

39  
26



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
" ZARAGOZA "**

**" TECNICAS Y ESTRATEGIAS PARA EL  
AHORRO DE ENERGIA EN REFINERIAS "**

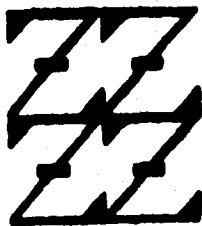
**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A**

**JESUS ZUÑIGA HERRERA**



Lo humano  
eje  
de nuestra reflexión

**MEXICO, D. F.**

**OCTUBRE 1996**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

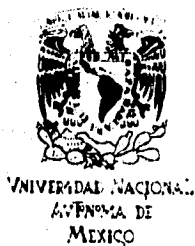


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA DE  
INGENIERIA QUIMICA**

**OF/IQ/JU/082/015/96**

**C. JESUS ZUÑIGA HERRERA  
P R E S E N T E .**

**En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, les comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:**

**PRESIDENTE:   ING. SALVADOR GALLEGOS RAMALES**  
**VOCAL:           ING. JOSE AGUSTIN TEXTA MENA**  
**SECRETARIO:   ING. CELESTINO MONTIEL MALDONADO**  
**SUPLENTE:       ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS**  
**SUPLENTE:       ING. ANGEL GOMEZ GONZALEZ**

**A T E N T A M E N T E**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
**México, D.F., 27 de mayo de 1996**



**ING. JOSÉ BENJAMIN RANGEL GRANADOS**  
**JEFE DE LA CARRERA**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE  
ESTUDIOS SUPERIORES \*ZARAGOZA\*  
P R E S E N T E.

Distinguido señor Director:

Con respecto a la Tesis Profesional preparada por el alumno:

Jesús Zúñiga Herrera

denominada: "Técnicas y Estrategias Para el Ahorro de Energía en  
Refinerías"

me permito comunicarle que después de haberla revisado, he  
decidido otorgarle mi VOTO DE ACEPTACION, en vista de que  
reune los requisitos establecidos por la Legislación  
Universitaria.

Del mismo modo, me doy por enterado de haber sido incluido  
en el jurado del examen profesional que sustentará el  
mencionado alumno.

Aprovecho la ocasión para reiterarle a usted las seguridades  
de mi atenta y distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D .F., 20 de Septiembre de 19 96  
ING. SALVADOR CALLEGOS RAMALES

PRESIDENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE  
ESTUDIOS SUPERIORES \*ZARAGOZA\*  
P R E S E N T E.

Distinguido señor Director:

Con respecto a la Tesis Profesional preparada por el alumno:

Jesús Zúñiga Herrera

denominada: "Técnicas y Estrategias Para el Ahorro de Energía en  
Refinerías"

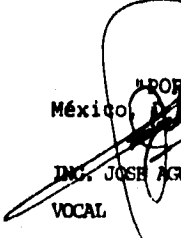
me permito comunicarle que después de haberla revisado, he  
decidido otorgarle mi VOTO DE ACEPTACION, en vista de que  
reune los requisitos establecidos por la Legislación  
Universitaria.

Del mismo modo, me doy por enterado de haber sido incluido  
en el jurado del examen profesional que sustentará el  
mencionado alumno.

Aprovecho la ocasión para reiterarle a usted las seguridades  
de mi atenta y distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F., 20 de Septiembre de 1966

  
ING. JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA  
VOCAL



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE  
ESTUDIOS SUPERIORES \*ZARAGOZA\*  
P R E S E N T E.

Distinguido señor Director:

Con respecto a la Tesis Profesional preparada por el alumno:

JESUS ZUNIGA HERRERA

denominada: "TECNICAS Y ESTRATEGIAS PARA EL AHORRO DE ENERGIA  
EN REFINERIAS"

me permito comunicarle que después de haberla revisado, he  
decidido otorgarle mi VOTO DE ACEPTACION, en vista de que  
reune los requisitos establecidos por la Legislación  
Universitaria.

Del mismo modo, me doy por enterado de haber sido incluido  
en el jurado del examen profesional que sustentará el  
mencionado alumno.

