámica, incluyendo alúmina y sílica, mezclado con aglomerante de alta temperatura. El material es fabricado en forma rígida bloque. La resistencia al choque térmico es alta. Los límites de temperatura alcanzan los 1648.9 C (3000°F). Además de ser un material no combustible.
8. Cementos de aislamiento. Los aislamientos y terminados de cemento son una mezcla de varios tipos de fibras y aglomerantes con agua y cemento para formar una masa plástica suave para aplicaciones sobre superficies irregulares. Los cementos de terminados o cemento de una capa, se usan en intervalos de baja temperatura y como acabado en otras aplicaciones de aislantes.

El proceso para determinar el tipo y espesor del aislante más adecuado debe ser un balance económico entre el ahorro de la energía perdida y los gastos fijos anuales, el cual puede ser calculado para cada tipo de material si se tienen datos confiables, o bien puede solicitarse al proveedor la información.

En el **Anexo Técnico** se presentan tablas de espesores recomendados para diferentes tipos de material aislante para tuberías a una temperatura ambiente de 21 C (70 °F). (The Thermal Insulation Manufacturers Association, Inc. TIMA).

Como resultado de la experiencia, se ha demostrado que todo sistema que presente una temperatura superior a los 49 C (120°F) debe ser aislado con por lo menos 25.4 mm (1") de espesor. Otra práctica utilizada también, es que el espesor del aislante no debe ser mayor que el diámetro del tubo (Lyle, 1963).

2.1.2 Fugas

Las fugas de vapor de servicio, agua caliente, condensado o cualquier otro medio de calentamiento, en algunas fabricas es normal observarlas, pero es difícil conocer la magnitud de estas pérdidas, y algunas veces no se les da la importancia que tienen. En primera instancia, a reserva de conocer la verdadera magnitud de la pérdida, estas fugas deben ser evitadas lo más rápido posible, ya que es energía y material que se desperdicia y no cumple su objetivo de servicio, además de que contribuye con un costo adicional en el sistema de generación debido al tratamiento del agua de repuesto y la sobrecarga de la caldera.

El costo en el caso del vapor por fuga, consta principalmente del combustible gastado en su generación (cerca del 80% del costo total), es de aproximadamente USD\$15.8 /Ton de vapor, y el costo del agua de repuesto, que en una planta de jarabes de maíz, donde se utiliza agua desmineralizada es de aprox. USD\$3.8 /m³.

Las fugas se presentan en dos formas: las visibles y las no visibles. Las primeras se observan físicamente del sistema a partir de orificios en las líneas de servicio y proceso, bridas, empaques, etc.; las fugas no visibles son muy difíciles de detectar y comúnmente se presentan en las trampas de vapor, por lo que se requieren sistemas de detección y estimación más complejos.

En el caso de las fugas visibles, la Comisión Nacional de Ahorro de Energía (CONAE) evalúa la cantidad de calor perdido por fugas mediante la determinación visual de un diámetro equivalente de fuga (aproximado). En la **Tabla 4**, se muestra el flujo de vapor perdido a diferentes diámetros de fuga y presión de vapor determinadas.

**Tabla 4. Flujo de vapor perdido debido a fugas (Ton/año).
(358 días de operación)**

Diámetro de la fuga mm	Presión del vapor (bar)		
	7	10	20
1.5	47.8	95.56	112.94
3	191.13	304.08	434.4
4	347.52	408.33	825.36
5	538.65	608.16	1,172.88
6	781.92	1,042.56	1,737.6
8	1,650.72	1,911.36	2,693.28

(Fuente: CONAE, 1997).

Las fugas se deben básicamente al vencimiento físico de algún material o pieza mecánica que se encarga de separar el medio energético del ambiente; esto se debe a que estas piezas y materiales se encuentran sometidos normalmente a condiciones extremas de presión, temperatura, ambientes corrosivos, fenómenos físicos como los golpeos de ariete (water hammer), y esfuerzos mecánicos. Todos estos fenómenos en conjunto impactan sobre los materiales, por lo que es importante siempre tenerlos en cuenta al momento de la selección de los materiales y el mantenimiento que será requerido por el sistema.

El principal factor que afecta a los materiales, es el carácter corrosivo del vapor, que es debido a un alto contenido de gases como el oxígeno (O₂) y el dióxido de carbono (CO₂) en el agua de alimentación de calderas, este último al entrar en contacto con el agua se condensa en ácido carbónico (H₂CO₃) especie muy corrosiva. Para evitar que el agua tenga la mayor cantidad de estos gases indeseables, se utilizan comúnmente agentes químicos, deaeradores y degasificadores de agua de alimentación a calderas, además del tratamiento y desmineralización del agua para minimizar el factor corrosivo e incrustante en los tubos de la caldera y líneas de transmisión de vapor.

2.1.3 VÁLVULAS DE SEGURIDAD.

Es un dispositivo muy utilizado en la industria como elemento de seguridad, pero que algunas veces desperdicia energía térmica en forma de vapor, debido a que es el sistema de desfogue de presión en equipos de proceso. Este dispositivo es utilizado para la protección y seguridad de los equipos de proceso que se encuentran sujetos a presión. El más conocido e importante, es el sistema de desfogue del generador de vapor, aunque también se utiliza en sistemas de evaporación, cristalización y otros tipos de recipientes a presión.

La función de una válvula de seguridad es el prevenir una presión excesiva en un sistema presurizado, mediante la liberación del fluido que se genera. Este tipo de válvula se ajusta por debajo de la máxima presión de trabajo segura del sistema, con el fin de proteger el equipo de presiones excesivas y peligrosas. En el caso de los sistemas de generación de energía térmica, el fluido de trabajo es vapor, el cual es liberado del sistema cuando se encuentra en condiciones críticas.

En cuanto a su construcción y diseño, este tipo de dispositivos son evaluados y legislados cuidadosamente por la American Society of Mechanical Engineers (ASME), y National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NB), instituciones encargadas de vigilar que se cumplan todos los lineamientos necesarios para el diseño, instalación y operación segura de los sistemas de seguridad de recipientes sujetos a presión.

En el caso de los generadores de vapor, las válvulas de seguridad se diseñan para liberar por lo menos la misma cantidad de vapor que genera el sistema, por lo cual, cada vez que estos sistemas actúan se está liberando una gran cantidad de vapor de buena calidad a la atmósfera. Estos acontecimientos se presentan debido al descontrol en las condiciones de operación de la caldera, que se originan debido alguna o algunas perturbaciones externas que afectan el comportamiento estable del sistema, obligándolo en algunas ocasiones a generar sobre-presiones, las cuales tienen que ser liberadas por el sistema de desfogue para evitar poner en riesgo la seguridad del personal y el equipo.

Entre las causas que originan la perturbación del sistema se encuentran:

- La demanda de vapor por equipos de proceso en forma intermitente (batch), y a secuencias de arranque y/o paro inesperadas debidos a problemas de operación.

- **Sistemas de control** incapaces de controlar las variaciones que se presentan en la operación de la caldera.
- **Falla de equipo mecánico** debido a la falta de mantenimiento correctivo y/o preventivo.

Los problemas del equipo mecánico, con un sistema de mantenimiento, inspección y supervisión eficiente se puede asegurar la adecuada y segura operación.

En el caso de las variaciones de demanda de vapor, estas se originan debido a inadecuadas secuencias de arranque y operación de equipos de proceso, utilización de procesos intermitentes (batch), los cuales requieren cargas térmicas por intervalos que afectan considerablemente la operación estable de la caldera a pesar de contar con sistemas automáticos de control.

Para que la caldera opere sin picos o sobrepresiones, es importante minimizar el impacto de cualquier perturbación externa a la operación, ya que el éxito de la operación eficiente de una caldera o cualquier equipo de proceso, se sitúa en la operación a condiciones óptimas en estado estacionario con el mínimo de perturbaciones.

2.1.4 Trampas de vapor.

La trampa de vapor es un dispositivo utilizado para evitar que el vapor de calentamiento pase a través de los equipos de proceso sin ceder el máximo de su calor latente y evitar la inundación del equipo a causa del condensado, ya que la combinación de agua y vapor hace que el flujo de calor en el equipo sea menor, debido a que el coeficiente de transferencia de calor del condensado es menor que el del vapor.

Una trampa de vapor es un dispositivo que cumple las siguientes funciones:

- **Eliminación de condensado:** El condensado debe pasar siempre, rápido y completamente a través de la trampa para obtener un aprovechamiento eficiente del calor latente del vapor.
- **Eliminar aire y otros gases no condensables:** El aire y los gases no condensables disminuyen el coeficiente de transferencia de calor. Además, se debe tener presente que el O₂ y el CO₂ y otros gases, son los precursores de la formación de especies corrosivas como el H₂CO₃ que atacan principalmente los tubos de vapor y

condensado. La experiencia ha mostrado que por cada 1% de gases no condensables en el vapor, el coeficiente de transferencia disminuye en un 10% (OIT, 2001).

- Prevenir pérdidas de vapor: No se debe permitir el paso de vapor sino hasta que este ceda la mayor parte de energía que contiene, también las pérdidas de vapor deben ser mínimas mientras la trampa libera vapor en forma de condensado, aire y gases incondensables.

Tomando como base su principio de operación, las trampas de vapor se clasifican básicamente en cuatro tipos diferentes:

- **Termostáticas.**- Actúan por una diferencia de temperatura, entre el vapor y el condensado. Son del tipo fuelle o bimetálico. Estas trampas poseen un elemento térmico (termostato) que se dilata con el calor del vapor y se contrae en presencia de condensado. Así cuando el sensor se enfría la trampa se abre y libera el condensado acumulado, y en cuanto pasa vapor vivo la trampa se cierra evitando que fugue.
- **Mecánicas.**- Éstas actúan gracias a la diferencia de densidades entre el vapor y el condensado. Entre ellas, podemos señalar a las trampas combinadas de flotador y termostato, venteo termostático y las de cubeta invertida. El flotador o cubeta invertida flota en la presencia de condensado abriendo la trampa y baja cuando este condensado es arrastrado por el vapor, con lo que la trampa cierra hasta que nuevamente se acumule condensado.
- **Termodinámica.**- Éstas son en realidad válvulas cíclicas que actúan en base a la diferencia de velocidad y/o de presión con que sale el condensado y el vapor. Cuando sale condensado, la velocidad de éste es relativamente baja y permite que un diafragma permanezca abierto. Cuando lo que empieza a salir es vapor, éste sale a mayor velocidad, disminuye la presión que actúa sobre el diafragma y éste se cierra.
- **De orificio.**- Como su nombre lo indica, consisten en un orificio calibrado por el cual drena constantemente el condensado. Están elaboradas con un amplio margen de sobrediseño para asegurar que no se acumule condensado debido a posibles variaciones de carga.

De acuerdo con el punto anterior, estas trampas se deben utilizar sólo cuando se tiene un caudal constante de condensado (CONAE, 1997).

En una trampa de vapor las pérdidas más comunes son por:

1. Descarga de vapor durante la operación, debido a su diseño.
2. El uso prolongado puede causar un bajo e imperceptible incremento en la descarga de vapor.
3. Fallas precipitadas, dejando escapar vapor o cerrando el mecanismo de descarga de condensado.
4. Mal funcionamiento temporal debido al cambio brusco en las condiciones de proceso (carga térmica y presión).

Las pérdidas de calor se llevan a cabo principalmente por radiación y convección al medio ambiente, lo cual provoca que el vapor se condense. La pérdida es una función del área y temperatura de la trampa. Otro problema frecuente es el desgaste de los mecanismos de desalojo de las trampas de vapor, que permiten flujo indeseable, esto se debe al uso y la corrosión, especialmente cuando se sobrepasan las condiciones de diseño del sistema.

Una práctica inadecuada que es muy común, es la instalación de derivaciones en las trampas de vapor, las cuales son utilizadas por el personal de operación al momento del arranque de la planta y cuando llega a fallar el desalojo de condensado de las trampas de vapor. Este tipo de instalación puede ser de mucha utilidad en caso de emergencia, pero debe evitarse su utilización en la medida de lo posible.

De acuerdo a la experiencia práctica, las trampas de vapor en mal estado, representan cerca del 10% del combustible utilizado en la generación del vapor (Monroe, 1976).

Para que se pueda contar con un sistema eficiente de trampas de vapor, se deben tener especial cuidado en la selección del tipo de sistema de acuerdo a las características del servicio. Además, debe de contarse con un programa de inspección, mantenimiento y servicio, de calidad, con el fin de detectar su funcionamiento deficiente, evitar daños al sistema y desperdicio de energía.

2.2 Fuentes secundarias

El concepto de las pérdidas de calor por fuentes secundarias se diferencia de las primarias, en que en las secundarias no se pierde energía o vapor virgen, sino que es la energía remanente del medio, después del proceso primario de transferencia de calor. Ejemplos de esto son los gases de desperdicio de la combustión, el flasheo de las corrientes calientes, las purgas, los vapores de los sistemas de evaporación y los efluentes de agua caliente. El análisis del posible aprovechamiento de estas fuentes de energía se debe realizar a través de los balances de materia y energía del proceso, para poder conocer el posible beneficio real del ahorro de estas pérdidas. Sin embargo, no solo por observar un flash de una corriente caliente que se desperdicia, significa que se debe recuperar, se debe analizar como esa energía se puede aprovechar en el proceso.

2.2.1 Gases de desperdicio

Los gases de desperdicio son aquellas especies que son el subproducto de la generación de la energía térmica que tenga una temperatura superior a los 315 C (600°F) (Fanarities y Streich, 1973).

En el caso de los gases provenientes de la combustión en un generador de vapor, estos se utilizan como medios para economizar el consumo de combustible, a través del aprovechamiento de la energía para precalentar las corrientes frías que participan en el proceso de combustión (aire de combustión, combustible, agua de repuesto, agua de alimentación, etc.).

Estos gases se aprovechan en una gran variedad de equipos, con el fin de aumentar la eficiencia energética aprovechando la alta temperatura de los gases.

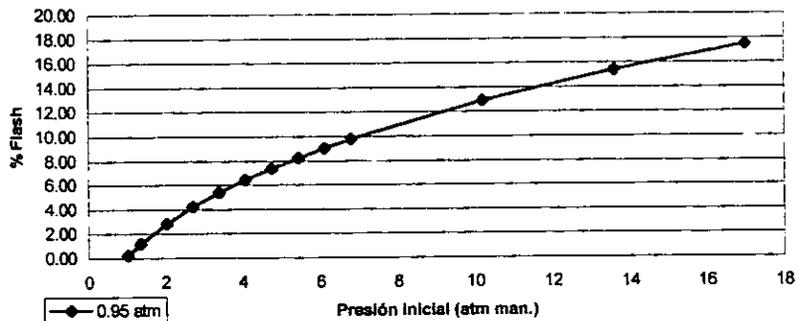
La transferencia de calor entre los gases calientes y las corrientes frías, se lleva a cabo por convección a coeficientes de transferencia de calor bajos debido a las bajas conductividades térmicas de los gases, lo cual obliga a emplear grandes cantidades de área de transferencia de calor y la utilización de superficies extendidas o aletas.

Generalmente, la eficiencia de las calderas, aumenta cerca del 2.5% por cada 38 C (100°F) de disminución de la temperatura de los gases de salida (Wilcox, 1978).

2.2.2 Vapor de baja presión (Flash)

El flash de las corrientes calientes es un fenómeno muy común en las plantas de proceso, cualquier sistema que se encuentre por arriba de las condiciones normales de presión y temperatura, cederá al medio parte de su energía como vapor. El condensado, principalmente es uno de los medios que más energía pierde, especialmente en el venteo en los tanques de almacenamiento. En la **Figura 2** se muestran las pérdidas por flash a la atmósfera como porcentaje.

Figura 2. Por ciento de flash de vapor



Fuente: (Lyle, 1963)

El flash desperdiciado es agua que tiene que ser repuesta al sistema de generación, la cual se encuentra a temperatura ambiente y tiene que ser acondicionada para su utilización como agua de alimentación de calderas, lo que implica un costo más aunado a la pérdida del flash.

Las opciones que se tienen para minimizar estas pérdidas son:

1. Disminuir la presión de trabajo del vapor, para disminuir la diferencia de presión que origina el flash.
2. Utilizar trampas de vapor que liberen el condensado en condición subenfriada.
3. Separar condensados de alta y baja presión, reintegrando los primeros al sistema de generación lo más rápido posible y utilizar los segundos para servicio de planta.
4. Instalación de sistemas recuperadores de flash.

El análisis de estas opciones técnicas se deben realizar tomando en cuenta la eficiencia y seguridad de operación y el menor costo inicial o la mejor relación beneficio – costo.

2.2.3 Condensados

El sistema de condensados está formado por condensadores, receptores, reguladores, trampas de vapor y tubería. El objetivo de este sistema, es el de condensar el vapor de servicio y reintegrarlo al sistema generador de vapor lo más limpio posible con el fin de minimizar el uso de agua de repuesto a la caldera.

El condensado se considera como una fuente secundaria de energía, ya que no es energía de primer uso sino que es un subproducto de la utilización de una fuente primaria. También es conocido como una fuente de buena calidad de energía, ya que proporciona un medio de calentamiento para servicios de temperaturas intermedias y es a su vez agua de excelente calidad (bajo contenido de sales y especies incrustantes).

Las pérdidas de energía en el condensado se presentan en líneas, tanques de recepción, trampas de vapor, etc., que no están aisladas; también en el flash de vapor a la atmósfera y fugas principalmente.

Existen además otros factores indirectos que afectan la eficiencia energética en el manejo del condensado, y estos son:

- El desalojo o drenado del condensado eficiente. Es un aspecto clave que se debe tener en cuenta para evitar inundaciones de condensado en líneas y equipos, debido a que obstaculiza el flujo de condensado en el sistema, reduciendo el área de transferencia de calor disponible y disminuyendo la transferencia de calor entre los medios, además de ocasionar problemas de golpes de ariete.
- Evacuación de gases incondensables, ya que disminuyen la transferencia de calor y son los precursores de la formación de especies corrosivas.
- Contaminación de condensado. Este problema es importante ya que incide directamente en el consumo de agua de repuesto, el costo asociado a su tratamiento y el daño de los tubos de la caldera. La presencia de contaminantes se debe a: fugas en los tubos del equipo (presencia de grasas animales, ácidos grasos y azúcares en la industria alimenticia); a través de empaques y/o sellos; contaminación con aceites y recuperación de vapores de corrientes de proceso. Los principales problemas que acarrea esta contaminación son la formación de espumas (debido a la saponificación de grasas y aceites en presencia de medios alcalinos), formación de depósitos o

incrustaciones (por presencia de sales y dureza) de gran adherencia en las paredes de los tubos y alteraciones en el pH que propician la corrosión y la incrustación.

Las actividades a realizar con el fin de minimizar las pérdidas de energía se concretan a:

1. Aislar líneas de condensado y tanques reservorios con el fin de disminuir la pérdida de energía al medio ambiente por radiación y convección.
2. Eliminar fugas.
3. Separar condensados de alta y baja presión para mejorar el aprovechamiento de los primeros y minimizar el flash del condensado.
4. Utilizar trampas de vapor que desalojen condensado a condiciones subenfriadas, evacuen gases incondensables y cedan la mayor cantidad de calor al proceso.
5. Criterios de selección e instalación de sistemas que permitan el adecuado desalojo de condensados y gases incondensables.
6. Evitar recolectar vapores de proceso de alto riesgo de contaminación.
7. Cambiar bombas que utilizan aceite como medio de lubricación (principalmente en bombas de alta presión).
8. Mantenimiento y supervisión para detectar y prevenir fugas de equipo, que puedan contaminar el sistema de condensados.

Con todas estas medidas, el objetivo a lograr es reintegrar un condensado limpio, de calidad y sin pérdidas de calor, para minimizar el uso de agua de repuesto y el costo de tratamiento, además de aumentar la vida útil del equipo.

2.2.4 Purgas (blowdown)

La purga del sistema de agua de alimentación, es una práctica realizada para disminuir el contenido de sólidos y evitar alcanzar el punto de saturación de los compuestos depositantes.