Aprovecho la ocasión para reiterarle a usted las seguridades  
de mi atenta y distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D .F., 20 de Septiembre de 1996  
ING. CELESTINO MONTIEL MALDONADO  
SECRETARIO



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE  
ESTUDIOS SUPERIORES \*ZARAGOZA\*  
P R E S E N T E.

Distinguido señor Director:

Con respecto a la Tesis Profesional preparada por el alumno:

Jesús Zúñiga Herrera

denominada: "Técnicas y Estrategias para el Ahorro de Energía  
en Refinerías"

me permito comunicarle que después de haberla revisado, he  
decidido otorgarle mi VOTO DE ACEPTACION, en vista de que  
reune los requisitos establecidos por la Legislación  
Universitaria.

Del mismo modo, me doy por enterado de haber sido incluido  
en el jurado del examen profesional que sustentará el  
mencionado alumno.

Aprovecho la ocasión para reiterarle a usted las seguridades  
de mi atenta y distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F., 9 de Julio de 1996  
ING. JOSE BENIGNO JUAN GRANADOS  
SUPLENTE



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
\*ZARAGOZA\*

DIRECTOR DE LA FACULTAD DE  
ESTUDIOS SUPERIORES \*ZARAGOZA\*  
P R E S E N T E.

Distinguido señor Director:

Con respecto a la Tesis Profesional preparada por el alumno:

Jesús Zúñiga Herrera

denominada: "Técnicas y Estrategias Para el Ahorro de Energía en  
Refinerías"

me permito comunicarle que después de haberla revisado, he  
decidido otorgarle mi VOTO DE ACEPTACION, en vista de que  
reune los requisitos establecidos por la Legislación  
Universitaria.

Del mismo modo, me doy por enterado de haber sido incluido  
en el jurado del examen profesional que sustentará el  
mencionado alumno.

Aprovecho la ocasión para reiterarle a usted las seguridades  
de mi atenta y distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F., 20 de Septiembre de 1996

Ing. ANGEL GOMEZ GONZALEZ  
SUPLENTE



**A mis padres por sus  
esfuerzos y gran cariño.**

**Al honorable jurado.**

**A mis maestros y amigos.**

## **RESÚMEN**

En el presente trabajo se describen, muestran y analizan técnicas y estrategias desde un punto de vista práctico con el propósito de incrementar la eficiencia en el uso de la energía en una refinería de petróleo. Se comienza en los capítulos I y II por dar una introducción y los objetivos del presente trabajo.

En el capítulo III se habla de la auditoría energética como el primer paso en un programa de conservación y ahorro de energía con el propósito de identificar el consumo total de energía, los usuarios de esta y la eficiencia en su uso.

En el capítulo IV, se habla de estrategias para hacer un uso eficiente del vapor tales como: evitar pérdidas de vapor en tuberías, uso de controles de temperatura, empleo de trampas de vapor y uso del condensado generado.

En el capítulo V, se trata el método del punto de pliegue como una técnica de diseño para optimizar el uso de la energía para generar diseños de redes de intercambio térmico con una recuperación máxima de calor y para mejorar la recuperación de calor en redes de intercambio existentes.

En el capítulo VI, se habla del empleo de turbinas con objeto de recuperar la energía disponible en corrientes a alta presión.

En el capítulo VII, se describen de estrategias de ahorro de energía en calentadores a fuego directo tales como: precalentamiento del aire de combustión, adición de tubos en la sección de convección y mejoramiento de la combustión.

En los capítulos VIII y IX, se habla de la selección de bombas y compresores de acuerdo al servicio requerido para asegurar un uso eficiente de la energía requerida para su funcionamiento.

En el Capítulo X, se habla de las estrategias para el ahorro de energía en una caldera tales como: la instalación de precalentadores de aire, el precalentamiento del agua de alimentación, la reducción de depósitos e incrustaciones, entre otros.

En el capítulo XI se habla de la bomba de calor como un sistema de destilación energéticamente más eficiente que la destilación convencional.

En el capítulo IX se proporcionan las conclusiones y como punto final se enuncia la bibliografía consultada.