La concentración de los sólidos presentes en el condensado se debe a la vaporización o flash y pérdidas del condensado a lo largo de todo el sistema. Este aumento de concentración debe de mantenerse a niveles recomendados, ya que la presencia de altos contenidos de sólidos en el sistema provoca problemas de corrosión y erosión principalmente en los tubos de la caldera, abatiendo los coeficientes transferencias de calor y dañando severamente el equipo.

En la **Tabla 5**, se muestra un guía presentada por la American Boilers Manufacturers Association (ABMA), de los principales parámetros a controlar en el agua de alimentación a calderas.

Tabla 5. Concentraciones estándar para agua de calderas

Presión (bar)	Agua de caldera		
	Silica Total (mg/L SiO ₂)	Alcalinidad específica (mg/L CaCO ₃)	Conductancia (micromhos/cm)
0-20	150	700	7000
20-31	90	600	6000
31-41	40	500	5000
41-52	30	400	4000
52-62	20	300	3000
62-69	8	200	2000
69-103	2	0	150
103-138	1	0	100

Fuente: (ABMA, 2000)

Una forma de cuantificar la cantidad de energía pérdida es por medio de la **Ecuación 3**.

$$Q_p = W_p * C_p * \Delta T_p \text{ ———(3).}$$

Donde:

Q_p = Calor perdido por el agua drenada, (kJ / s).

W_p = Flujo de agua drenada, (kg / s).

C_p = Calor específico del agua, (kJ / kg * C).

ΔT_p = $T_a - T_{aa}$, (C).

T_a = Temperatura del agua drenada, (C).

T_{aa} = Temperatura del agua de alimentación, (C).

Fuente: (CONAE, 1997)

Existen dos tipos de purgado, el intermitente y el continuo. El primero es un método basado en la experiencia y operación de la planta que tiene por objetivo el remover el lodo que se deposita en áreas de la caldera, su mecanismo puede ser llevado a cabo manual o electrónicamente. El segundo es llevado a cabo electrónicamente por medio de controladores automáticos, que continuamente drenan el sistema para mantener bajo el

nivel de contenido de sólidos. Otra ventaja adicional del sistema continuo es la recuperación de carga térmica de la purga, incrementando así la eficiencia total del sistema.

2.2.5 Vapores de evaporadores y cristalizadores

La evaporación es uno de los medios más antiguos utilizados para la separación de mezclas líquidas con calor, donde la especie a separar es agua.

En la industria alimenticia es muy utilizada este tipo de separación para recuperar sólidos valiosos y llevar a cabo la concentración de muchos productos, con el propósito de aumentar su vida de anaquel o por presentación.

Un evaporador es un equipo de transferencia de masa y de calor que generalmente se encuentra a presión de vacío con el fin de abatir el punto de ebullición de mezclas que son susceptibles a la descomposición o degradación por temperatura. Existen diversas formas de clasificar los evaporadores, una de ellas es de acuerdo a la posición y arreglo de los tubos que puede ser en forma horizontal o vertical. En el caso de los evaporadores verticales existen diversos tipos como: circulación natural y forzada, película descendiente, flash, etc., para economizar energía se utilizan arreglos de múltiple efecto con alimentaciones en paralelo o contracorriente.

Los evaporadores horizontales son menos utilizados, debido a que no aprovechan las corrientes térmicas inducidas; además presentan la particularidad de que el vapor de calentamiento es alimentado por dentro de los tubos. La ventaja de estos sistemas se manifiesta en el excelente control de la densidad del producto y una operación sencilla.

Uno de los accesorios más importantes en el diseño de los evaporadores es el sistema de vacío, el cual puede constar de un condensador de superficie (tubos y coraza) o barométrico, además de un sistema de eyectores para evacuar los gases incondensables del sistema. El vacío se crea por la condensación de los vapores generados por el cuerpo separador de fases del evaporador, debido a la diferencia de volumen entre el vapor y su condensado.

El sistema más utilizado para retirar la carga térmica del vapor para su condensación en el caso de los condensadores de superficie, es a través de agua fría proveniente de un sistema de enfriamiento, en el caso de los condensadores barométricos el agua fría condensa directamente los vapores del cuerpo, con lo cual el medio de enfriamiento y el vapor se mezclan, mientras que en los sistemas de superficie no sucede así.

Las pérdidas de energía en los evaporadores, se deben en muchos casos a la falta de aislamiento de los cuerpos del evaporador y a la baja eficiencia térmica, debido a vapor de calentamiento de mala calidad (húmedo y sucio), deficiente evacuación de gases incondensables, fugas de aire, etc.

Las pérdidas secundarias se deben al desaprovechamiento de la carga térmica proveniente del vapor separado. Para pensar en recuperar esta energía, se tienen que tomar en cuenta tres factores importantes:

1. La calidad del vapor. El vapor producido en un sistema a vacío es de baja presión, que tiene capacidad de ceder una gran cantidad de calor latente, pero que es de baja temperatura. Este último detalle incide en bajos ΔT (bajo potencial de transferencia de calor), por lo que, este tipo de vapor es de alto contenido energético pero de lenta transferencia de calor, lo que obliga a utilizar grandes áreas de transferencia de calor, es decir, equipos grandes y costosos.
2. Magnitud de la carga térmica. Debe ser una cantidad de calor disponible que pueda ser aprovechada económicamente y viable en algún servicio de calentamiento.
3. Posibilidad de contaminación. Dependiendo del diseño de los separadores, se pueden tener elevadas velocidades de vapor, lo que provoca arrastres de líquido en forma de gotas, por lo que si este es un producto contaminante, no podrá utilizarse nuevamente su condensado para generar vapor.

En el caso de los condensadores barométricos, son baratos desde el punto de vista de costo inicial, pero costoso operacionalmente, ya que el manejo de condensado contaminado causa muchos problemas de mantenimiento, incrustación, corrosión y manejo residual, a parte del desaprovechamiento de la energía térmica.

2.2.6 Efluentes de agua caliente

Los efluentes de agua caliente se consideran como aquellas corrientes que ya no representan algún valor para su utilización en el proceso. Por lo general, son aguas con altos contenidos de sólidos, sales, pH alto y/o bajo, etc. Muchas de estas corrientes son purgas de caldera, torres de enfriamiento, o agua que se utiliza en cualquier sistema cíclico, y también aquellas aguas de lavado de equipos de proceso, agua contaminada, etc. Sin embargo, existen sistemas que utilizan efluentes calientes como medio de calentamiento en evaporadores de doble efecto de película descendente, en donde el efluente se introduce previamente en un separador tipo ciclónico a vacío, el cual separa las partículas sólidas y genera dicho vapor. En una planta se utilizó un evaporador de doble efecto de película descendente, que operaba a $600 \text{ m}^3 / \text{hr}$ con una temperatura de 80 C enfriada a 40 C mediante evaporación, produjo cerca de $15 \text{ Ton} / \text{hr}$ de vapor para calentamiento del evaporador (Billet, 1989).

Dependiendo del tamaño de la planta y sus operaciones, será la cantidad de efluentes que se generen. No obstante desde el punto de vista energético resulta difícil considerar estos efluentes como una fuente de energía térmica aprovechable, debido al alto costo de recuperación y la baja calidad de la energía aprovechada.

CAPITULO III. REDUCCIÓN DE CARGAS TÉRMICAS, APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS PROCESOS Y REUSOS DE CALOR

Esta es una de las más fructíferas estrategias que se pueden llevar a cabo en el análisis de ahorro de energía. Algunas veces se pueden efectuar sin tomar en cuenta el balance de calor del sistema, aunque de preferencia se recomienda utilizar un bosquejo de la distribución y manejo de las cargas térmicas, así como de los consumos de vapor, y manejo de condensados, para tener una perspectiva más clara acerca del flujo de energía.

En este capítulo, se busca obtener el mayor número de ventajas en el proceso de fabricación, que permitan optimizar el consumo de energía térmica y minimizar las pérdidas.

Estas medidas constan básicamente de: reducción de temperaturas de proceso, disminución de cantidad de material a ser procesado, evitar la acumulación de materiales en proceso para tener tiempos de residencia bajos, separar la mayor cantidad de agua de las corrientes de alimentación a equipos como secadores y evaporadores, operar equipos a condiciones de diseño y reutilizar las emisiones secundarias de calor.

Las causas de los problemas se deben principalmente a directrices y prácticas como:

- Deficientes políticas de operación. Las políticas solo se enfocan a la obtención del producto y producción, sin importar el consumo de energía.
- Selección inadecuada de equipo. La selección de los equipos debe ser realizada para operar eficientemente y además con un bajo consumo de energía (bajos costos de operación).
- Mantenimiento y operación deficiente. El mantenimiento y operación de los sistemas y equipos debe ser realizados de acuerdo a especificaciones del proveedor y a estándares de operación, para evitar malos funcionamientos y desaprovechamiento de recursos.
- El desaprovechamiento energético de emisiones secundarias y efluentes.
- Factores humanos.

Para resolver estos problemas, es necesario localizar las causas raíz que los originan e implementar sistemas que solucionen el origen de estas causas.

El éxito de cualquier proceso desde el punto de vista energético, se logra estabilizando y optimizando la carga de trabajo y energía requeridos, además de reutilizar las fuentes energéticas secundarias. Actividades que se reflejan en la reducción de costos y una operación homogénea, que permite producir productos de alta y confiable calidad.

3.1 Reducción de temperaturas de proceso

Un desperdicio común de energía en los procesos de manufactura, es el operar a temperaturas superiores a las realmente necesarias. En la sección 2.1.1, se mostró que al aumentar la temperatura de la superficie de un cuerpo caliente, la pérdida de calor aumenta en una proporción de T^4 .

Existen muchos beneficios a mencionar al disminuir la temperatura de operación, pero los principales son, el ahorro de energía y la prevención de problemas de deterioro o degradación térmica, que afectan la calidad de los productos, especialmente los alimenticios, que son muy sensibles a la temperatura.

Las razones más comunes por las cuales se opera a altas temperaturas son:

- Malas prácticas de operación. Se opera de acuerdo al operador y a su criterio.
- Falta de un estándar de temperatura de operación. Es decir, la determinación de un rango de temperaturas que permita alcanzar una operación continua, eficiente, segura y rentable.
- Alto contenido de agua (especialmente en evaporadores y secadores).

Otros beneficios adicionales de operar a bajas temperaturas son:

- La minimización de tiempos muertos por fallas de equipo y menor gasto de mantenimiento.
- El uso eficiente de energía, y reducción de pérdidas.
- Control preciso de las variables que afectan la calidad de los productos, que pueden permitir la recolección de información confiable para la optimización de las operaciones.

3.3.2 **Reducción de reproceso**

Muchos de los productos alimenticios se pueden reprocesar o reciclar cuando el producto sale fuera de especificación o se contamina. El reproceso es una práctica que debe ser erradicada en cualquier empresa que busque tener altos rendimientos, bajos costos de operación y el mínimo de reclamaciones de clientes por retrasos o mala calidad, en pocas palabras cuando se habla de reproceso se habla de pérdidas. Estas pérdidas económicas desde el punto de vista del consumo de servicios, se deben a una disminución de la producción y al aumento de la utilización de servicios.

La mayoría del reproceso se debe a factores humanos dentro del proceso de fabricación, análisis de producto terminado, etc., debido a la falta de seguimiento de los lineamientos expresados en el sistema de calidad. En otras ocasiones, pueden ser debido a materias primas fuera de especificación, falla en los sistemas de medición y control, supervisión inadecuada y en muy raras ocasiones la causa está en el mismo sistema de calidad.

3.3 **Procesamiento eficiente de los materiales de proceso y operación a carga térmica de diseño**

Una característica importante que los procesos eficientes presentan es, la utilización de un tiempo de procesamiento óptimo, tomándose en cuenta desde que entran las materias primas al proceso hasta que salen como producto terminado.

El tiempo de retención promedio en cualquier sistema se calcula de manera general con la **Ecuación 4**.

$$\Theta = V / Q \text{ ——— (4).}$$

Donde:

Θ = Tiempo de retención promedio, (hr).

V = Volumen del sistema, (m³).

Q = El flujo volumétrico promedio que circula por el sistema, (m³/hr).

El tiempo de residencia o procesamiento de las materias primas dentro del sistema, debe ser el mínimo para lograr ventajas desde el punto de vista del consumo de energía térmica. El objetivo es procesar lo más rápidamente posible las corrientes de proceso que salen de una etapa y entran a la siguiente, tomando en cuenta la operación eficiente del proceso, ya que el tiempo "ocioso" que sufren las corrientes antes de ingresar a la

siguiente etapa de operación, es aprovechado por el medio ambiente para intercambiar calor.

Un ejemplo común, es la utilización de tanques de mayor capacidad de la requerida. Esto se debe principalmente al sobredimensionamiento de instalaciones, lo cual obliga a operar con un volumen de proceso mayor del realmente requerido. Las consecuencias de estas prácticas producen pérdidas de calor al medio ambiente por conducción, convección y radiación a través del equipo, flash de las corrientes, etc. Es decir, el costo energético de mantener el sistema a una temperatura de proceso más tiempo del debido.

La solución a este problema muchas veces no es tan sencilla como parece, debido a que se deben tomar en cuenta factores no controlables como la demanda de los productos, que puede obligar a aumentar o disminuir la capacidad de producción de la planta, es decir que esta debe ser flexible en cuanto a su capacidad para poder adaptarse a la demanda y cumplir con los programas de producción, operando al mínimo costo.

La operación a carga térmica de diseño, es una medida que debe seguirse siempre, para obtener el mayor provecho del área de transferencia de calor del equipo.

Es común, que en algunas empresas se operen los equipos sin el conocimiento y la conciencia de que se debe trabajar a las condiciones de diseño, para aprovechar la máxima área de transferencia de calor disponible. Por ejemplo, este fenómeno se presenta en algunos secadores e intercambiadores de calor que controlan la transferencia de calor modificando el área disponible del equipo.

Finalmente, con base en la teoría y la operación práctica de los equipos, se debe buscar la manera de optimizar la carga de material al equipo, para lograr utilizar el mínimo de energía, aumentar la productividad y operar a las condiciones de proceso más estables y económicas.

3.4. Separación mecánica del agua

El agua es una especie que contribuye a la carga térmica en cualquier sistema por tener una gran capacidad calorífica, por lo que es importante remover la mayor cantidad de esta

por cualquier medio, para disminuir la carga térmica en los equipos de transferencia de calor.

En el proceso de fabricación de jarabes de maíz, el agua es el componente más abundante a lo largo de todo el proceso. Su labor más importante radica en la maceración del grano de maíz, donde este se ablanda para su posterior rompimiento y la separación de sus componentes principales. Se recomienda que el volumen de agua de operación sea de 1.2 a 1.4 m³/ Ton maíz, donde 0.5 m³/ Ton son absorbidos por el grano de maíz, y el resto es eliminado del sistema (Stanley and Ramstad, 1987):

La separación de la mayor cantidad de agua de las corrientes antes de su alimentación a los equipos de transferencia de calor, es el factor clave para un ahorro de energía térmica. Existen muchos motivos por los que se opera con volúmenes de agua mayores al debido, entre los cuales están:

- Recuperación de corrientes secundarias con componentes valiosos.
- Operación a baja eficiencia de los sistemas concentradores de corrientes de proceso.
- Falta de un estándar óptimo de contenido de agua para una operación térmica eficiente.

Una práctica comúnmente realizada por la dirección, para aumentar el rendimiento producto / insumo, es la recuperación de la mayor cantidad de efluentes que contengan algún componente valioso a recuperar, lo que provoca que los sistemas de separación sean operados al límite de su capacidad de carga, que tiene como consecuencia por lo general el operar a bajas eficiencias de separación. El principal resultado de esta práctica se refleja en el incremento del consumo de energía térmica, es decir, el costo de recuperar sólidos valiosos.

Las soluciones a estos problemas se deben de basar en un balance económico entre la recuperación de producto y el consumo de energía, y determinarse con base a estudios, un estándar del contenido de humedad óptimo en la corriente que va alimentarse al equipo de transferencia de calor.

3.5 ***Ventajas de reacciones exotérmicas y calores de disolución***

Muchos de los cambios físicos o químicos en la naturaleza desprenden calor como forma de energía (reacciones exotérmicas), disoluciones, etc. las cuales deben tratar de ser aprovechadas para minimizar el consumo de energía térmica en la planta.

Existen muchas industrias que utilizan esta característica para generar electricidad como beneficio adicional del proceso. Tal es el caso de las plantas de ácido sulfúrico y nítrico, que algunas veces se consideran más como plantas de generación de potencia que químicas.

En la industria de procesamiento del maíz y fabricación de jarabes, existe una reacción muy importante, conocida como Reacción de Mayllard o de oscurecimiento de azúcares, la cual es llevada a cabo con el fin de fabricar un concentrado de alto color (pirólisis del jarabe de maíz), muy utilizado en la industria refresquera y cervecera como agente colorante. Esta reacción es catalizada con compuestos amoniacales. Se lleva a cabo en reactores presurizados y es iniciada con vapor. Una vez alcanzada la temperatura de operación, la reacción se mantiene desprendiendo energía conforme avanza la reacción hasta alcanzar la especificación deseada. Este proceso es finalizado por enfriamiento con agua y flash atmosférico del producto.

Otra posible fuente de energía es la generada por la disolución de los ácidos y álcalis más utilizadas en este tipo de industria, como el ácido clorhídrico, (HCl), hidróxido de sodio (NaOH), bisulfito de amonio (NH_4HSO_3), etc. Todas estas sustancias desprenden energía al medio ambiente al diluirse con agua, que puede aprovecharse para realizar algún servicio en planta, dependiendo por supuesto, del orden de magnitud de calor disponible y el costo de la recuperación.

3.6 ***Incremento de rendimiento***

El enfocar esfuerzos para aumentar el rendimiento de alguna operación, principalmente de separación o de reacción química, no solo incrementa la cantidad de producto obtenible por unidad de materia prima, sino también minimiza la cantidad de energía utilizada en las siguientes operaciones, debido a la disminución de material a procesar.

Existen equipos sensibles al contenido de sólidos en las corrientes de proceso tales como los secadores y evaporadores, que cuando operan con alto contenido de sólidos han mostrado ser más eficientes térmicamente.

Cuando se evapora un producto, el alto contenido de agua en la corriente, inmediatamente obliga a los equipos a operar a temperaturas más elevadas, con lo cual se afecta el sistema de vacío debido al aumento en la carga térmica en el vapor de descarga; provocando que la diferencia de temperatura entre el vapor de calentamiento y la salida de producto disminuya y por consiguiente el gradiente de temperatura también, mientras que la transferencia de calor hacia los alrededores aumenta. Además de que muchos de los productos alimenticios son sensibles a la temperatura, lo cual provoca su deterioro o descomposición.

En el caso de los secadores, un problema adicional al consumo de energía, es la posibilidad de daño irreversible del producto por altas temperaturas de operación y en algunos casos hasta incendios.

La recomendación en este sentido, es el buscar eficientar las etapas de separación y de reacción para trabajar con la mayor cantidad de sólidos posibles y la menor cantidad de subproductos.

3.7 Reusos de calor

El reuso de calor proveniente de fuentes secundarias en un proceso, se basa en la observación de las fuentes generadoras de vapor vía flash y de su recolección para su aprovechamiento en algún servicio de calentamiento en la planta. En la industria alimenticia un medio muy utilizado para el enfriamiento de corrientes de proceso es la evaporación flash tanto a presión atmosférica como a vacío, ya que los costos de operación son relativamente bajos. La otra área importante es la recuperación del vapor proveniente de los sistemas de evaporación, debido a que este es vapor de baja presión con un alto contenido de calor latente.

Estas dos fuentes de energía de media calidad son oportunidades para recuperar el calor latente y utilizarlo en servicio a la planta. Las principales formas de utilizarlo son: como vapor de calentamiento, en recuperación como condensado y como agua caliente. Los

beneficios en ahorro de energía térmica que se logran gracias a la reutilización de estas fuentes de energía en la reducción de la carga térmica del generador de vapor y la minimización del uso de agua de repuesto.

Los factores a considerar para una posible recuperación y aprovechamiento de estas fuentes de energía son:

1. Presión, temperatura y calidad del flash o vapor.
2. Tipo de flujo (intermitente o continuo) y magnitud.
3. Presencia de impurezas y/o contaminantes.

La utilización del flash de las corrientes de proceso se realizan de forma directa o indirecta. La primera se lleva a cabo mediante el contacto directo entre la corriente fría y el flash; la condensación del flash con agua, etc. En el caso de la segunda, se utiliza un intercambiador de calor para recuperar el calor del flash o vapor, utilizando tanto corrientes de proceso como de agua.

El evaporador es un equipo muy utilizado en la industria alimenticia, debido a su versatilidad y flexibilidad de operación. Existen diversos tipos como se mencionó en la sección 2.2.5 y arreglos (alimentación simultánea, contracorriente y en paralelo). El uso de cada tipo depende de varios factores, costo y estabilidad del producto. Debido al alto consumo de vapor de estos equipos se han diseñado estrategias para optimizar el consumo de energía. El medio sujeto a optimización es el vapor proveniente de la separación de fases en el evaporador de simple efecto, el cual se puede aprovechar como:

- Medio de calentamiento de la corriente de alimentación.
- Utilización de múltiples efectos para aprovechar el vapor de cada efecto para actuar como medio de calentamiento del siguiente efecto y así sucesivamente, con lo cual se aumenta la economía del evaporador (vapor utilizado / agua evaporada).
- Recompresión del vapor. Es un medio que se utiliza para incrementar la energía de del vapor de separación para incrementar su presión y temperatura. Esta recompresión se logra de dos formas, vía termocompresión con vapor de alta presión utilizando sistemas de eyectores, y vía mecánica utilizando compresores.

Muchas veces es fácil observar un flasheo e intentar recolectarlo, pero es necesario primero analizar el sistema completo desde el punto de vista energético y en base a esto determinar si es una fuente candidata a ser reutilizada o aprovechada.

CAPITULO IV. SISTEMA EFICIENTE DE CALDERA

Las calderas son uno de los elementos más ampliamente utilizados para la generación de calor en la industria. Estos sistemas están equipadas con un quemador, el cual mediante la combustión de un combustible, proporciona el calor necesario para el calentamiento y evaporación de un fluido. Los diversos tipos de fluidos que se utilizan como medios de calentamiento, son principalmente el agua, aire y aceites térmicos. En las calderas de vapor de agua, el calentamiento del agua líquida produce vapor a determinadas condiciones de presión y temperatura.

En el generador, el flujo de calor del combustible hacia el agua puede ocurrir en tres formas, por radiación, por convección y por conducción.

La radiación, es el mecanismo de transferencia de calor directo, en forma de energía radiante proveniente de la flama hacia los tubos o coraza del sistema. La cantidad de radiación es proporcional a la diferencia de la cuarta potencia de la temperatura absoluta entre el cuerpo caliente y el frío. Además, la transferencia de energía es función de la cantidad de superficie que se encuentra en dirección directa a la radiación.

En la convección, el mecanismo de transferencia se lleva a cabo entre el medio caliente y el frío debido al movimiento, mecanismo en el que las partículas más calientes continuamente reemplazan las más frías que están en contacto con la superficie que absorbe el calor.

En la conducción, la transferencia de calor se lleva a cabo de una parte del cuerpo a otra, o de un cuerpo a otro los cuales se encuentran en contacto físico, pero sin el desplazamiento de las partículas del cuerpo.

El vapor que se genera se utiliza principalmente en; equipo de generación de energía eléctrica, sopladores y bombas; equipos de proceso como medio de calentamiento por contacto directo e indirecto y como calentamiento y acondicionamiento de edificios.

Los principales componentes de una caldera de vapor son:

- **Cámara de combustión:** Es el espacio en el que tiene lugar la combustión del combustible. Su forma y tamaño depende del tipo de combustible (sólido, líquido o gas) y de la potencia térmica de la caldera.
- **Cuerpo intercambiador:** Es el que forma propiamente el cuerpo de la caldera, el cual se encuentra inundado con agua.
- **Envoltivo:** Es el medio externo que aísla térmicamente la caldera con el medio ambiente para evitar pérdidas de calor.

Todos los sistemas generadores de vapor requieren de equipos y accesorios auxiliares para que el sistema opere y se desarrolle a su más alta eficiencia y seguridad. Los siguientes son los equipos más comúnmente utilizados:

- **Economizadores.** Este equipo se utiliza para precalentar el agua de alimentación a la caldera, utilizando el calor cedido por los gases de salida. El agua es calentada en tubos sencillos o tubos con superficies extendidas, dependiendo del tipo de combustible utilizado.
- **Calentadores de agua.** Estos equipos utilizan gases de combustión o vapor de baja presión para precalentar el agua de alimentación. El vapor de bajo valor energético, es usado para precalentar el agua y evitar el choque térmico en las partes de la caldera, al mismo tiempo que se recupera la mayor cantidad de energía posible.
- **Calentadores de aire.** Los generadores de vapor de alta capacidad, utilizan estos equipos para recuperar más calor proveniente de los gases de combustión que dejan el economizador. El calentador de aire consta de placas delgadas o tubos para transferir el calor de los gases hacia el aire que se alimenta al quemador.
- **Supercalentadores.** Las plantas de proceso que utilizan turbinas, requieren vapor supercalentado seco para su operación y mitigar los problemas de corrosión.
- **Desupercalentadores.** Los equipos de proceso como los evaporadores requieren de vapor saturado en lugar de vapor sobre calentado para una operación eficiente. Los desupercalentadores realizan esa función, y pueden ser de equipos de coraza y tubos o sistemas de inyección de agua dentro de la línea de vapor.
- **Ventiladores.** La mayoría de las calderas paquete dependen de la circulación natural para eliminar los gases del sistema. Sin embargo en equipos más grandes, se requiere de ventiladores para proporcionar la adecuada circulación de aire y gases de combustión a través del generador. Los ventiladores utilizados para introducir el aire

se conocen como ventiladores de tiro forzado y los que retiran los gases de combustión como de tiro inducido.

- Bombas de alimentación de agua. Estos equipos son utilizados para proporcionar un flujo positivo de agua de alimentación a la caldera. Pueden ser del tipo centrífugo, pero las más utilizados son las de desplazamiento positivo en sistemas de alta presión.
- Deaeradores. Son utilizados para remover el aire disuelto en el condensado retomado y el agua de repuesto que son alimentados al generador. La presencia de aire en un generador, inhibe la transferencia de calor e incrementa la posibilidad de corrosión.
- Equipo de tratamiento de agua. Aunada a la deaeración, el agua debe ser pretratada antes de ingresar al generador. El tratamiento de agua es utilizado para separar el O_2 y reducir el contenido de impurezas formadoras de incrustación en el agua. Los generadores de baja presión (8 atm o menos) requieren agua suavizada; mientras que las unidades de alta presión requieren de desmineralización para reducir el contenido de sólidos, dureza, y sílica presentes en el agua. El ajuste del pH también es necesario, ya que los generadores son menos susceptibles a la corrosión a pH moderadamente básicos.
- Manejo de combustible. Existen diferentes estados físicos del combustible (sólidos, líquidos y gases). Cada combustible requiere un almacenamiento y un manejo adecuado, el cual es específico para cada uno de ellos. En el caso particular del manejo de gases, el sistema consiste de controles de flujo y presión además de un tanque de almacenamiento.

Dependiendo del arreglo del fluido a calentar, las calderas se suelen clasificar en dos grandes grupos; tubos de agua, donde normalmente son destinadas a la generación de vapor para la preparación de agua sobrecalentada; y tubos de humo, que son sistemas en los que los gases circulan por el interior de un haz tubular, y calientan el agua o fluido térmico en el que el haz se encuentra inmerso.

Por otra parte, tanto un tipo como otro de calderas, pueden clasificarse de acuerdo a la presión desarrollada en el interior de la cámara. Las condiciones de presión en la cámara durante la combustión constituyen una de los parámetros críticos para la selección de la chimenea y el quemador.

Los sistemas de generación de vapor en la industria sin importar el tipo, operan a eficiencias de operación del orden del 80% (en México, las eficiencias mínimas de operación de las caldera paquete, fluctúan entre el 74% y 80%) (NOM-002, 1995).

Las pérdidas de calor se deben principalmente al calor presente en los gases de combustión y a través de paredes, purgas fugas, etc. La experiencia indica que un sistema que opera a 80% de eficiencia, pierde el 15% de la energía en los gases de combustión y el 5% restante a través de las paredes del sistema, purgas, etc. (Esquerra, 1988).

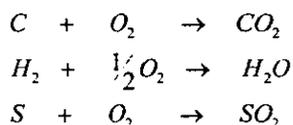
4.1 Sistema de combustión

El proceso de combustión es el encargado de suministrar la energía necesaria para convertir el agua líquida en vapor. Este proceso es una reacción química de alta velocidad y temperatura. La reacción se lleva a cabo entre los átomos del combustible y el oxígeno, con el desprendimiento de grandes cantidades de energía en forma de calor y luz. Cuando esta reacción es llevada a cabo a bajas velocidades se denomina oxidación, cuando la velocidad es mediana se conoce como combustión y finalmente a altas velocidades se denomina explosión. Todos los combustibles están constituidos principalmente por hidrocarburos y azufre.

El oxígeno necesario para la combustión proviene del aire, el cual se compone fundamentalmente de este elemento y nitrógeno (21% O₂, 78% N₂, 1% otros, argon (Ar), vapor de agua (H₂O), anhídrido carbónico (CO₂), etc).

Los principales productos de la combustión son CO₂, H₂O y SO₂. En la práctica, es imposible alcanzar un 100% de rendimiento del combustible debido a que contiene sustancias no combustibles. En el caso del aceite residual el contenido de estas sustancias es del 10%, mientras que en el gas natural es del 6% (Boilerroom, 2001).

A continuación se presentan las principales **Reacciones de combustión** completas de los hidrocarburos:



En un proceso global de combustión se distinguen tres fases:

1. Fase de pre-reacción o de formación de radicales. Es decir, la descomposición del combustible en sus elementos carbono e hidrógeno, para reaccionar con el oxígeno. Se forman unos compuestos inestables intermedios llamados radicales.
2. Fase fuertemente exotérmica. Se lleva a cabo la reacción de oxidación con O_2 .
3. Fase terminal. Se lleva a cabo la completa oxidación del combustible, dando lugar a componentes estables (gases de combustión).

Dentro del proceso de combustión existen tres tipos de combustión: perfecta, completa e incompleta.

- Perfecta. Se logra cuando todo el combustible es quemado utilizando solamente la cantidad de aire teórico.
- Completa. Se logra cuando todo el combustible es quemado utilizando la menor cantidad de aire que excede la cantidad teórica.
- Incompleta. Ocurre cuando no todo el combustible es quemado, produciendo así hollín y humo.

Para realizar la combustión de una cantidad determinada de combustible, se necesita una cantidad determinada de aire. En el caso del gas natural, para quemar 1 kg, se necesitan aproximadamente 17 kg de aire (relación estequiométrica). Si se utiliza exactamente esta proporción, debido principalmente a problemas de contacto combustible/aire y la presencia de sustancias no combustibles, se produce una combustión incompleta. En lugar de CO_2 se obtiene CO (monóxido de carbono) detectable en los humos de las chimeneas, e incluso se deja combustible sin consumir. Para evitar que esto suceda es necesario suministrar un exceso de aire al quemador.

No obstante, debe tenerse en cuenta que a mayor exceso de aire, mayores son las pérdidas de calor por los gases de la chimenea. Esto es debido a que se emplea cierta cantidad de calor para calentar el aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de los humos. Por lo tanto, es necesario utilizar el exceso de aire preciso para que la combustión sea la óptima. El exceso óptimo de aire depende del combustible utilizado, el tipo y estado del sistema, del tipo de control, etc.

Dentro del sistema de combustión existen dos factores importantes a considerar, el aire necesario para llevar a cabo la reacción y para remover los gases de combustión.

Esto se logra utilizando sopladores de tiro forzado, los cuales proporcionan al aire la presión necesaria para llevar a cabo la combustión, y desalojar los gases de combustión. De tiro natural, en el cual un soplador proporciona el aire necesario en la combustión y una chimenea crea el tiro necesario para desalojar los gases. Y el caso especial, cuando el tiro de la chimenea no es suficiente para desalojar los gases, se utiliza un ventilador de tiro inducido.

Para lograr una combustión eficiente (completa) se recomienda:

1. La adecuada mezcla aire / combustible, la cual debe ser adecuadamente controlada ante cualquier variación de carga térmica.
2. En el caso de los combustibles líquidos se debe poner énfasis en la adecuada atomización, es decir, en la creación de finas gotas de combustible que permitan una rápida vaporización.
3. Mantener la apropiada temperatura del aire de combustión, combustible y la cámara de combustión.
4. Proporcionar el tiempo necesario para llevar a cabo la combustión completa del combustible, antes de que los gases de combustión entren en contacto con la superficie de calentamiento (la superficie de calentamiento se considera como el área en la que se encuentran en contacto de un lado el agua y del otro los gases de combustión), ya que de lo contrario los gases se enfrían al ceder su calor y se origina el hollín y humo negro.

En la práctica se ha demostrado que una caldera quema cuatro veces su costo original en combustible cada año, por lo que se debe tener en cuenta el control y mantenimiento adecuado del sistema para alcanzar la más alta eficiencia (Wilcox, 1978).

4.2 Recuperación de calor

En cualquier sistema de calderas, la pérdida de calor a través de la chimenea representa un considerable desperdicio de energía. Los productos de la combustión tienen temperaturas superiores al ambiente, y la pérdida de esta fuente de energía representa la mayor pérdida de energía al ambiente del sistema.

La eficiencia del sistema se mejora reduciendo la temperatura de los gases de salida y utilizando trampas de calor para recuperar su energía, ya sea en economizadores o calentadores de aire.

Los economizadores calientan agua con la energía recuperada, incrementando la eficiencia en 1% por cada 5 C o 6 C (10°F a 11°F) de incremento en la temperatura del agua. Los calentadores de aire aprovechan el calor de los gases de combustión de salida, para transferirlo al aire de alimentación a la cámara de combustión. Por cada 55.5 C (100°F) de incremento en la temperatura del aire de entrada, la eficiencia de la caldera aumenta en un 1.7%. Generalmente, la eficiencia de la caldera aumenta cerca del 2.5% por cada 55.5 C (100°F) en la disminución de los gases de combustión. El uso de los economizadores y los calentadores de aire pueden incrementar la eficiencia hasta en un 6% (Wilcox, 1978).

Los principales métodos de recuperación de calor utilizados en la industria son los siguientes:

- Generación de vapor.
- Precaentamiento del agua de alimentación a la caldera.
- Precaentamiento del aire de combustión.
- Super calentamiento de vapor.
- Precaentamiento a corrientes de alimentación de proceso, o calentamiento de corrientes de proceso en algún punto intermedio.
- Medio de circulación de calentamiento.
- Precaentamiento de aire en secadores del tipo directo.
- Uso como medio de secado en secadores del tipo directo.
- Evaporando corrientes de proceso.
- Proporcionando calentamiento de instalaciones en ambientes fríos.

4.2.1 **Generación de vapor**

La recuperación del calor a partir de corrientes de alta temperatura para la generación de vapor es un método muy común y utilizado en la industria. Su utilización depende del aspecto económico, el tipo de sistema y la viabilidad técnica de la recuperación. Los principales usos del vapor generado por este sistema de recuperación de calor son: medio de calentamiento de proceso (vapor generado de 9.5 a 45 atm), generación de potencia

(vapor superior a 45 atm), uso como medio diluyente o absorbedor de corrientes de proceso (vapor usado a bajo volumen).

El uso de la generación de vapor como un medio de recuperación de calor de corrientes de alta temperatura, proporciona muchas ventajas:

1. Generalmente su instalación es relativamente compacta, debido a la elevada velocidad de transferencia de calor asociado con la ebullición del agua.
2. Usualmente resulta en el costo de instalación más bajo de cualquier sistema de recuperación de calor.
3. Generalmente no provoca problemas de operación, debido al enfriamiento de las corrientes calientes, ya que la elevada velocidad de transferencia de calor del agua en la ebullición del agua mantiene la temperatura del sistema cercano a dicha temperatura.
4. Proporciona rápida velocidad de respuesta.
5. Permite ajustes en la capacidad de recuperación de calor mediante el incremento o disminución de la presión de operación del sistema, dentro de los límites de diseño.
6. No requiere una coordinación cercana entre los flujos de las corrientes de proceso y temperatura y flujo de alimentación de agua.

Las principales desventajas de este tipo de sistemas son:

1. El sistema de generación de vapor debe operar justamente a altas presiones para asegurar la justificación económica. Las presiones de operaciones radican entre 45 y 103 atm.
2. La generación de vapor no puede enfriar corrientes de alta temperatura tanto como otros sistemas de recuperación, debido a que mucho del calor es recuperado principalmente por vaporización del agua a temperatura constante de acuerdo a la presión de operación.
3. A altas presiones de operación, el sistema requiere agua de la misma calidad utilizada en los sistemas de generación de vapor, con lo cual las ventajas económicas son reducidas.
4. La generación de vapor tiene cierto límite de flexibilidad en la utilización de la energía recuperada, ya que ciertos tipos de instalación no tienen algún uso específico para el tipo de energía recuperada.

Al igual que en los sistemas comunes de generación de vapor, los sistemas generadores de vapor de reuso, se diseñan de tubos de agua y humo. La selección de estos sistemas para su utilización eficiente, deben de tener en cuenta la instalación y los equipos requeridos, así como sus costos respectivos.

4.2.2 Precalentamiento del agua de alimentación de caldera

Un sistema de precalentamiento para el calentamiento de grandes volúmenes de agua de alimentación, a través de un considerable intervalo de temperatura, tiene un bajo costo inicial y ha probado ser un sistema eficiente de recuperación de calor. El medio más utilizado para realizar esta operación son los gases de combustión de salida de la cámara.

Los principales diseños para recuperar el calor, son recuperadores de tubos de humo o de agua. Adicionalmente es común utilizar superficies extendidas, debido al bajo coeficiente de transferencia de calor del gas, el diseño de recuperadores del tipo tubos de agua en forma de serpentín es uno de los más utilizados. Sin embargo, en el caso de recuperación de pequeñas cargas, se utilizan recuperadores del tipo coraza y tubos.

Para la recuperación de calor en este tipo de sistemas se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. La corriente de gas de salida puede ser extremadamente corrosiva cuando se enfría por debajo del punto de rocío de la mezcla, especialmente cuando la mezcla contiene trazas de compuestos de azufre. Para resolver este problema se utilizan arreglos en semi-contracorriente, disminuyendo así la diferencia de temperatura media logarítmica, aunque implica la utilización de área de transferencia de calor extra.
2. Cuando el calor se recupera de la corriente de proceso en un intercambiador de tubos y coraza, la corriente es enfriada sobre un gran intervalo de temperatura. Con la corriente de proceso fluyendo a través de los tubos, se produce un elevado diferencial de temperatura a lo largo del espejo multipaso, que puede provocar problemas de operación por choque térmico.
3. Generalmente no es económico utilizar una corriente caliente por arriba de los 427 C (800°F) para el precalentamiento del agua de alimentación, ya que resulta más económico utilizar este tipo de corrientes en la generación de vapor o calentamiento de corrientes.

4.2.3 *Pre calentamiento del aire de combustión*

El pre calentamiento del aire de combustión, es uno de los métodos más antiguos y ampliamente utilizados como medio de recuperación de calor a partir de corrientes gaseosas de elevada temperatura.

Los calentadores de aire se clasifican en recuperativos y regenerativos de acuerdo al principio de operación. En el tipo recuperativo, los dos fluidos son separados por el área de transferencia de calor, con un fluido fluyendo continuamente por un lado y el otro fluido por el otro. En el caso del sistema regenerativo, la superficie es intermitentemente calentada por ambos lados por la circulación de un fluido, e intermitentemente enfriada en ambos lados por el otro fluido. Los principales equipos utilizados son los intercambiadores de calor rotativo metálicos y los intercambiadores de calor de coraza y tubos y algunos diseños que utilizan superficies extendidas.