## Í N D I C E

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>                                       | <b>2</b>  |
| <b>CAPÍTULO II. OBJETIVOS</b>   | <b>6</b>  |
| <b>CAPÍTULO III. AUDITORÍAS ENERGÉTICAS EN REFINERÍAS DE PETRÓLEO</b> | <b>9</b>  |
| III.1 Tipos de Auditorías.  | 11        |
| III.1.1 Auditoría de Primer Grado.                                    | 11        |
| III.1.2 Auditoría de Segundo Grado                                    | 13        |
| III.1.3 Auditoría de Tercer Grado                                     | 15        |
| III.2 Herramientas para la Realización de la Auditoría.               | 17        |
| III.3 Selección del Equipo de Medición.                               | 19        |
| III.4 Módulos de Información.   | 20        |
| III.5 La Administración en el Ahorro de la Energía                    | 22        |
| <b>CAPÍTULO IV. MANEJO DEL VAPOR.</b>                                 | <b>37</b> |
| IV.1 Generalidades.   | 37        |
| IV.1.1 Uso Eficiente  | 37        |
| IV.1.2 Reducción del Consumo de Vapor.                                | 37        |
| IV.1.3 Balance de Vapor.  | 38        |
| IV.1.4 Vapor de Baja Presión.   | 39        |
| IV.1.5 Fugas de Vapor.  | 39        |