La recuperación de la energía de los gases calientes, es un medio de recuperación efectivo, pero se deben tomar en cuenta las siguientes desventajas:

1. Generalmente requieren de un gasto de energía eléctrica en los ventiladores de tiro forzado y/o inducido, debido a la caída de presión del gas de salida a través del sistema.
2. Se requiere de un alto costo inicial de equipo debido a el requerimiento de gran superficie de transferencia de calor.
3. La energía recuperada debe ser utilizada conjuntamente con el sistema de combustión.

4.2.4 *Super calentamiento de vapor*

En el caso de los sistemas de generación que trabajan con vapor supercalentado, el adicionar 28 °C (50 °F) o más de sobre calentamiento al vapor de alta presión aumenta el valor del mismo cuando este va a ser utilizado en sistemas generadores de potencia. Las corrientes de alta temperatura, pueden ser utilizadas frecuentemente para sobre calentar el vapor, por lo que se obtiene un aumento en la eficiencia del proceso.

Tanto los generadores de vapor de tubos de agua y humo, pueden ser suministrados con sobre calentadores auxiliares para manejar el vapor que ellos generan. En el caso particular de los generadores de tubos de humo, estos utilizan los gases de desecho de

las turbinas de gas para sobre calentar el vapor a través de sobre calentadores del tipo serpentín.

La principal preocupación en estos sistemas se enfoca al contenido de sólidos presentes en el vapor, donde se recomienda mantenerse por debajo de 1 mg/L. El depósito de sólidos sobre la superficie de los tubos, pueden provocar fallas en los mismos, cuando la corriente de elevada temperatura está por arriba de los 538 C (1000 °F).

4.2.5 *Pre calentamiento a corrientes de proceso*

El pre calentamiento de las corrientes de proceso con los gases de salida a elevada temperatura, es la forma más económica de recuperar la energía. Está técnica, directamente reduce la utilización de energía primaria requerida por el proceso, así como elimina o minimiza el tamaño del equipo requerido para la recuperación de calor.

Este servicio generalmente se lleva a cabo en serpentines de tubos de agua o en intercambiadores de coraza y tubos. En el caso de los serpentines de tubos de agua, usualmente son del tipo de superficie extendida, y son utilizados cuando el calor a recuperar proviene de gases de salida. Los intercambiadores de coraza y tubos se utilizan cuando se requiere intercambiar el calor entre dos corrientes.

La práctica más recomendable desde el punto de vista económico en este caso, es la recuperación de la energía por medio de corrientes frías, en lugar de utilizar la energía de los gases de salida para generar vapor.

4.2.6 *Medio de circulación de calentamiento*

Otra forma de recuperar el calor de corrientes calientes de alta temperatura, es generando un medio de calentamiento de circulación. Este medio recupera la energía de los gases y la transporta a otros equipos como rehedidores, secadores, evaporadores, etc. La ventaja de este sistema radica en la distribución de una corriente caliente en varias, para proporcionar algún servicio en lugares distantes de la fuente de recuperación. Este sistema ofrece las siguientes ventajas sobre el sistema recuperador generador de vapor:

1. El calor puede ser transferido al proceso a alta temperatura, sin el manejo de altas presiones presentes en los sistemas de vapor. Esta característica reduce el costo del equipo.

2. En el caso de los fluidos térmicos, estos pueden transferir calor a temperaturas superiores a las alcanzadas con vapor saturado, es decir, por arriba de 399 C (750°F).

En los sistemas con fluidos, se tiene la ventaja de la utilización del medio en fase vapor o líquida, de acuerdo a los requerimientos del sistema y la economía.

Existen otras formas de utilizar el calor proveniente de los gases de combustión, como en el precalentamiento de aire en secadores del tipo directo, y su uso como medio de secado en secadores del mismo tipo, evaporando corrientes de proceso, y proporcionando calentamiento de instalaciones en lugares fríos.

El factor a tomar en cuenta para la recuperación de la energía es el costo de recuperación y el tiempo de recuperación de dicha inversión, los cuales varían de proyecto a proyecto.

Las formas más comunes de recuperar la energía como se muestra en este capítulo, son a través de los economizadores y los calentadores de aire, pero eso no significa que las otras opciones no se deban tomar en cuenta, sino al contrario, es valioso tener otras alternativas disponibles de recuperación de energía. De hecho, en las plantas de procesamiento de alimentos, existen secadores que utilizan los gases de combustión como medio desecador. Esta es un área de oportunidad que vale la pena considerar como fuente de recuperación de calor.

4.3 Tratamiento de agua

La materia prima de un generador de vapor es agua, el agua es un excelente medio, ya que es barato, y posee un sin número de ventajas desde el punto de vista térmico. Sin embargo el agua trae consigo mezclas de gases como oxígeno, dióxido de carbono, etc.; además de compuestos insolubles y solubles. Las especies más indeseables desde el punto de vista de operación de sistemas de generación de vapor, son los compuestos de calcio, magnesio y hierro (dureza), y los gases oxidantes.

Las fuentes de pérdida de calor que se presentan en los generadores de vapor ocasionados por el acondicionamiento y manejo del agua de caldera, se manifiestan en la baja de eficiencia del sistema debido a la incrustación de compuestos sobre la superficie de transferencia de calor, que forman películas aislantes al calor. La corrosión del equipo

desgasta el material provocando fallas y fugas, que obligan desde el funcionamiento ineficiente hasta el paro de las operaciones fuera de programación, las purgas de la caldera donde se desecha el agua del generador con alto contenido de sólidos, y malas prácticas de operación. Estos factores combinados provocan consumos de combustibles y gastos de mantenimiento elevados, además del daño irreversible al equipo, que se manifiestan en pérdidas económicas e incremento en la inseguridad del sistema.

Los principales fenómenos que se presentan en el generador de vapor debido a la presencia de impurezas en el agua son:

- Incrustación.
- Sedimentación.
- Corrosión.
- Arrastre de contaminantes.

4.3.1 Incrustación

La incrustación, es una capa de material sólido que se forma sobre la superficie de los tubos del generador de vapor, cuando la concentración de las impurezas en el agua de la caldera excede su límite de solubilidad, y por lo tanto se precipitan. La principal responsable de la dureza del agua son las sales de calcio y magnesio. Estos compuestos se aglomeran sobre la superficie de transferencia de calor en forma de lodo, el cual también contiene compuestos orgánicos y hierro. Además, la dureza presenta características intrínsecas de cristalización y tendencia a adherirse a las superficies metálicas, que aunado al calor al que se encuentran sometidos, forman una película muy resistente que continua incrementando su espesor mientras existan las condiciones que la originan.

Según estudios de "The U.S Bureau of Mines ", se encontró que cerca del 7% del combustible es desperdiciado cuando una incrustación alcanza un espesor de 0.793 mm (1/32 pulg), y una de 2.82 mm (1/9 pulg) provoca gastos de combustible de aproximadamente 16% del consumo (Sendelbach, 1988).

Debido a que la capa incrustante forma un medio aislante para la transferencia de calor, indirectamente provoca que, para compensar la disminución en la velocidad de transferencia se aumente la temperatura del medio de transferencia. Esta compensación

provoca un sobre calentamiento de los tubos, lo cual al corto plazo produce daños considerables al equipo.

4.3.2 **Sedimentación**

La sedimentación se define como, la aglomeración de materiales que normalmente están en suspensión, sobre el área de transferencia de calor u otras superficies dentro del generador. Los depósitos se deben a la dureza, óxidos metálicos, sílica, etc., presentes en el agua de caldera. El mecanismo de depositación está basado en los patrones de circulación y velocidad del fluido dentro del sistema creado por la presencia de gradientes de temperatura y concentración.

A diferencia de los materiales que se encuentran en solución, en el caso del fenómeno de incrustación, los materiales suspendidos pueden ser removidos del agua de repuesto por medios de filtración. Además, el lodo que se deposita dentro del generador puede ser removido por medios mecánicos (lavado con agua a alta presión).

4.3.3 **Corrosión**

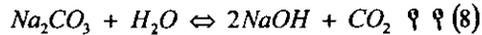
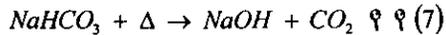
El tercer fenómeno importante es la corrosión, que se define como la destrucción de un metal por medio de reacciones electroquímicas con su ambiente. En el sistema generador, el ambiente incluye el agua caliente con pH bajo o ligeramente ácido y el contenido de oxígeno presente. Estas condiciones son ideales para la corrosión. No obstante, existe una reacción que ocurre en el generador de vapor que sirve como protección a la superficie de transferencia de calor. **Ecuación 6.** Reacción de magnetita.



La magnetita producida (Fe_3O_4) es un óxido de hierro negro. Se ha demostrado que la presencia de este compuesto inhibe la corrosión excesiva en los generadores.

El O_2 presente en el agua en el sistema, se debe a todo el oxígeno que puede ingresar al agua por encontrarse frecuentemente expuesta al aire, en líneas de condensado, presencia de fugas en sistemas bajo vacío, aireación en tanques de condensado, fugas en sellos de bombas, etc.

En cuanto al CO_2 , este puede ingresar al sistema a través del agua como gas disuelto, o en el caso del sistema de condensado, químicamente combinado en el bicarbonato o carbonatos alcalinos del agua de alimentación. En las **Reacciones 7 y 8** se muestra la forma en que el dióxido de carbono es producido a partir de los carbonatos.



La reacción 7, se lleva a cabo completamente, mientras que la reacción 8, solo alcanza el 80% de la reacción total.

Para prevenir los problemas de corrosión, se deben separar el CO_2 y O_2 del agua de alimentación a la caldera. La condensación del CO_2 en el sistema de condensado, resulta en la formación del corrosivo ácido carbónico (H_2CO_3), y la presencia del O_2 en el agua de alimentación, provoca pequeñas perforaciones en el material que no son visibles a simple vista, pero que pueden provocar fallas peligrosas del equipo a largo plazo, debido a que estas pequeñas perforaciones pueden llegar a degradar el material del generador rápidamente (CIP, 2001).

4.3.4 **Índices de estabilidad**

Una forma práctica utilizada en la industria para conocer la estabilidad del agua (inestabilidad debido a la presencia de iones calcio y carbonato), es por medio de los índices de Langelier y Ryznar.

La inestabilidad del agua se define como, las características indeseables que adquiere el agua (incrustante y corrosiva), debido a la presencia de compuestos precipitados de CaCO_3 y MgCO_3 . Ésta estabilidad es función principalmente de la temperatura, presión, turbulencia y las superficies que favorecen la precipitación.

El índice Langelier, es un medio que expresa el grado de saturación del agua en base a la solubilidad del carbonato de calcio (CaCO_3). Es el punto donde teóricamente, el agua no presenta comportamientos indeseables. Langelier propuso un método para predecir el pH de saturación del agua de estudio (pH_s), basado en valores de equilibrio de CaCO_3 , y factores de disociación del ácido carbónico, ión bicarbonato, ión carbonato y la solubilidad

teórica del CaCO_3 en función de la temperatura. El pH_s , se calcula teóricamente en tablas del índice de Langelier, conociendo la dureza, alcalinidad y temperatura del agua.

El índice de Langelier se define como:

$$I_{\text{Langelier}} = \text{pH} - \text{pH}_s \text{ ---(9).}$$

Donde:

pH = El pH del agua a prueba.

pH_s = El pH del agua en el punto de saturación de CaCO_3 .

El índice indica que si existe diferencia entre el pH del agua y su valor de saturación, existirá una inestabilidad. Si esta es positiva, el agua tenderá a la incrustación, sin embargo, si es negativa se comportará como un medio corrosivo si se encuentra oxígeno presente. A mayor discrepancia del valor del índice, mayor será la inestabilidad del agua.

El otro índice también utilizado, es el índice Ryznar o índice de estabilidad (SI). Este índice se diferencia del de Langelier en que, se basó en estudios prácticos en condiciones de incrustación y corrosión. Por lo tanto, este índice es más confiable para predecir la inestabilidad del agua.

El índice de Ryznar se define como:

$$SI = 2\text{pH}_s - \text{pH} \text{ -----(10).}$$

En este caso la escala está fija desde (+6 hasta -6). Donde el valor positivo indica medio corrosivo y el negativo incrustante.

La utilización de estos índices radica en la movilidad del sistema. En el caso de sistemas fijos se utiliza el índice de Langelier, mientras que en sistemas en movimiento (velocidades mayores a 0.6 m/s o suficiente para prevenir la sedimentación) se utiliza el índice Ryznar (NALCO, 1988).

4.3.5 Arrastre de contaminantes

El arrastre de contaminantes con el vapor, se lleva a cabo por mecanismos físicos y de formación de espumas. El fenómeno físico se debe a la erupción repentina y violenta del agua de la caldera, la cual transporta impurezas junto con el vapor producido, usualmente

este fenómeno es causado por condiciones mecánicas. Este arrastre de partículas puede causar depósitos en y alrededor de las válvulas principales a corto plazo.

El otro tipo de arrastre, es el debido a la formación de espumas estables sobre el agua de caldera, la cual es transportada junto con el vapor. Después de cierto tiempo, los depósitos formados debido a la espuma pueden llegar a tapar las líneas de vapor o condensado (CIP, 2001)

4.3.6 Sistemas de control de impurezas

Las principales acciones a tomar para minimizar los daños causados por las impurezas presentes en el agua son: desionizar el agua cruda pre-tratada, así como controlar la alcalinidad, los ciclos de concentración del sistema y la formación de lodos. El ciclo de concentración es una medida de la cantidad de sólidos disueltos en el agua. Es definido como la relación de la concentración de una sustancia específica no volátil en la recirculación del agua entre su concentración en la alimentación o agua de repuesto. El término ciclo se refiere a cuantas veces el agua ha sido reciclada antes de que la concentración de los sólidos disueltos alcance el nivel de saturación.

El proceso de separación de materiales incrustantes, no solo puede llevarse a cabo por medios mecánicos como la filtración cuando se encuentran en solución. Los procesos utilizados para acondicionar el agua, involucran la precipitación y el intercambio iónico para reemplazar los iones duros por otros menos perjudiciales. En el caso de los generadores que operan a altas presiones 61 atm (900 psig), se requiere la completa desionización del agua, no solo la separación de los iones calcio y magnesio, sino también los iones sulfatos, fluoruros y carbonatos.

El control de la alcalinidad es importante como medio de regulación de la solubilidad de los compuestos de calcio y magnesio. La alcalinidad generalmente representa la concentración de los iones bicarbonato, carbonato e hidróxido. El exceso de alcalinidad dentro del generador produce espuma y la producción de vapor de mala calidad, así como problemas de corrosión.

El control del lodo, involucra el control del pH del agua del generador y la precipitación de los compuestos de calcio y magnesio mediante el uso de floculantes que pueden ser

eliminados en el agua de la purga. y evitar así su deposición sobre la superficie de transferencia de calor.

Los ciclos de concentración deben ser monitoreados y controlados para prevenir la precipitación y/o formación de depósitos de compuestos en todo momento. Algunas veces, se pueden lograr bajos niveles de dureza utilizando un tratamiento interno en la caldera, permitiendo así la operación de los ciclos a mayores eficiencias. Cuando la concentración de los compuestos presentes en el ciclo de concentración, alcanza el valor límite de precipitación, una parte del agua del ciclo debe ser remplazada con agua fresca de repuesto. Este ciclo purga / repuesto es necesario llevarse a cabo debido a que la caldera libera vapor puro, mientras que la concentración de los sólidos remanentes en el agua aumenta.

En cuanto a los gases disueltos en el agua, uno de los métodos más utilizados para su remoción es la deaireación mecánica. Un tipo común es el deareador a vacío que emplea una bomba mecánica o sistema de eyectores, el cual puede llegar a remover el O_2 y CO_2 , reduciendo el contenido de O_2 a $70 \mu\text{g/L}$ o menos. Mientras que los deareadores alimentados con vapor (Steam-scrubbing) son mucho más efectivos, este sistema puede normalmente remover casi todo el CO_2 y reducir el nivel de O_2 por debajo de las $7 \mu\text{g/L}$.

Otro medio que se utiliza en conjunto con el deareador mecánico es el químico, que consiste en la adición de emnascarantes químicos (scavengers), para eliminar los remanentes de oxígeno. Las sustancias más utilizadas son los compuestos de sulfito e hidracina. Los sulfitos reaccionan con el oxígeno para formar sulfatos que son sustancias que no afectan el desarrollo de la caldera, pero sin embargo, a altas presiones de operación los sulfitos se descomponen en dióxido de azufre (SO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), sustancias altamente corrosivas. En el caso de la hidracina, esta tiene excelentes propiedades, pero presenta la desventaja de ser una especie cancerígena. Sin embargo se están utilizando productos menos tóxicos al ambiente como los compuestos a base de aminas, aunque tienen la desventaja de tener un costo elevado. Los residuos de sulfito presentes en el agua de caldera se recomiendan entre 20 y 60 mg/L , dependiendo del tipo de presión de operación.

El control del pH es otra variable que se debe controlar debido a que es el responsable de la formación del ácido carbónico, especie corrosiva presente en el vapor y condensado, debido a que el CO_2 reacciona con el condensado y forma el ácido carbónico. El CO_2 se forma cuando el bicarbonato y las especies alcalinas con carbonato se descomponen con las altas temperaturas del sistema. El CO_2 se produce en la caldera, transportándose con el vapor y condensando, además de irse mezclando con el condensado mientras se forma. El ácido presente formado, reduce el valor del pH con lo que contribuye a la pérdida del metal y daños en la líneas de condensado por corrosión. Los principales compuestos utilizados para neutralizar el ácido son alcalinos volátiles a base de aminas (ciclohexilamina), las cuales se adicionan al agua de alimentación, posteriormente se volatilizan y se transportan junto con el vapor, para que finalmente se disuelvan en el condensado y neutralicen el ácido.

Existen varios métodos utilizados para eliminar la dureza del agua a través de la precipitación, estos son a base de carbonatos y fosfatos. En el primero, el carbonato de sodio se utiliza comúnmente para precipitar el carbonato de calcio, el cual puede ser removido a través de la purga, el problema se presenta a altas temperaturas cuando el carbonato de sodio se descompone en hidróxido de sodio y dióxido de carbono, además de la tendencia que tiene el carbonato a incrustarse en el cuerpo del generador. En el segundo, usualmente el ión fosfato se introduce en la forma de fosfato de sodio, el cual es menos vulnerable a la descomposición que el ión carbonato y la ventaja de ser más resistente a altas temperaturas.

El otro medio de eliminación de dureza se lleva a cabo sin precipitación, este se basa en la utilización de especies químicas llamadas quelantes, los cuales han mostrado ser más efectivos que los métodos de precipitación. Estas especies se encargan de inhibir la formación de incrustaciones y permiten incrementar el flujo de calor con menor daño al equipo. Los quelantes son especies orgánicas que forman moléculas complejas (quelatos) con calcio, magnesio y otros iones, los quelatos son muy estables y permanecen en solución incapaces de reaccionar en la formación de incrustaciones y depósitos. Adicionalmente algunas veces también se utilizan polímeros de control de incrustación (poliacrilatos) para mejorar la eficiencia de inhibición. La administración de estas especies se realiza en el agua de alimentación de la caldera. La desventaja de estos sistemas

radica en el difícil monitoreo y control de las especies, además de ser costosas (Sendelbach, 1988).

Los arrastres de materia sólida y espumas, se logran evitar seleccionando sistemas generadores de vapor que contengan separadores mecánicos de arrastre, y acondicionamiento adecuado del agua de caldera para evitar la formación de espuma. Los sistemas de generación que mejor están diseñados, normalmente permiten un arrastre que se manifiesta en una pureza de vapor con un contenido de sólidos totales de 1 mg/L. Algunas veces para minimizar la formación de espumas se utilizan anti espumantes, que por lo general son polialcoholes o aminas. A pesar de contar con un buen diseño y sistemas de tratamiento químico, siempre existirán arrastres, con lo cual la mejor medida preventiva es el evitar la contaminación del agua de caldera y condensados, además de un buen tratamiento químico, para que se pueda producir vapor de buena calidad (CIP, 2001).

4. 4 *Prácticas deficientes de operación*

En este espacio se consideran todas las actividades y decisiones humanas que inciden en la operación ineficiente del generador de vapor.