|  |    |
|--|----|
| IV.1.6 Venteo de Vapor.  | 40 |
| IV.2 Pérdidas de Vapor en Líneas de Transmisión y Aislamiento en Líneas          | 40 |
| IV.2.1 Aspectos Importantes en el Manejo del Vapor.                              | 41 |
| IV.2.2 Materiales.   | 42 |
| IV.2.3 Temperatura de Operación.   | 43 |
| IV.2.4 Costo Instalado.  | 43 |
| IV.2.5 La Selección Final.   | 45 |
| IV.3 Instalación de TIC Para el Control del Flujo de Vapor.                      | 47 |
| IV.4 Selección, Pérdidas de Vapor y Monitoreo de Trampas de Vapor.               | 47 |
| IV.4.1 Selección del Tipo de Trampa.   | 51 |
| IV.4.2 Monitoreo de Trampas de Vapor.  | 52 |
| IV.5 Fugas en el Sistema de Retorno de Condensados y Recuperación del Condensado | 55 |
| IV.5.1 Recuperación del Condensado Caliente                                      | 56 |
| IV.5.2 Uso del Vapor de Fiasheo.   | 57 |
| IV.5.3 Problemas de Recirculación de Condensado.                                 | 58 |
| IV.5.4 Operación de Los Intercambiadores de Calor                                | 58 |
| IV.5.5 Bombas de Recuperación de Condensado.                                     | 60 |
| IV.5.5.1 Sistema de Bombeo de Condensado   | 60 |
| IV.5.5.2 Funcionamiento de la Bomba Operada a Presión.                           | 62 |
| IV.5.6 Contaminación del condensado.   | 63 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE EN EL DISEÑO Y REMODELACIÓN DE REDES DE INTERCAMBIO TÉRMICO.</b> | <b>77</b>  |
| V.1 Formación de las Curvas Compuestas (T vs H).   | 77         |
| V.2 Procedimiento Para Definir los Consumos Energéticos Objetivo.  | 79         |
| V.3 El Significado del Punto de Pliegue.   | 80         |
| V.4 Representación de la Red de Intercambio.   | 81         |
| V.5 Balance entre Costo de Capital y Energía.  | 84         |
| V.6 Establecimiento de Objetivos Para Determinar el Número Mínimo de Unidades.   | 84         |
| V.7 Equilibrando Unidades y energía.   | 85         |
| V.8 El Papel de la Diferencia Mínima de Temperaturas.  | 87         |
| V.9 Casos en los que no se Requiere ya sea Servicio Auxiliar de Calentamiento ó Servicio Auxiliar de enfriamiento.         | 87         |
| V.10 División de Corrientes.   | 88         |
| V.11 Rearreglo de Redes de Intercambio Térmico.  | 89         |
| V.12 Aspectos Adicionales en la Aplicación del Método del Punto de Pliegue.  | 92         |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO VI. AHORRO DE ENERGÍA EN TURBOEXPANSORES</b>   | <b>114</b> |
| VI.1 Aplicación de una Turbina de Gas.   | 114        |
| VI.1.2 Sistema de Recuperación de Energía  | 115        |
| VI.2 Recuperación de Potencia con Turbinas Hidráulicas.  | 116        |
| VI.3 Aplicación de una Turbina Hidráulica  | 116        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO VII. AHORRO DE ENERGÍA EN CALENTADORES A FUEGO DIRECTO</b> | <b>120</b> |
| VII.1 Pre calentamiento de Aire.                                       | <b>122</b> |
| VII.2 Instrumentación y controles Requeridos.                          | <b>122</b> |
| VII.2.1 Variables de las Corrientes de Proceso.                        | <b>122</b> |
| VII.2.2 Variables Para la Combustión.                                  | <b>123</b> |
| VII.3 Optimización del Proceso de la Combustión.                       | <b>127</b> |
| VII.4 Adición de Tubos en la Sección de Convección.                    | <b>128</b> |
| VII.5 Limpieza de la Sección de Convección                             | <b>128</b> |
| VII.6 Programa de Mantenimiento Preventivo del Equipo.                 | <b>128</b> |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO VIII. AHORRO DE ENERGÍA EN MOTORES Y BOMBAS.</b>           | <b>135</b> |
| VIII.1 Clasificación.  | <b>135</b> |
| VIII.2 Selección.  | <b>135</b> |
| VIII.3 Mejoramiento en Instalaciones de Bombas Existentes.             | <b>136</b> |
| VIII.4 Selección del Impulsor Correcto.                                | <b>137</b> |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO IX. AHORRO DE ENERGÍA EN COMPRESORES</b>                   | <b>143</b> |
| IX.1 Clasificación.  | <b>143</b> |
| IX.2 Selección de Compresores.   | <b>143</b> |
| IX.3 Aspectos Importantes para el Ahorro de Energía en Compresores.    | <b>144</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO X. AHORRO DE ENERGÍA EN CALDERAS</b>                          | <b>147</b> |
| X.1 Reducción del Exceso de Aire.   | 147        |
| X.2 Instalación de un Economizador.                                       | 148        |
| X.3 Reducción de Incrustaciones y Depósitos.                              | 148        |
| X.4 Reducción de la Purga.  | 149        |
| X.5 Recuperación del Calor de Desecho de la Purga.                        | 150        |
| X.6 Reducción de la Presión de Operación de la Caldera.                   | 150        |
| X.7 Pre calentamiento del aire de combustión.                             | 151        |
| <b>CAPÍTULO XI. AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE BOMBAS DE CALOR.</b> | <b>158</b> |
| XI.1 Esquemas   | 158        |
| <b>CAPÍTULO XII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>                      | <b>165</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.</b>  | <b>169</b> |

**CAPÍTULO I.  
INTRODUCCIÓN.**



## **I. INTRODUCCIÓN.**

Las refineries de petróleo no son solamente abastecedoras de energía sino también grandes consumidoras de ella, empleando aproximadamente el 5% del crudo procesado, como combustible de refinería.

Además, dependiendo del tipo y complejidad de la refinería, la relación del costo de combustible al costo total de refinación alcanza alrededor del 50%, lo que indica claramente porque la conservación de energía en una refinería es crucial para la industria de refinación del petróleo.

Por otro lado, en la planeación de un país en desarrollo, se requiere tomar en cuenta los factores que lleven a utilizar eficientemente los recursos con que cuenta. Así, la energía es un recurso que hay que emplear de manera óptima, pues si se cuenta con ella esto representa un renglón importante en sus transacciones internacionales. En contraposición si se carece de este recurso, se encuentra con dificultades para apoyar su crecimiento, pues es necesario destinar divisas para adquirir energía, generalmente en forma de hidrocarburos.

En este sentido, si hacemos referencia a los hidrocarburos, actualmente una fuente importante de energía, se