La operación de un sistema de generación de vapor siempre toma en cuenta dos aspectos muy importantes, el económico y la seguridad. Los sistemas generadores de vapor generalmente operan de manera eficiente entre 65 y 85% de toda la carga. La eficiencia del sistema tiende a disminuir cuando la carga requerida se encuentra por debajo o arriba del punto máximo de eficiencia, pero la disminución de la eficiencia es más pronunciada a cargas por debajo del punto máximo (Smith and Scollon, 1976).

Cuando existe solo un sistema generador, este se debe operar a la máxima eficiencia, pero cuando existen más de dos sistemas generadores, se debe buscar que los sistemas se encuentren balanceados desde el punto de vista del reparto de la carga y que además el consumo energético total sea el mínimo, para que operen a la más alta eficiencia global.

Desde el punto de vista operativo, las principales prácticas que originan gastos de energía y mantenimiento son: el uso de exceso de aire de combustión, la falta de control en la dosificación de las especies químicas en el tratamiento del agua de caldera, las purgas excesivas y la falta de seguimiento de los procedimientos de operación. Las causas son diversas, se deben a fallas mecánicas en el equipo, sistemas de control automático, mantenimiento y supervisión inadecuados, contaminación de condensado, falta de estándares de operación, etc.

El éxito en la operación de un generador de vapor se logra determinando las condiciones óptimas de su operación, así como el lograr su estabilidad, ya que las variaciones principalmente en la demanda de vapor, provocan que el sistema modifique su condición estable con el objeto de adaptarse a las nuevas condiciones. A pesar de que se obtendrá la cantidad demandada, el funcionamiento desde el punto de vista energético del sistema no será el óptimo.

CAPITULO V. ELABORACIÓN DE ESTUDIOS ENERGÉTICOS INTEGRALES

La elaboración de un estudio energético integral referido particularmente a una planta de jarabes de maíz, involucra principalmente dos aspectos: energía térmica y eléctrica. Se ha demostrado que la generación de energía eléctrica utilizando combustibles fósiles, sin aprovechar el potencial térmico de los efluentes gaseosos es ineficiente y contaminante.

La cogeneración moderna es un sistema tecnológico que incorpora diferentes principios, entre ellos la competitividad y la disminución de emisiones contaminantes, los cuales están contemplados en las políticas de globalización económica regional, así como la política internacional orientada a lograr un desarrollo sustentable.

El propósito principal de la cogeneración es lograr un mejor aprovechamiento de los combustibles primarios, razón por la cual se considera en los programas de ahorro de energía como una alternativa fundamental.

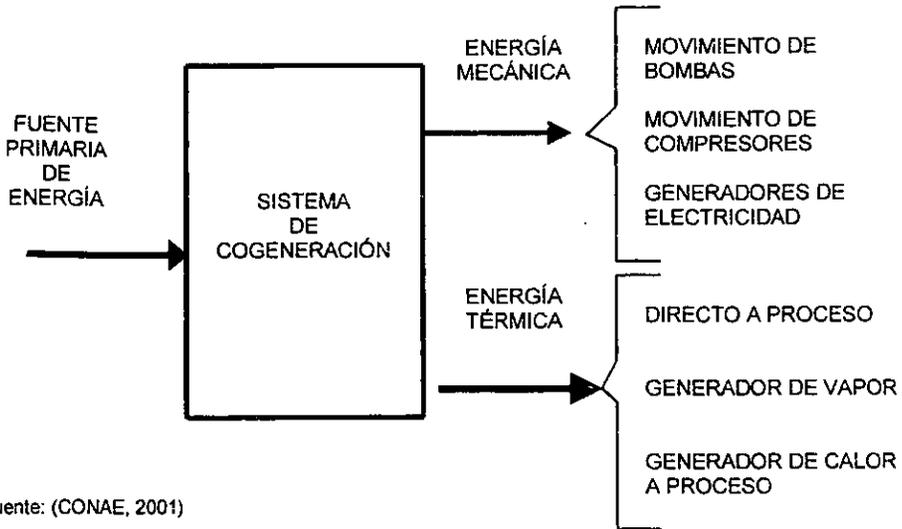
5.1 Análisis de sistemas de cogeneración

La cogeneración es el término empleado para denominar los sistemas que combinan los procesos térmicos asociados a la producción de energía eléctrica (mecánica), con otros tipos de procesos térmicos (generación y/o demanda de vapor o calor), utilizando el calor de desperdicio de uno como la entrada de energía del otro.

La cogeneración es en esencia, una técnica que permite mejorar la eficiencia de conversión de los combustibles a otras formas de energía como son el calor y la electricidad.

Con su aplicación se ha demostrado que es posible aprovechar la energía térmica que se desperdicia en la producción de electricidad, de manera independiente a la demanda de calor o producción del mismo en diversos procesos, al utilizar entre 10% y 30% menos de combustible, dependiendo de la configuración y de las aplicaciones involucradas. En la **Figura 3** se muestra un esquema a bloques del sistema de cogeneración.

Figura 3. Esquema general de la cogeneración



Fuente: (CONAE, 2001)

En términos generales, los beneficios potenciales de la cogeneración industrial son ampliamente reconocidos. Estos se pueden enfocar de diferente manera, desde el punto de vista de los intereses nacionales incluyen entre otros:

- Ahorros de energía primaria. Incrementando la capacidad de cogeneración en la industria, puede ayudar a reducir el consumo de combustibles que actualmente se usan en las plantas de generación de potencia. Se estima que con la instalación de una capacidad de 4,200 kW., en un periodo de 10 años, se podría lograr un ahorro acumulado, equivalente a 325 millones de barriles de petróleo crudo.
- Incremento de la eficiencia de distribución. Las pérdidas por transformación y distribución disminuyen al tener los sistemas generadores ubicados en los centros de consumo. Con la misma base anterior se estiman ahorros de 1.3 TWh (1T = 10⁶M) anuales.
- Difiere inversiones requeridas en ampliar la capacidad instalada en el país. Con los sistemas de cogeneración industrial se disminuye el crecimiento de la demanda, por lo que el crecimiento de la oferta se puede realizar más lentamente, lo que implica disminuir la velocidad de construcción de nuevas plantas generadoras.
- Reduce emisiones globales. Al disminuir globalmente el uso de energía primaria, produce que las emisiones derivadas de la combustión de combustibles fósiles disminuya, con el consiguiente beneficio.

Desde el punto de vista de los intereses de la industria se tienen los siguientes beneficios:

- Reducción de los costos de energía. Al utilizar el calor para la generación de potencia, los costos de la compra de energía eléctrica disminuyen considerablemente. Se ha estimado que la reducción en la facturación energética total puede alcanzar hasta un 50%.
- Más confiabilidad en el suministro de energía. Generando su propia energía, en su propia planta, le da más confiabilidad y autosuficiencia a su suministro de energía. Un sistema de cogeneración conectado en paralelo con la red eléctrica como respaldo, garantiza la continuidad en el suministro de energía eléctrica.
- Mejora en la calidad de la energía suministrada. Se puede corregir inmediatamente cualquier desviación, fuera de lo normal, voltaje o frecuencia.

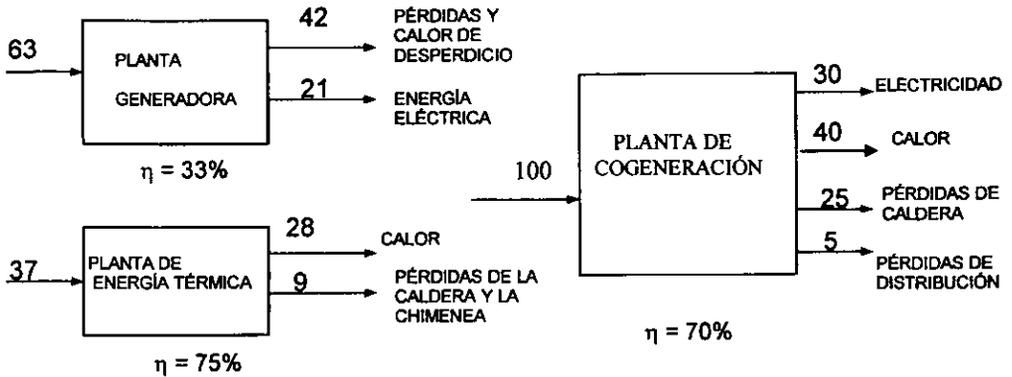
A pesar de las grandes y muchas ventajas que tiene la utilización de la cogeneración, existen una serie de inconvenientes que se necesitan tomar en consideración antes de decidir la realización de un proyecto en específico. Los principales son:

- Los sistemas de cogeneración requieren de una inversión substancial, que muchas compañías no están en disposición de gastar por tratarse de un proyecto que no incrementa su capacidad de producción, aunque sea altamente favorable.
- Los sistemas de cogeneración pueden llegar a ser complejos en su diseño, instalación y operación, por lo que requieren la utilización de empresas o personas bien capacitadas en esta área.
- En algunos proyectos su economía puede ser muy sensible a los costos de energía eléctrica y de los combustibles, los cuales son impredecibles, aunque la tendencia normal es hacia la alza, por lo menos en el mediano plazo. Para los proyectos que son altamente dependientes de la venta de excedentes a la red, deben de buscar contratos a largo plazo con precios de compra que mantengan la rentabilidad del proyecto.

En los sistemas de cogeneración la energía empleada para generar la energía eléctrica y térmica es mucho menor a la utilizada en los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica y térmica por separado, es decir, que de un 100% de energía contenida en el combustible, en una termoeléctrica convencional sólo 33% se convierte en energía eléctrica, el resto, se pierde a través del condensador, los gases de escape, las pérdidas mecánicas y las pérdidas eléctricas por transformación y transmisión. En los sistemas de cogeneración se llega a aprovechar hasta un 84% de la energía contenida en el

combustible para la generación de energía eléctrica y calor al proceso (25-30% eléctrico y 59-54% térmico). Lo anterior se puede observar en los diagramas que se muestran en la **Figura 4.**

Figura 4. Cogeneración contra Sistema Convencional



100 UNIDADES POR HORA DE ENERGÍA

100 UNIDADES POR HORA DE ENERGÍA

"Aumento de eficiencia global 21%".

Fuente: (CONAE, 2001)

Este proceso permite que el combustible que se agregue a un proceso, para generar energía eléctrica por cogeneración, sea mucho menor que el usado en las plantas convencionales de generación de energía eléctrica para la misma generación.

Los principales elementos constituyentes de un sistema de cogeneración son:

- Elemento mecánico o motor primario.
- Elemento de recuperación de calor de desperdicio.
- Sistema de transmisión de energía.
- Sistemas auxiliares (bombas, compresores, alternador, etc.).
- Sistema de control.

El componente más importante es el motor primario, el cual convierte la energía del combustible en la energía que suministra la flecha. Los dispositivos de conversión más ampliamente utilizados son las turbinas de vapor, las turbinas de gas y los motores de combustión interna o alternativos.

Existe una gran variedad de equipos para la recuperación del calor de desperdicio, por lo que la selección adecuada de éste, dependerá el uso que se le necesite dar. Estos pueden ir, desde sistemas de baja presión de distribución de vapor a la salida de las extracciones de las turbinas, hasta calderas de recuperación para extraer la energía de los gases producidos en una turbina de gas.

Los sistemas de control son necesarios para la automatización del motor primario, la operación segura del sistema de recuperación de calor y en general para la operación eficiente del sistema.

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse de acuerdo con el orden de producción de electricidad y energía térmica en:

1. Sistemas superiores (Topping Cycles).
2. Sistemas inferiores (Bottoming Cycles).

Los sistemas superiores de cogeneración, que son los más frecuentes, son aquellos en los que una fuente de energía primaria (como el gas natural, diesel, carbón u otro combustible similar) se utiliza directamente para la generación de energía eléctrica en el primer paso. A partir de la energía química del combustible se produce un fluido caliente que se destina para generar la energía mecánica y la energía térmica resultante, el denominado calor residual como vapor o gases calientes, es suministrada a los procesos industriales ya sea para secado, cocimiento o calentamiento, que constituyen el segundo uso. Este tipo de sistemas se utiliza principalmente en la industria textil, petrolera, celulosa y papelera, cervecera, alimenticia, azucarera, entre otras, donde sus requerimientos de calor son moderados o bajos con temperaturas de 250 C a 600 C.

En los sistemas inferiores la energía primaria se utiliza directamente para satisfacer los requerimientos térmicos del proceso del primer paso y la energía térmica residual o de desecho, se usará para la generación de energía eléctrica en el segundo paso. Los ciclos inferiores están asociados con procesos industriales en los que se presentan altas temperaturas como el cemento, la siderúrgica, vidriera y química. En tales procesos resultan calores residuales del orden de 900°C que pueden ser utilizados para la producción de vapor y electricidad.

Existe una gran variedad de equipos y tecnologías que pueden ser considerados para una aplicación específica de cogeneración. Cada tecnología tiene sus características propias, que deben ser consideradas en el contexto de los requerimientos específicos del lugar.

Otra clasificación generalmente empleada para los sistemas de cogeneración, es la que se basa en el tipo de motor primario empleado para generar la energía eléctrica, con la cual se tiene:

- Cogeneración con turbina de vapor.
- Cogeneración con turbina de gas.
- Cogeneración con ciclo combinado.
- Cogeneración con motor reciprocante.

Cogeneración con turbina de vapor:

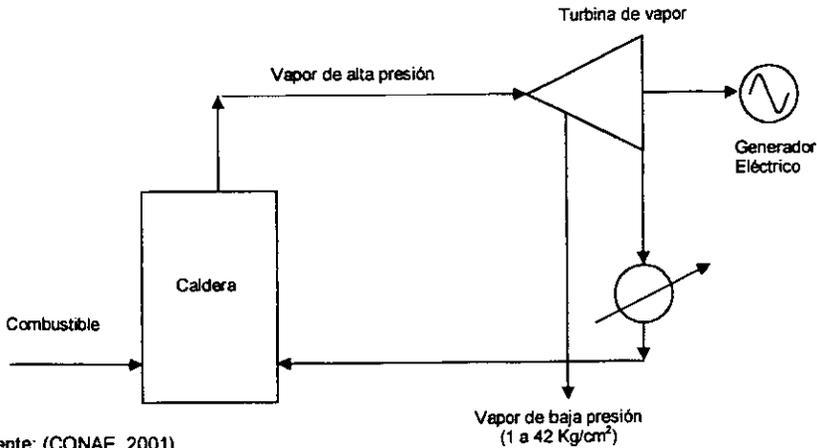
En este sistema la energía mecánica se produce por la turbina mediante la expansión del vapor de alta presión, generado en una caldera convencional. Bajo este sistema la generación de energía eléctrica por unidad de combustible es menor que en la turbina de gas (generalmente del orden de 15%), aunque la eficiencia global del sistema es más alta (del 85% al 90%) que en la turbina de gas ya que produce energía térmica del orden del 75%.

Las turbinas de vapor se dividen en tres tipos: a contrapresión, a extracción y a condensación.

En las turbinas de contrapresión su principal característica es que el vapor, cuando sale de la turbina se envía directamente al proceso sin necesidad de contar con un condensador y equipo periférico, como una torre de enfriamiento.

En la turbina de extracción/condensación mostrada en la **Figura 5**, una parte del vapor puede extraerse en uno o varios puntos de la turbina antes de la salida al condensador, obteniendo así, vapor a proceso a varias presiones, mientras que el resto del vapor se expande hasta la salida del condensador.

Figura 5. Turbina de Vapor a extracción - condensación



Fuente: (CONAE, 2001)

En las turbinas de condensación, la salida de vapor expandido en la turbina pasa al condensador a una presión, normalmente, inferior a la presión atmosférica. Estos sistemas se aplican principalmente en aquellas instalaciones en las que la necesidad de energía térmica respecto a la eléctrica es de 4 a 1 o mayor. Las principales ventajas y desventajas de este sistema son:

Ventajas:

- ✓ Capacidades de 500kW hasta 100,000kW o más.
- ✓ Eficiencia global del sistema alta (90%).
- ✓ Alta seguridad de operación.
- ✓ Vida útil (25 años).

Desventajas:

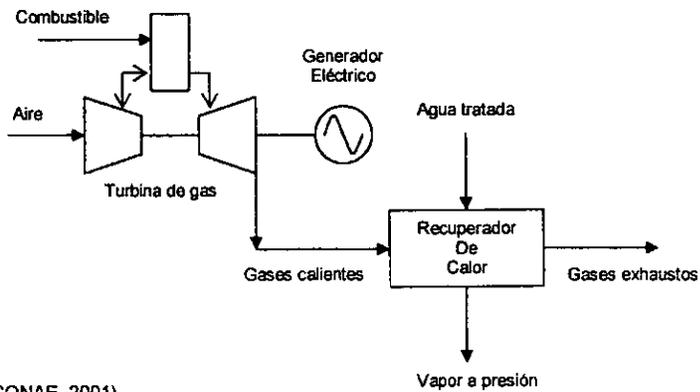
- ✓ Altos costos de inversión.
- ✓ Tiempo de arranque lento.
- ✓ Baja relación de energía eléctrica / energía térmica (15%).

Cogeneración con turbina de gas:

En este sistema el combustible es quemado en una cámara de combustión, de la cual los gases generados son introducidos a la turbina, para convertirse en energía mecánica, la

que podrá ser transformada en energía eléctrica usando un alternador. Los gases de escape tienen una temperatura que va de 500 C a 650 C. Estos gases son relativamente limpios y por lo tanto se pueden aplicar directamente a los procesos de combustión posteriores, ya que tienen un contenido de oxígeno de alrededor del 15% al 16%, y debido a su alta temperatura suelen ser empleados a su vez, para producir otro fluido caliente como vapor, aire, o agua como se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6. Turbina de gas



Fuente: (CONAE, 2001)

La cogeneración con turbina de gas resulta muy adecuada para los procesos en los que se requiere de una gran cantidad de energía térmica, presentando las ventajas y desventajas siguientes.

Ventajas:

- ✓ Amplia gama de capacidades desde 500kW hasta 265MW.
- ✓ Altas eficiencias de conversión de energía térmica.
- ✓ Eficiencias de conversión a energía eléctrica del 27%.
- ✓ Se alcanzan eficiencias globales arriba del 80%.
- ✓ Alta seguridad de operación.
- ✓ Bajo costo relativo de inversión.
- ✓ Requiere de poco espacio.

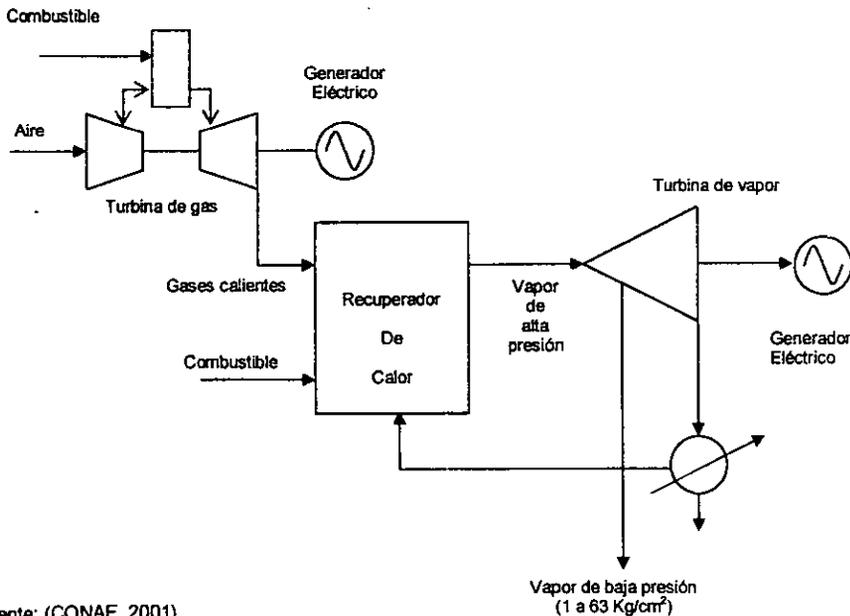
Desventajas:

- ✓ Baja eficiencia en carga parcial.
- ✓ Vida útil relativamente baja.
- ✓ Limitantes en cuanto al combustible usado.

Ciclo combinado:

A este sistema se le caracteriza porque emplea una turbina de gas y una turbina de vapor. En este sistema los gases producidos en la combustión de la turbina de gas, se emplean para producir vapor a alta presión a través de una caldera de recuperación, para posteriormente alimentar a la turbina de vapor, sea de contrapresión o extracción-condensación y producir por segunda vez energía eléctrica, utilizando el vapor a la salida de la turbina o de las extracciones directamente en los procesos en la **Figura 7** se muestra el esquema del ciclo combinado.

Figura 7. Esquema de ciclo combinado



Fuente: (CONAE, 2001)

El ciclo combinado se aplica en procesos donde la razón potencial / calor es alta. Sus principales ventajas y desventajas son:

Ventajas:

- ✓ Amplia producción de electricidad.
- ✓ Elevada eficiencia térmica.
- ✓ Operación flexible.

Desventajas:

- ✓ Limitantes en cuanto al empleo de combustible.
- ✓ Alto costo de inversión.

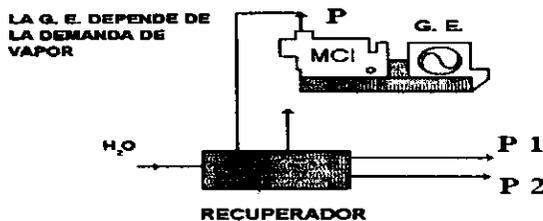
La aplicación correcta de cada sistema de cogeneración dependerá principalmente de la relación de energía térmica / eléctrica, del tiempo de operación anual, de los procesos y la variación de la demanda eléctrica, entre otros.

Los sistemas de cogeneración se pueden diseñar para abastecer la totalidad de la demanda térmica, o la demanda eléctrica, o una combinación de las anteriores, con la posibilidad de exportar los excedentes a la red o a otras empresas asociadas.

Motores alternativos MCI:

Este sistema arroja la mayor generación eléctrica por unidad de combustible consumido, alrededor del 34% al 40%, aunque los gases residuales son a baja temperatura 200 C a 250 C. Sin embargo, en aquellos procesos en los que se puede adaptar, la eficiencia de cogeneración alcanza valores similares a los de las turbinas de gas. Con los gases residuales, se puede producir vapor de baja presión (alrededor de 10 a 15 kg/cm²) o agua caliente de 80 C a 100 C. En la **Figura 8** se muestra el esquema del motor alternativo.

Figura 8. Esquema motor alternativo



Fuente: (CONAE, 2001)

Entre las principales ventajas y desventajas de los sistemas de cogeneración a base de motor alternativo son:

Ventajas:

- ✓ Alta eficiencia de producción de energía eléctrica (hasta 40%).
- ✓ Eficiencia global del sistema del orden del 70%.
- ✓ Bajo costo de inversión.
- ✓ Vida útil larga (25 años).
- ✓ Capacidades de 1kW hasta mayores de 20,000kW.
- ✓ Alta eficiencia a baja carga.
- ✓ Consumo medio de agua de enfriamiento.
- ✓ Requiere poco espacio para su instalación.

Desventajas:

- ✓ Altos costos de mantenimiento.
- ✓ Baja temperatura de la energía producida.
- ✓ Dispersión de la energía térmica recuperable (gases).

5.2 Información requerida para el análisis

Para desarrollar un análisis de viabilidad técnica y económica de la conveniencia de utilizar un sistema de cogeneración en una planta en específico, es necesario conocer cómo, cuánto y qué tipo de energía utiliza.

Para este análisis se necesita la información particular de las características energéticas del sitio, en donde se planea instalar el sistema de cogeneración, consumos y demandas de vapor, agua caliente, energía eléctrica, los combustibles utilizados en la planta, los equipos existentes (calderas, turbinas, etc.). Es también necesario, contar con la información de los precios y costos de los combustibles y electricidad. Para completar el estudio, se requiere también la información de las horas de operación de la planta, conocer los planes futuros de crecimiento, tener claros los criterios aplicados de rentabilidad y las oportunidades de financiamiento, así como, de las oportunidades de comercializar excedentes eléctricos.

Debido a que una planta de cogeneración es una oportunidad relativamente cara de conservación de energía, se debe de abordar después de asegurar la eficiencia energética de la planta o proceso a donde va a servir, desarrollando medidas de baja inversión, derivadas de un diagnóstico energético. Si se pierden cantidades importantes de energía térmica, en fugas de vapor o en aislamientos deficientes de las líneas que la conducen, estos problemas se deben de corregir antes de evaluar la carga térmica a considerar en el sistema de cogeneración.

La viabilidad técnica, de un proyecto de este tipo, se basa en la compatibilidad entre el sistema de cogeneración y los sistemas electromecánicos de la planta, la determinación de la disponibilidad del espacio para su instalación y de un análisis para ver si los sistemas existentes son los adecuados. Dentro de los datos requeridos para determinar el estudio de previabilidad, se deben de tener los balances de energía térmica y eléctrica, los cuales muestran como se está utilizando la energía, por lo menos, en las cargas principales pueden llegar a representar el 85% del consumo. Una buena fuente de esta información es a partir de la facturación energética y se deben de complementar con los diagramas unifilares de ambos tipos de energía, en donde se compruebe el balance entre la energía comprada o generada con los equipos consumidores. Cuando sea posible, es conveniente contar con una caracterización confiable de las variaciones diarias y estacionales, de los perfiles de uso de la energía por los consumidores finales y de los sistemas que se consideran que están dentro del sistema de cogeneración.

La viabilidad económica de un proyecto de cogeneración, será proporcional al número de horas totales de operación a plena carga. Estas solo se pueden determinar de los datos históricos, a los cuales, se les hacen las modificaciones en base a los cambios proyectados en expansiones o cambios en la programación de producción.

Finalmente, cuando el proyecto no es el resultado de un diagnóstico energético, en donde se hayan corregido los desperdicios y se tengan los verdaderos consumos de energía, es recomendable hacer una inspección general, para determinar si existen oportunidades de implantar medidas de baja o nula inversión, que alteren los perfiles del uso de la energía, que se determinarán de los datos recogidos.

5.3 Principales factores que definen la viabilidad del proyecto

Los principales factores considerados son:

- Tipo de combustible.

Todas las tecnologías de cogeneración que se han mencionado, operan con una gran variedad de combustibles. La selección del más adecuado, depende del tamaño de la instalación, la velocidad del motor (en el caso de motores diesel), la facilidad de manejo del mismo, las consecuencias contaminantes de su uso y costo, y disponibilidad.

El carbón se puede considerar el combustible más barato, sin embargo, su utilización en las plantas de cogeneración, no se justifica por su alto costo de inversión en los sistemas de transporte, manejo y limpieza de los gases. El combustóleo es muy usado en las calderas convencionales, pero su alto contenido de azufre y vanadio (especialmente el mexicano) lo hace fuertemente corrosivo y contaminante, por lo que se requiere de sistemas de limpieza de gases muy costosos para cumplir con la normatividad ecológica. El diesel, aunque menos contaminante que el combustóleo, es muy caro, por lo que es económicamente rentable solo como respaldo. Por otro lado, el gas natural tiene la gran ventaja de ser un combustible muy limpio, siendo el ideal para las turbinas de gas y actualmente su incremento es grande en el uso en calderas convencionales.

}

- Relación calor electricidad Q/E.

Las diferentes industrias tienen requerimientos específicos de vapor y energía eléctrica. Normalmente la disponibilidad de vapor del proceso es prioritaria. Actualmente, con la nueva reglamentación, la generación eléctrica puede ser más flexible ya que se pueden tener excedentes que se venden o los faltantes se pueden comprar C.F.E.

- Acceso tecnológico.

El acceso tecnológico es limitado a especialistas en sistemas de cogeneración, ya que estos son complejos desde el punto de vista de operación y mantenimiento. Se requiere por lo tanto, asistencia técnica especializada en el implemento de esta tecnología.

- Disponibilidad.

La mayoría de los procesos industriales, requieren de una disponibilidad ininterrumpida de vapor y electricidad. Las plantas de cogeneración pueden satisfacer completamente estos requisitos si se selecciona y dimensiona en forma adecuada, por lo que contar con la información de la empresa, es sumamente importante para definir el sistema más adecuado en cada caso.

- Costo de inversión.

Dependiendo de la tecnología seleccionada, el costo de la inversión llega a variar hasta en un 200%, sin embargo, las condiciones demandadas por el proceso serán las que definan primordialmente el tipo de tecnología a usar, y dentro de las seleccionadas deben estar las de menor inversión.

- Protección ambiental.

Los límites de emisiones establecidos para la protección ambiental, son de suma importancia en la evaluación de un proyecto, por su impacto en los costos de inversión y operación de las plantas de cogeneración.

- Situación geográfica.

Por razones de carácter técnico y económico, la planta de cogeneración debe de ubicarse lo más cerca posible de los consumidores de vapor. Los factores del medio ambiente que tienen más influencia sobre la operación del sistema, son la altura sobre el nivel del mar, la temperatura y humedades ambientales.

4.4 Selección y análisis del sistema de cogeneración

Los factores más importantes, que afectarán la selección del ciclo de cogeneración para su evaluación preliminar son:

- La relación Q/E, ya que existen diferentes tecnologías y cada una es adecuada para una relación dada, conforme a lo dicho en el capítulo anterior.
- La calidad del calor requerido, la temperatura y presión con que se debe de suministrar el vapor.

- Los costos de los equipos que dependen de la tecnología seleccionada. Para un estudio de previabilidad, se considera aceptable el costo del equipo dentro de un rango de $\pm 25\%$, lo que es consistente con tomar valores promedio de cargas.
- El tipo de combustible a utilizar por su costo y disponibilidad.
- El tamaño del sistema, ya que algunas tecnologías son competitivas solamente en capacidades mayores de un MW.

Por otro lado, si la cogeneración es parte de un proyecto nuevo, no se tienen restricciones de espacio para la selección del sistema más adecuado. Si por el contrario, es resultado de una adaptación en una planta ya operando, es necesario considerar la disponibilidad de espacio, el equipo existente que podría aprovecharse y la capacidad de la red pública externa, para que en su caso, se puedan exportar los excedentes de energía (CONAE, 2001).

En resumen, el sistema de cogeneración es una alternativa técnica, que permite a las empresas disminuir sus consumos energéticos, mediante el aprovechamiento energético máximo del combustible. Desde el punto de vista técnico, la implementación de estos sistemas se basa en el cumplimiento de las necesidades energéticas de la planta. El aspecto económico depende del financiamiento y la rentabilidad del proyecto. Sin embargo, también existen aspectos legales y políticos que influyen en la decisión de llevar a cabo el proyecto, que deben ser tomados en cuenta.

CAPITULO VI. LINEAMIENTOS ESTRATÉGICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN EN EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA TÉRMICA

Este capítulo tiene como fin: el describir generalmente un programa de ahorro de energía que permita alcanzar los objetivos propuestos, dar a conocer los principales procesos que se llevan a cabo en una refinería de glucosa y establecer los lineamientos estratégicos que permitan alcanzar el ahorro en energía térmica en dicha refinería.

6.1 Programa de administración de energía

El programa de ahorro de energía se crea para satisfacer la necesidad empresarial, nacional e internacional de abatir los consumos de energía y preservar los combustibles no renovables. La aplicación exitosa del programa, permitirá a la empresa disminuir sus costos de producción y facturación por consumo de energía, y contribuirá en menor medida a la contaminación ambiental.

6.1.1 Objetivos del programa de administración de energía

El planteamiento del programa de administración de energía, tiene como objetivos:

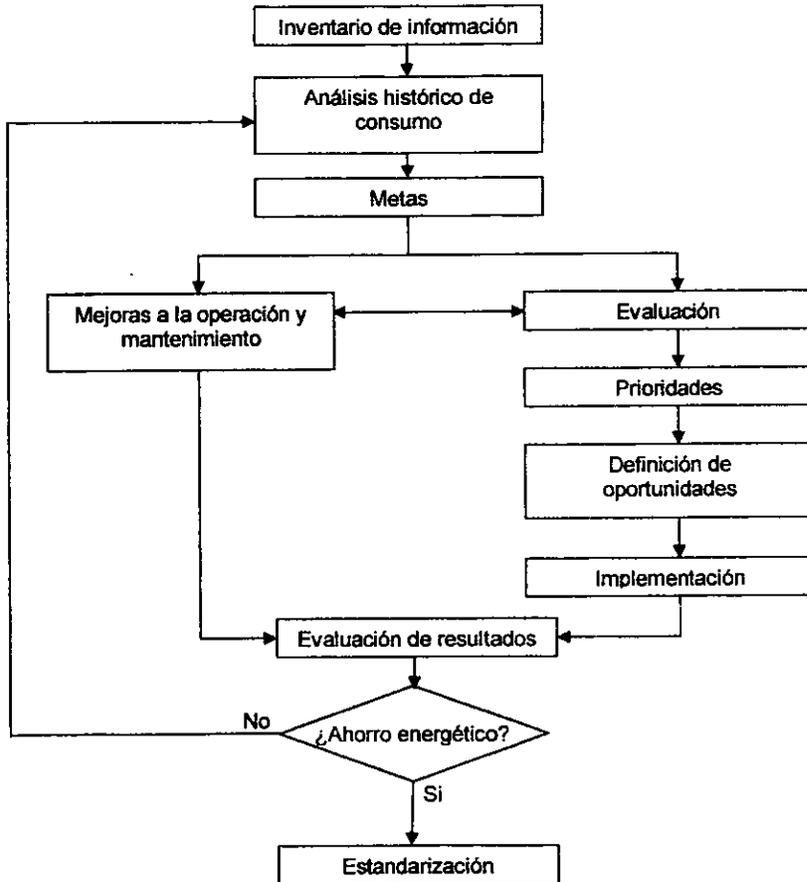
- Optimizar continuamente los requerimientos energéticos del proceso o sistema, tratando de ahorrar energía en todas sus aplicaciones, incrementando la eficiencia en su uso y evitando el desperdicio.
- Establecer procedimientos generales, para evaluar procesos existentes y proponer posibles modificaciones mediante los conocimientos adquiridos a través de la experiencia alcanzada durante el desarrollo del programa.
- Obtener ahorros de energía, a través de la optimización y diseño de los sistemas de servicios auxiliares.
- Tratar de aprovechar todos los recursos existentes dentro del proceso productivo, de forma que los materiales, combustibles y corrientes de desecho susceptibles de generar energía, sean objeto de análisis de factibilidad para nuevos proyectos sobre generación de energía.
- Lograr una integración con el proceso de asimilación tecnológica.

6.1.2 Descripción del modelo de administración de energía

Para poder cumplir con los objetivos planteados, se propone la siguiente metodología, la cual proporciona un mayor conocimiento del proceso y asegura un desarrollo sistemático.

En la **Figura 9**, se muestra el modelo de funcionamiento del programa.

Figura 9. Modelo de administración de energía



6.1.2.1 Inventario de información técnica

Para llevar a cabo el desarrollo del modelo, primeramente se necesita un soporte sólido de información técnica. Esta información es el punto de partida para la implementación del programa, donde además proporciona nuevos enfoques en la realización general y es la

base de donde surgen las ideas de oportunidades de ahorros potenciales. Básicamente este paquete de información debe contener:

- Ingeniería básica del proceso.

El objetivo de recopilar esta información, es para conocer los criterios de diseño, métodos de cálculo y dimensionamiento de los equipos, requerimientos de control y en general de la configuración particular del proceso. Además de, adquirir conocimiento de la filosofía de diseño y operación de la planta (entender como y donde se genera la energía y cual es su distribución y consumo de la misma).

La información debe contener:

- ✓ Datos básicos de ingeniería.
- ✓ Especificaciones y estándares de diseño.
- ✓ Sumario de equipo, instrumentación, tubería y aislamientos.
- ✓ Descripción del proceso.
- ✓ Diagrama de flujo.
- ✓ Diagramas de tuberías e instrumentación.
- ✓ Planos y datos de equipo.
- ✓ Memorias de cálculo.
- ✓ Diagramas de localización y arreglos de equipo.
- ✓ Datos técnicos de materiales.
- ✓ Manual de operación.

Toda esta información recolectada, se puede resumir en un esquema que muestre todos los flujos de energía existentes del proceso. A este esquema se le conoce como Diagrama de Flujo de Energía (DFE).

- Balance térmico de la planta.

Este documento indica todos los intercambios de energía a la capacidad de producción. Muestra además el equipo generador de vapor, cabezales de vapor de acuerdo al tipo de presión utilizada, los usuarios de energía y el sistema de tratamiento y acondicionamiento de condensados.

- Actualización de la información.

La experiencia obtenida a través de la operación de la planta, debe ser aprovechada al máximo mediante el análisis de las modificaciones implantadas tanto en su diseño como en sus condiciones o procedimientos de operación, con el objeto de evaluar los resultados obtenidos con respecto a los deseados y su impacto en el uso adecuado de la energía.

Esto, proporciona mayor conocimiento acerca del comportamiento del proceso y puede contribuir a la generación de nuevas ideas para incrementar la eficiencia energética.

- Información complementaria.

Con el propósito de asistir, estimular y mejorar el desarrollo del programa, es necesario obtener y dar a conocer continuamente información relacionada con aspectos de conservación de energía. Mediante esta actividad es posible:

- ✓ Comparar procesos similares e identificar sus prácticas de ahorro y aprovechamiento de energía, asimilando los resultados obtenidos en estos intentos.
- ✓ Determinar la existencia de nuevas tecnologías que involucren operaciones menos demandantes de energía.
- ✓ Revisar la posibilidad de recirculaciones, sustituciones de equipo o utilización de formas alternativas de materiales y/o energía para incrementar su eficiencia.

6.1.2.2 Análisis histórico

El siguiente paso dentro del programa de energía, es obtener los registros de generación y consumo de energía, con el objeto de determinar exactamente la cantidad y el costo de la energía que se utiliza.

La recopilación de estos datos y su tabulación, van a proporcionar las herramientas necesarias para el seguimiento del programa y medición de resultados sobre una base de tiempo. Por otra parte, permite detectar alguna situación anormal en la operación energética de la planta y de esta forma implementar acciones correctivas.

- Registros.

La cuantificación del consumo energético, se debe realizar sobre una base que permita la comparación y que no sea afectada por situaciones como el aumento en el precio de los

energéticos o variaciones en los volúmenes de producción. Normalmente se emplean índices de utilización de energía, como kcal/unidad de producción.

- Gráfica de operación histórica.

La elaboración de una gráfica de consumo y de producción de energía en la planta, mostrará la tendencia y factores que han afectado su operación energética, como son: clima, cambios en los procedimientos de operación, variaciones en especificaciones de materiales y mal funcionamiento de los equipos.

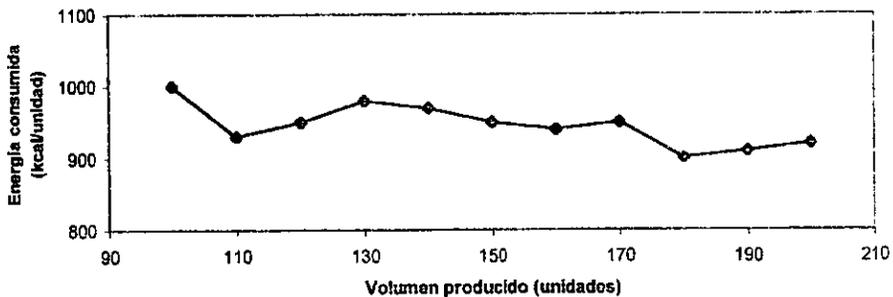
- Curva de energía del proceso.

La curva de energía del proceso es una guía importante en la operación de una planta altamente demandante de energía y puede ser usada para la toma de decisiones diarias, así como, la planeación del rango de operación para una producción determinada.

La preparación de esta gráfica, energía vs capacidad de la planta, tiene por objeto determinar el requerimiento energético del proceso a diferentes volúmenes de producción y detectar que tan intensivo en energía es el producto fabricado.

En la siguiente, **Figura 10** se muestra una ilustración gráfica de una curva de energía de proceso.

Figura 10. Curva de energía del proceso



7

6.1.2.3 Metas

Con el análisis de la información recopilada y su actualización constante, se puede realizar una comparación de operación con respecto a los resultados obtenidos

anteriormente, lo que permitiría monitorear la eficiencia energética de operación y su costo.

Una vez que se ha recolectado la información técnica, comparado los consumos energéticos e identificado las principales áreas de interés, se deben de realizar visitas a la planta con el objetivo de conocer el proceso, estado físico de las instalaciones, ubicar físicamente las áreas críticas energéticas, conocer el sistema de administración, prácticas de operación, etc. Este tipo de visitas proporcionan información muy valiosa, que no se encuentra registrada en los datos técnicos adquiridos y que permiten empezar a identificar los posibles sistemas o equipos a estudio. También es importante, mostrar una actitud profesional y ética en todo momento, ya que ello, proyectará sobre el personal de planta la seriedad e interés de crear una cultura de administración y conservación de energía.

La estrategia del modelo propuesto, se basa principalmente en la evaluación e implementación de soluciones temporales de bajo costo de inversión, enfocadas en mejoras a la operación y mantenimiento de la planta y la búsqueda de soluciones definitivas, que van desde el desarrollo de proyectos de inversión hasta el cambio de tecnología, con lo cual podrán alcanzarse mayores ahorros de energía.

6.1.2.4 Mejoras a la operación y mantenimiento

La primera etapa del programa de conservación de energía implica una revisión de aspectos relacionados en forma periférica con el proceso. Por lo tanto, inicialmente los ahorros son derivados del mejoramiento a procesos de operación y la intensificación de los esfuerzos de mantenimiento, empleando paralelamente, un programa adicional continuo para el personal que interviene en la operación de la planta. Además, durante esta fase se establecerá como objetivo, el minimizar el consumo de energía mediante el control directo y continuo del proceso a partir de los registros de consumo de la planta.

Algunas de las actividades e improvisaciones a desarrollar en esta área serán:

- Detectar y reparar fugas de vapor.
- Revisar y reparar el aislamiento en tuberías y recipientes, detectar posibles aislamientos en superficies descubiertas que puedan proporcionar ahorros significativos, determinar el tipo apropiado de aislamiento y su espesor óptimo.

- Reemplazar y seleccionar adecuadamente trampas de vapor defectuosas, proporcionándoles mantenimiento frecuente para asegurar su buen funcionamiento. Se implantará un registro de mantenimiento para cada trampa en servicio y de ser posible, los operadores realizarán inspecciones periódicas como una forma de mantenimiento preventivo.
- Proporcionar tratamientos químicos adecuados a los sistemas de agua de enfriamiento y de alimentación de calderas, para evitar la formación de lodos, algas e incrustaciones en la tubería que disminuyan el área efectiva de transferencia de calor.
- Control de pérdidas de combustible y optimización de su consumo.
- Mejorar la eficiencia de calderas, mediante ajustes en los controles de los quemadores, para tener bajos excesos de aire, para lo que se requerirá una revisión constante de los niveles de oxígeno en exceso en los gases de salida.
- Evitar emisiones a la atmósfera y descargas de materiales con alto contenido energético, mediante la recuperación y aprovechamiento de vapor de bajo nivel.
- Revisar frecuentemente la operación de equipos de gran consumo de energía.
- Dar mantenimiento a los instrumentos de medición para su apropiado funcionamiento y poder asegurar mediciones reales.

Gradualmente, el impacto de las modificaciones introducidas al proceso crecerá en importancia y se podrán generar nuevos objetivos, los cuales implicarán proyectos que irán incrementándose en costo y complejidad.

De los logros que se van obteniendo a través de la realización del programa, se irán identificando lineamientos generales para el establecimiento de procedimientos en la evaluación y control energético del sistema.

6.1.2.5 *Análisis detallado del proceso*

En la segunda etapa de la estrategia se requiere analizar el proceso a detalle, con el objetivo de incrementar la eficiencia energética de la planta. Existen varias formas de llevar a cabo la optimización y pueden variar desde un cambio simple y económico, hasta la elaboración de estudios de ingeniería y modificaciones costosas basadas en análisis detallados de ingeniería.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Cuando las implementaciones de bajo costo, cuyo objetivo es lograr el mejoramiento en los procedimientos de operación y mantenimiento, son cada vez más complejos, la generación de proyectos de inversión contribuye gradualmente al progreso de la conservación de energía. Durante esta etapa se deben detectar y analizar los siguientes aspectos:

- Operación inadecuada de la planta.
- Funcionamiento ineficiente del equipo.
- Grado de sobre-diseño de los equipos.
- Cuellos de botella en el diseño del proceso.
- Mejor aprovechamiento de los recursos energéticos.
- Integración de unidades de intercambio de energía entre corrientes de proceso.
- Recuperación de calor de corrientes de salida.
- Análisis detallado de los materiales combustibles de desechos y de corrientes gaseosas efluentes del proceso, que sean susceptibles de generar energía aprovechable.

Para la generación de ideas sobre conservación de energéticos se tiene que determinar primero, como se genera la energía, que uso que se le está dando y la forma en que se está operando el proceso. Para llevar a cabo esta investigación es necesario contar con datos de operación y pruebas sobre los sistemas.

1. Recopilación de datos de operación.

Este es uno de los aspectos más importantes ya que el conjunto de estos datos, será la base sobre la cual se realizará el análisis energético y proporcionaran información para elaborar los cálculos económicos que determinaran la viabilidad de los diversos proyectos.

Por lo tanto, la información referente a los sistemas intensivos en energía de la planta, deberá ser lo más completa y exacta que sea posible, ya que de eso depende el éxito de los esfuerzos realizados en la conservación de energía.

Es indispensable que la información requerida sobre la operación de la planta, sea perfectamente definida y clasificada por sistemas que tengan un objetivo común en cuanto a su utilización energética. En este sentido, el arreglo de los sistemas debe de

comprender todos los servicios que influyen en el proceso. A continuación se enlistan algunos de ellos:

- Sistemas de vapor.
 - ✓ Calderas.
 - ✓ Producción de vapor de diferentes niveles de presión.
 - ✓ Condensadores de vapor por contacto directo.
 - ✓ Condensador de vapor sin contacto directo (superficie).
 - ✓ Recuperación de condensados.
 - ✓ Equipos auxiliares (deaeradores, precalentadores, economizadores, etc.).
 - ✓ Otros (purgas, etc.).
- Combustibles.
- Calentadores de fuego.
 - ✓ Quemadores.
 - ✓ Otros sistemas.
- Sistemas de agua.
- Sistemas de vacío.
 - ✓ Mecánicos.
 - ✓ Eyectores.
- Proceso.
 - ✓ Bombas y compresores.
 - ✓ Intercambiadores de calor.
 - ✓ Sistemas de separación (alimentación óptima, reflujos óptimos, condensadores y rehervidores intermedios, termocompresores y bombas de calor, etc.).
 - ✓ Sistemas de control.
 - ✓ Equipo anticontaminante.
 - ✓ Otros.

En esta parte del programa se debe determinar exactamente donde se está utilizando la energía, por lo tanto, se tiene que identificar el equipo que consuma cantidades considerables de energía.

Como resultado de la experiencia, generalmente alrededor del 20% de los equipos consumen cerca del 80% del total de la energía que se utiliza en la planta, el análisis

detallado se realiza principalmente en estos equipos (Comisión Petroquímica Mexicana, 1987).

2. Pruebas de los sistemas.

En la recopilación de información, es necesario realizar algunas pruebas específicas sobre determinado sistema durante la operación normal de la planta.

Para esto, se requiere garantizar la obtención de datos correctos y útiles mediante la participación y compromiso del personal (supervisores, gente de operación y mantenimiento) en la planeación y coordinación de las pruebas, ya que ellos van a ser responsables de llevarlas a cabo.

Para asegurar la calidad de los datos, se deben desarrollar las siguientes actividades antes de realizar las pruebas:

- Identificar las áreas intensivas de energía que van a ser analizadas.
- Identificar y calibrar los instrumentos de medición críticos.
- Fijar el periodo de las corridas y la capacidad de operación de la planta.
- Acordar el tiempo requerido entre lecturas y asegurar que los datos sean tomados cuando se haya alcanzado la estabilidad en la operación.
- Diseñar formatos para el registro de datos que interesan durante las corridas, indicando si las lecturas se deben realizar en instrumentos o en campo.

6.1.2.6 *Definición de oportunidades*

Durante esta fase se requiere convertir, en términos de energía, todos los aspectos de operación obtenidos en las pruebas de la planta. Los resultados proporcionaran un completo entendimiento sobre la eficiencia y distribución energética del sistema, generando, de esta manera, oportunidades de ahorro de energía. Los objetivos perseguidos serán los siguientes:

- Efectuar balances de materia y energía alrededor de la unidad, enfocándose en los sistemas intensivos en energía del proceso. Todos los intercambios energéticos deben ser documentados y definidos específicamente, mostrando la cantidad de energía disponible y consumida en cada uno de los equipos involucrados en el sistema.

- **Tabular los usuarios de energía y compararlos con los datos de diseño de la planta o los equipos, para cada sistema. También se deben hacer comparaciones con otros sistemas similares y nuevas tecnologías. Otros ahorros pueden ser identificados, detectando pérdidas durante los cálculos, o bien, evaluando nuevas oportunidades con aproximaciones en los balances, usando valores basados en reajustes propuestos (simulación de procesos).**
- **Preparar una lista preliminar de las oportunidades de conservación de energía que son evidentes hasta ese momento.**

Se pueden ir implementando proyectos de bajo costo o cambios simples en las condiciones de operación mientras el estudio continua progresando, esto ayudará a fomentar el entusiasmo en el personal y asegurará su cooperación continua en el desarrollo del programa.

6.1.2.7 *Evaluación económica y viabilidad de las oportunidades*

En esta fase se deben analizar y discutir los aspectos relacionados con: grado de alcance del estudio en cada uno de los conceptos detectados para la conservación de la energía, en caso de existir diversas alternativas de ahorro, seleccionar la óptima. Considerar el efecto de estos proyectos frente a posibles expansiones o modernizaciones y la toma de decisiones para la asignación de recursos a proyectos de investigación en oportunidades que en ese momento no tienen una rentabilidad adecuada, pero que lo podrán tener en un futuro.

Posteriormente, se debe hacer una evaluación detallada de todas las oportunidades de conservación de energía que han sido identificadas con mayor posibilidad, con el objeto de determinar su viabilidad de tal forma que se muestre el valor potencial de las modificaciones propuestas, explicando los cambios necesarios para la implementación de los proyectos.

En las evaluaciones se deben incluir los siguientes puntos:

- Determinación de los ahorros netos de energía en unidad y en costo sobre una base anual, incluyendo todos los conceptos que intervienen como: combustibles, químicos, agua, potencia eléctrica, etc.
- Estimación del costo de inversión de cada uno de los proyectos y recursos requeridos.
- Cálculo del índice de recuperación de capital: costo del proyecto / ahorro económico anual.
- Análisis de riesgo tecnológico para establecer si se requiere trabajo de instalación adicional.
- Efecto sobre la seguridad, operación y mantenimiento de la planta, así como entrenamiento del personal.
- Consideraciones sobre aspectos de tiempo y paros de producción requeridos para la implantación de los proyectos.
- Integración progresiva y planeada con la configuración del proceso y sus balances energéticos.

Durante esta fase, se identificarán los proyectos potenciales más grandes para la conservación de energía. El establecimiento de estos proyectos deberá presentarse en una forma sistemática, determinando su prioridad en base a criterios económicos, administrativos, riesgos del proceso y limitaciones debidas a producción y/o recursos humanos.

El establecimiento de un formato práctico, es vital para el reporte de los proyectos potenciales de ahorro de energía, ya que de esta manera se procurará unidad al tema, se asegurará la documentación de todos los cambios que se van introduciendo a la planta con su impacto técnico y económico, e ilustrará la filosofía y método de cálculo empleado, los cuales pueden servir de guía para desarrollar nuevos estudios económicos en el futuro.

6.1.2.8 Reporte final

El contenido del formato como reporte final del proyecto consistirá de:

1. Introducción.
2. Balance energético del sistema.
3. Datos básicos de ingeniería.

4. Definiciones de oportunidades de conservación de energía.
- A. Sumario de oportunidades.
- B. Oportunidades de ahorro.
5. Lista de conceptos a implantar.
6. Discusión sobre la realización del estudio.
7. Recomendaciones.
8. Apéndice.

6.2 Descripción del proceso de molienda húmeda del maíz

El maíz es un cereal abundante y relativamente barato, la estructura del tipo americano, que es el utilizado en México, está constituido aproximadamente por almidón (70%), germen (8%), gluten (5%) y fibra (17%). Sus principales usos son como alimento de ganado y materia prima para la transformación en alimentos con un alto valor alimenticio y productos industriales, tales como alcohol etílico mediante la fermentación, harina de maíz por molienda en seco, y almidones refinados por medio del proceso de molienda húmeda. Los volúmenes más grandes de maíz procesado en la industria son los realizados por la molienda húmeda para producir productos de almidón y endulzantes de grado alimenticio. También se fabrican productos no alimenticios como almidones industriales, gluten y harina de maíz.

La planta de procesamiento de maíz de estudio, utiliza la tecnología de molienda húmeda del maíz para elaborar sus productos y servicios, siendo el maíz utilizado el maíz No.2 Grado U.S. A grandes rasgos, el proceso consiste en las siguientes etapas: Recepción y acondicionamiento del maíz, maceración, separación de germen, molienda y separación de fibra, separación de almidón y conversión de jarabes.

Recepción, limpieza y almacenamiento del maíz para proceso. El maíz es recibido en

Figura 11. Recepción de maíz



furgones de ferrocarril. Una vez descargado, el maíz es transportado para su limpieza, pesado y almacenamiento en silos, como se muestra en la **Figura 11**. Fuente: (Corn, 2001). Los principales contaminantes son mazorcas, polvo y basura. Esta fase es crítica, ya que el maíz siempre debe estar disponible para proceso y el almacenamiento debe

estar libre de polvo, ya que puede propiciar atmósferas explosivas.

Maceración o cocimiento. El ablandamiento del grano de maíz con agua, es el primer

Figura 12. Maceración de maíz



Fuente: (Corn, 2001)

paso crítico en la molienda del maíz, consiste en la maceración en agua bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de residencia, concentración de dióxido de azufre SO_2 , contenido de ácido láctico, etc. La temperatura del sistema debe ser aproximadamente de 50 C, y el tiempo de proceso de 30 a 40hrs. Durante la maceración, los granos absorben agua, incrementando su

contenido de humedad de 15% a 45% y aumentan su volumen a más del doble del tamaño original. La adición de 0.1% de SO_2 al agua, previene el excesivo crecimiento bacteriano. A medida que el maíz se hincha y ablanda, la ligera acidez del agua de maceración empieza a romper los enlaces de gluten dentro del grano y a liberar el almidón. En la **Figura 12**, se muestran los tanques donde se lleva a cabo. Después de la maceración, el maíz es bruscamente molido para quebrar el germen y liberar los demás componentes. El agua de maceración es concentrada para recuperar los nutrientes para uso como alimento de ganado y como nutrientes para procesos de fermentación.

Separación del germen. Para separar el germen se utilizan separadores ciclónicos, como

Figura 13. Separadores de germen



Fuente: (Corn, 2001)

se muestran en la **Figura 13**, los cuales separan el germen del resto del material debido a su menor densidad. El germen, contiene cerca del 85% del aceite del maíz, y es bombeado para ser lavado sobre mallas y remover cualquier traza de almidón remanente. Una combinación de procesos mecánicos con solventes extraen el aceite del germen, el cual es refinado y filtrado a producto terminado (estos procesos no se

realizan en la planta), el residuo del germen es utilizado como otro componente alimenticio para animales.

Molienda y separación de fibra. El maíz y agua de maceración que dejan el separador de

Figura 14. Separadores de fibra



Fuente: (Corn, 2001)

germen más depurado, son molidos en un molino de impacto o desgaste para liberar el almidón y gluten de la fibra en el grano. La suspensión del almidón, gluten y fibra fluye sobre un tamiz cóncavo, el cual atrapa la fibra pero permite el paso del almidón y el gluten. La fibra es recolectada y lavada para eliminar cualquier residuo de almidón o proteína, como

se muestra en la **Figura 14**, para finalmente ser secada y comercializarse como alimento para ganado. La suspensión almidón-proteína, llamada "mill starch", es transportada hasta los separadores de almidón.

Separación de almidón. El gluten tiene una densidad menor comparada con el almidón.

Figura 15. Hidrociclones lavadores de almidón



Fuente: (Corn, 2001)

Para separar el gluten del almidón, se hace pasar la suspensión a través de centrifugas, como se muestra en la **Figura 15**, donde el gluten es posteriormente concentrado, desaguado y secado, para ser utilizado como alimento para animales. El almidón, con solo 1% o 2% de proteína remanente, es diluido, lavado de 8 a 14 veces, rediluido y lavado de nuevo en hidrociclones para remover las

últimas trazas de proteína y producir almidón de alta calidad, típicamente más del 99.5% puro. Una parte del almidón es secado y vendido como almidón de maíz no modificado y otra es modificado a almidones especiales, pero la mayor parte es convertido a jarabes y dextrosa.

Conversión de jarabes. El almidón suspendido en agua, es licuado en la presencia de ácido y/o enzimas, las cuales, convierten el almidón a soluciones de baja dextrosa. El tratamiento con otra enzima continúa el proceso de conversión. A lo largo del proceso, el personal puede detener la acción del ácido o enzima en puntos específicos para producir la mezcla adecuada de azúcares como dextrosa y maltosa de acuerdo a las necesidades del cliente. En algunos jarabes, la conversión de almidón a azúcares es detenida en las primeras etapas para producir jarabes de dulzura baja a media. En otros, la conversión se deja llevar a cabo hasta alcanzar toda la dextrosa. El jarabe es refinado en filtros, centrifugas y columnas de intercambio iónico, y el exceso de agua es evaporado, el producto terminado se muestra en la **Figura 16**. Los jarabes se venden directamente cristalizados como dextrosa pura o procesada para crear los jarabes de alta fructosa (HFCS).



Fuente: (Corn, 2001)

6.3 Refinería de jarabes de maíz

Una refinería de glucosa, es un departamento que tiene como función, producir edulcorantes de maíz a partir de la hidrólisis ácida del almidón. Los principales tipos de edulcorantes fabricados normalmente son: jarabes de dextrosa baja, media y alta, además de alta maltosa.

Una refinería de glucosa, produce básicamente los jarabes de maíz en dos etapas. Conversión y refinación. En la primera se lleva a cabo la hidrólisis del almidón y sacarificación, con el objetivo de hidrolizar la molécula de almidón y alcanzar el contenido total de azúcares y perfil de carbohidratos deseado. La refinación por otro lado, consiste en la clarificación, desmineralización y concentración de los licores de maíz (glucosa), donde el objetivo es eliminar todas las impurezas presentes y concentrar los licores de maíz a producto terminado. A continuación se describen brevemente los procesos en que consisten estas etapas.

6.3.1 Descripción del proceso de fabricación de jarabes de maíz

Los pasos que se realizan en la fabricación de jarabes de maíz, son los que se presentan a continuación. Los jarabes que se fabrican son: Glucosa de baja dextrosa (38%DE),

glucosa normal (42%DE), glucosa de alta dextrosa (63% y 70%DE) y jarabes de alta maltosa.

Acondicionamiento de lechada: En esta etapa del proceso la lechada de almidón es recibida, ajustada y alimentada a un convertidor. La lechada proviene del área de lavadores de almidón, a una concentración que varía de 19 a 22 °Be. La lechada se recibe en un tanque agitado, donde se ajustan la densidad y el pH de la suspensión en forma continua, de acuerdo al producto a fabricar. El ajuste de pH se lleva a cabo con HCl de 0.03 a 0.04 N de concentración.

Conversión: La conversión es la etapa en la cual ocurre la hidrólisis del gránulo del almidón para producir polisacáridos. El tipo de hidrólisis que generalmente se lleva a cabo es por vía ácida. La etapa consiste de un grupo de cinco cuerpos de transferencia de calor del tipo coraza y tubos en serie calentados con vapor de media presión, una bobina de retención y un sistema de contrapresión.

En los cinco cuerpos, se lleva a cabo el rompimiento y la hidrólisis del gránulo de almidón debido a la acción simultánea de alta temperatura y presión, proceso catalizado con ácido. La bobina de retención tiene la función de proporcionar más tiempo de retención al hidrolizado y eliminar cualquier residuo de almidón crudo. La válvula de contrapresión, asegura que el sistema se encuentre a presión y así propiciar que el grano de almidón se rompa y libere los azúcares.

Las variables que controlan el grado de hidrólisis son: concentración del almidón, tiempo de residencia, temperatura, conductividad o pH y la contrapresión. Normalmente las condiciones de operación son a 20 °Be, 7-8 minutos de retención, 140 C de temperatura a la salida, 4000-5000 µS y una contrapresión de 4.5 a 5 Kgf/cm².

Flash: Una vez convertido el almidón a polisacáridos, se obtiene un "licor" completamente soluble, a excepción de la proteína y material insoluble. Este licor se encuentra a 140 C, se enfría primeramente por medio de un flash atmosférico, con el fin de evitar al máximo las altas temperaturas las cuales favorecen las reacciones de oscurecimiento (Maillard) que le confieren cierto color a licor (propiedad indeseable) en el producto terminado.

Neutralización: La neutralización se lleva a cabo con sosa cáustica al 50%, y tiene como objetivo ajustar el pH del licor de 4.0 a 4.5, ya que en este intervalo se localiza el punto isoeléctrico de la proteína soluble, lo que permite su floculación y posterior separación.

En el caso de licores de alta maltosa, el pH se ajusta de 5.0 a 5.5, ya que este es el rango óptimo de operación de actividad de la enzima β -amilasa utilizada.

Enfriamiento: Ajustado el pH del licor, su temperatura es de 80 C, y se requiere almacenar el licor en la etapa de sacarificación a una temperatura de 50 C, con el fin de evitar el amarillamiento del licor (reacciones de Maillard). Este objetivo se logra utilizando un intercambiador de placas.

Sacarificación: La sacarificación se lleva a cabo en tanques de acero inoxidable, los cuales tienen las funciones de:

- Permitir la continuidad del proceso en cambios de producto.
- Proporcionar el tiempo de residencia necesario para la sacarificación completa del licor, y así obtener la DE y perfil de carbohidratos requerido.
- Realizar ajustes de DE.

En esta etapa se acondicionan las enzimas de acuerdo al producto a fabricar, y una vez alcanzado el nivel de DE y perfil deseado, se neutraliza primeramente ajustando el pH y posteriormente se nulifica la actividad enzimática residual en la etapa de refinación (temperaturas de aprox. 80 C, variando el tipo de enzima).

Calentamiento de licor: Esta operación, se realiza en un intercambiador de calor de placas calentado con vapor, el cual tiene por objetivo aumentar la temperatura hasta 80 C para disminuir la viscosidad del licor y mejorar sus propiedades de flujo en la etapa de filtración, además de evitar el crecimiento bacteriano debido a bajas temperaturas y neutralizar la acción de la enzima.

Filtración o clarificación: La filtración es el medio utilizado para separar del licor soluble la proteína y material insoluble mayor a 10 micras (clarificación). Los equipos empleados son filtros al vacío del tipo tambor rotatorio, auxiliados con filtro-ayuda.

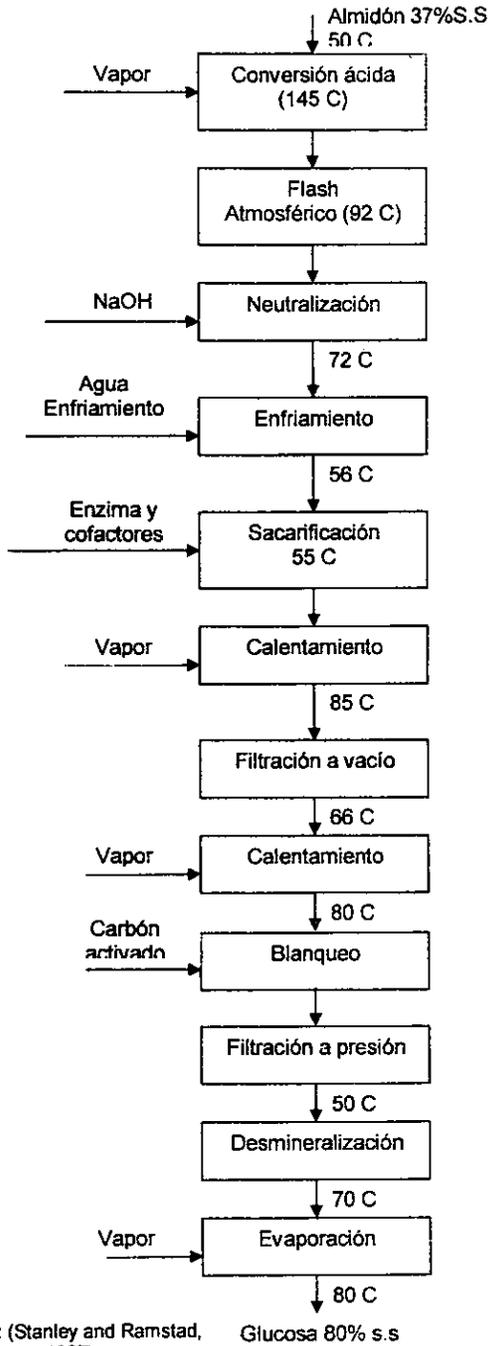
Decoloración: El objetivo de esta etapa, es eliminar todas las impurezas coloridas presentes en el licor con el fin de obtener un licor casi cristalino. Esto se logra utilizando carbón activado, temperatura de 80 C (nuevamente se calienta el licor debido al enfriamiento ocasionado por el vacío en la filtración y pérdidas de calor) y tiempo de retención en el sistema de blanqueo (aprox. media hora). El carbón activado se separa a través de filtros a presión positiva.

Desmineralización: En esta etapa, se purifica el licor de componentes iónicos. El licor es tratado en unidades llamadas catiónica y aniónica. El objetivo del sistema es eliminar la ceniza del licor que consiste de cationes (calcio, sodio, etc.) y aniones (sulfatos, cloruros, etc.). Las impurezas catiónicas se adsorben en una resina de intercambio catión del tipo ácido fuerte (SAC) y las aniónicas en una resina de intercambio de base débil. Adsorbidas las impurezas, éstas son removidas de la resina catiónica con ácido clorhídrico (HCl) y con hidróxido de sodio (NaOH) la resina aniónica, para su posterior lavado y enjuague.

Evaporación: El sistema de evaporación se encarga de concentrar el licor de maíz, por medio de la evaporación del agua contenida en el licor. La concentración final alcanza en promedio el 80% de sólidos. La evaporación se lleva a cabo en sistemas a vacío, con el fin de evaporar el agua a la temperatura más baja posible y así poder evitar la coloración de la glucosa. Esta operación se lleva a cabo en equipos tales como, un evaporador de cuatro efectos de termo-compresión de vapor vertical de película descendente y un evaporador del tipo horizontal (TACHO), donde se lleva a cabo el ajuste final para su posterior almacenamiento, cargado de pipas o envasado.

En la **Figura 17** se muestra el diagrama de bloques, del proceso típico de fabricación de jarabes de maíz en una refinería.

Figura 17. Diagrama de bloques de proceso de una refinería de jarabes de maíz



Fuente: (Stanley and Ramstad, 1987)

6.3.2 Propiedades y aplicaciones de los jarabes de maíz

Las principales propiedades de los jarabes de maíz incluyen la fermentabilidad, viscosidad, humectancia, higroscopicidad, dulzura y propiedades coligativas.

La fermentabilidad del jarabe de maíz depende del proceso y del organismo utilizado, pero en general, la dextrosa, maltosa y maltoriosa son consideradas sustancias fermentables por la levadura en la fabricación de la cerveza y panificación

La viscosidad de los jarabes de maíz es una propiedad funcional importante en muchas aplicaciones alimenticias, que afecta especialmente las propiedades organolépticas y la estabilidad del producto.

La higroscopicidad de los jarabes está relacionada con el nivel de dextrosa y la rapidez de absorción de la mezcla.

La dulzura depende del nivel de los azúcares simples (dextrosa y maltosa), y por lo tanto incrementa con el incremento de la DE. Los jarabes de 63% y 42% DE son 45% y 30% tan dulces como la sacarosa.

Otras propiedades importantes son las reacciones de oscurecimiento vía reacción de Maillard, intensificadores de sabor, depresores del punto de congelamiento y presión osmótica. También propiedades tales como contribuidores de cuerpo, cohesividad, estabilización de espuma y prevención de la cristalización del azúcar.

Los jarabes de maíz son muchas veces usados en combinación con sacarosa, dextrosa o HFCS. Sus aplicaciones están basadas en las propiedades funcionales específicas y el tipo de jarabe utilizado, el cual depende de las propiedades deseadas del producto final.

Los principales usos de los jarabes se encuentran en la industria confitera y prácticamente todos los tipos de productos que van desde los caramelos macizos hasta los malvaviscos para proporcionar viscosidad, dulzura, textura, higroscopicidad y resistencia a la decoloración.

En la industria de las bebidas, los jarabes son usados como una fuente de fermentables en la cerveza y la producción de licor de malta, además se usan para realzar el sabor y proporcionar cuerpo. Los jarabes de alta conversión o maltosa, se utilizan como reemplazo de adjuntos de cereal seco para alcanzar un nivel fermentable que se aproxime al producido durante el proceso de mezclado de la malta con el agua caliente.

En la industria láctea los JM (jarabes de maíz) proporcionan textura, dulzura, suavidad y control de granos, modifica el abatimiento del punto de fusión y funciona como agente de cuerpo. Generalmente los jarabes de conversión ácida de 36% a 42% de DE son utilizados en los helados de crema, sorbetes, paletas de leche y otros.

La principal aplicación de los JM en las reservas, se encuentra como agente inhibidor de la cristalización de la sacarosa, proporciona cuerpo y acentúa el sabor de la fruta, mientras mejora el color y la textura.

Generalmente los jarabes de alta conversión se utilizan en otras aplicaciones alimenticias, como la fabricación de helados y rellenos para mejorar el brillo y apariencia, en los chicles para endulzar y suavizar la base de goma, en productos cárnicos para proporcionar sabor, humectancia, cuerpo y viscosidad, y en las conservas para viscosidad y malvavisco.

La hidrogenación de los JM, es utilizado para producir un endulzante no reductor que puede reemplazar los JM regulares en varias confituras y mermeladas.

En otras aplicaciones no alimenticias, los JM pueden ser utilizados como adhesivos para mejorar la estabilidad, como componente retardador, como control en la evaporación de colonias y perfumes, como un portador y endulzante de jarabes medicinales y como humectante en el tabaco (Stanley and Ramstad, 1987).

6.4 Lineamientos estratégicos para la optimización del uso de energía térmica

Los lineamientos estratégicos para la optimización del uso de energía térmica en una planta de jarabes de maíz, se llevan a cabo tomando como base el programa de ahorro de energía descrito en el primer punto de este capítulo.

En una empresa que procesa productos de maíz, la planta de jarabes de maíz es un departamento que es cliente de la molienda húmeda del maíz.

El gas utilizado en la planta es gas natural proveniente de PEMEX y la energía eléctrica por Comisión Federal de Electricidad (CFE) en su totalidad. El vapor es producido en la planta utilizando calderas de media presión.

El primer paso a realizar para llevar a cabo el análisis de las oportunidades de ahorro, es la recopilación de toda la información técnica posible. Posteriormente, es necesario realizar un diagrama que muestre todos los intercambios de energía, distribución de vapor, recolección y tratamiento de condensados, emisiones a la atmósfera, etc.

A pesar de contar con la información técnica y elaborar el diagrama de flujo de energía, es necesario realizar una inspección primeramente general para detectar las oportunidades de ahorro obvias y la situación de la planta.

En base a un proceso de fabricación de jarabes, se establecen los siguientes lineamientos estratégicos para la optimización del consumo de vapor.

1. Elaboración de un diagrama energético de flujo de energía (un diagrama muy utilizado es el diagrama de Sankey).
2. Establecimiento de un sistema de cuantificación de uso de vapor y registro.

Se deben utilizar medidores de vapor, instalados de tal manera, que se pueda conocer la cantidad de vapor consumido por el departamento.

Adicionalmente en el **Anexo Técnico** de este trabajo, se propone un algoritmo de cálculo de consumo de vapor para crear un programa que calcule el consumo de vapor de proceso por equipo de acuerdo a las condiciones de operación. Este programa puede

auxiliar en el monitoreo del consumo de vapor basándose en los balances de materia y energía sobre el equipo. El programa de cálculo, una vez instalados todos los medidores necesarios se puede validar contra datos reales, y ajustar el programa para convertirlo en una herramienta útil para predecir el consumo de energía térmica del proceso al variar las condiciones de operación.

3. Seleccionar los equipos que más vapor consumen para analizar su comportamiento.

En una refinería de jarabes de maíz, los principales equipos que consumen energía son: convertidor (cocimiento del gránulo de maíz) y evaporación (concentración de licores de aproximadamente de 34% a 80% sólidos base seca).

4. Mejoramiento de operación y mantenimiento de los sistemas detectados.

Básicamente es la eliminación de pérdidas de calor por radiación, convección, fugas y trampas de vapor principalmente.

La operación y funcionamiento eficiente de los equipos, se logra haciendo pruebas (balances de materia y energía) y comparando su comportamiento contra estándares de diseño proporcionados por el fabricante. Además, las pruebas deben ir encaminadas a determinar las variables críticas del proceso, y su optimización, tomando en consideración los aspectos de seguridad, continuidad y mejora de la operación.

El análisis de la optimización de los equipos debe basarse en:

- El arranque y paro de los sistemas.
- La reducción de la carga térmica de las corrientes a procesar.
- La identificación de cuellos de botella.
- Recuperación de calor de corrientes residuales y de salida.

5. Registrar, monitorear y evaluar el consumo energético para determinar cuales son las acciones implementadas que disminuyeron el consumo.

6. Establecer las acciones implementadas exitosas como estándares de operación eficiente.

7. Comparar estándares de operación obtenidos de la planta contra plantas similares, para retroalimentar la información e identificar nuevas áreas de oportunidad.

Estos lineamientos estratégicos permitirán el desarrollar un sistema de mejora continua desde el punto de vista energético. Además, se podrán establecer las bases para estudios de ingeniería mas detallados, que permitan posteriormente el análisis básico de modificaciones tecnológicas.

CAPITULO VII. CONCLUSIONES

- Las pérdidas de calor se deben básicamente a la falta de aislamiento y presencia de fugas. Cuando se aíslan los sistemas que transportan fluidos de calentamiento (vapor), se puede recuperar hasta el 85% del calor que se perdería si el sistema no estuviera aislado. Las fugas pueden llegar a presentar ahorros desde 50 Ton/año hasta 1,500 Ton/año de vapor. Las trampas de vapor algunas veces representan hasta el 10% del combustible utilizado en la caldera, y las pérdidas por flash de corrientes calientes a presión pueden ser desde el 2% hasta el 18% de las corrientes.

Todos estos factores en conjunto, llegan a presentar anualmente grandes consumos de energía, y por lo tanto oportunidades de ahorro, además de lograr beneficios en la disminución de la carga térmica y en seguridad.

- Desde el punto de vista de aprovechamiento energético, se recomienda reducir las temperaturas de operación al mínimo posible, e igualmente disminuir al mínimo la cantidad de agua presente en todo momento. Otras prácticas recomendadas son el mejorar las eficiencias de rendimiento y etapas de separación. Así como, el aprovechamiento de reacciones exotérmicas y otros fenómenos fisicoquímicos, y el reuso térmico de corrientes secundarias.
- El sistema de caldera, es un equipo crítico que consume una gran cantidad de combustible, y que transforma la energía química del mismo a un medio muy ventajoso como el vapor de agua. Las oportunidades de ahorro en un equipo ya instalado, deben dirigirse a operar a la más alta eficiencia posible. Esto se logra optimizando el por ciento de exceso del aire de combustión, aislando todas las superficies calientes (mayores a 60 C), recuperando la mayor cantidad de energía posible de los gases de combustión, minimizando la purga de la caldera, utilizando eficientes tratamiento químicos para evitar incrustaciones, depositaciones y corrosión del equipo, además de controlar y estandarizar la operación del sistema.

Estas medidas, no solo aumentaran la eficiencia de la caldera, sino además mejorara la calidad del vapor y la seguridad del personal y el sistema.

- Los estudios energéticos integrales, representan oportunidades de mejorar la eficiencia global de la planta, al disminuir o eliminar el requerimiento de energía. La ventaja de este tipo de sistemas radica en la autosuficiencia de generación de energía, y en obtener la mayor eficiencia energética; sin embargo sus desventajas son el alto costo de inversión, la complejidad del sistema y su operación, y la disminución de carga eléctrica para las empresas generadores de energía (C.F.E.).
- Los lineamientos estratégicos, son recomendaciones hechas para la optimización del ahorro de energía en una planta de jarabes de maíz, estos son el resultado de un programa de administración de energía propuesto, el cual está fundamentado en un modelo de mejora continua.

Este trabajo, metodológicamente, propone soluciones a un problema actual y complejo en la industria, utilizando una herramienta administrativa para establecer un sistema continuo de mejora, y la experiencia práctica disponible, para llevarla a cabo.

Finalmente, este trabajo representa una aportación adicional, para ser utilizado como una guía inicial de un estudio formal de ingeniería que permita obtener desde ahorros significativos de energía hasta determinar el cambio tecnológico.

CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

Ambríz García, Juan José y Paredes Rubio, Hernando Romero (1993). *Administración y ahorro de energía*. México. UAM Ixtapalapa.

Billet, Reinhard (1989). *Evaporation Technology*. Germany. VCH.

Esquerra, Pisà Pere (1988). *Dispositivos y sistemas para el ahorro de energía*. España, Marcombo.

Lyle, Oliver (1963). *The efficient use of steam*. England, London Her Majesty's Stationery Office.

Nalco Chemical Company (1988). *The NALCO Water Handbook*. Estados Unidos. McGraw-Hill Book Company. 2da. Edición.

Sandler, Henry J. And Luckiewicz, Eduard T. (1987). *Practical Process Engineering*. Estados Unidos. McGraw-Hill.

Stanley, A. Watson and Ramstad, Paul E. (1987). *Corn Chemistry and Technology*. Estados Unidos. American Association of Cereal Chemists, Inc.

REVISTAS

Fanaritis, J. P. and Streich, H.J. (1973). *Heat recovery in process plants*. Chemical Engineering. New York.

Monroe, E. S. (1976). *Select the right steam trap*. Chemical Engineering. New York.

Smith, R. D. and Scollon, R. B. (1976). *Balancing Boilers Against Plant Loads*. Chemical Engineering. New York.

Sendelbach, G. Michael (1988). *Boiler-Water Treatment Why, What and How*. Chemical Engineering. New York.

Wilcox, J. C (1978). *Improving Boiler Efficiency*. Chemical Engineering. New York.

PUBLICACIONES

Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía (2001). *Cogeneración*. México.

Comisión Nacional Para el Ahorro de Energía (1987). *Metodología para el desarrollo de diagnósticos energéticos en sistemas de generación y distribución de vapor*. México.

Comisión Petroquímica Mexicana (1987). *Metodologías sobre administración de tecnología*. México.

NORMA Oficial Mexicana. *NOM-002-ENER-1995, Eficiencia térmica de calderas paquete. Especificaciones y métodos de prueba*. México.

PAGINAS DE INTERNET

[http:// www.abma.com](http://www.abma.com) (American Boilers Manufacturers Association).

[http:// www.asme.org](http://www.asme.org) (American Society of Mechanical Engineers).

[http:// www.boilerroom.com](http://www.boilerroom.com)

[http:// www.cip.uk.centre.com](http://www.cip.uk.centre.com) (Cleaning in Place and Process Optimization for the Food Industry).

[http:// www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx) (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía).

[http:// www.com.org](http://www.com.org) (Corn Refiner Association).

[http:// www.oit.doe.gov](http://www.oit.doe.gov) (Office of Industrial Technologies).

[http:// www.naima.org](http://www.naima.org) (North American Insulation Manufacturers Association).

[http:// www.nationalboard.org](http://www.nationalboard.org) (Nacional Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors).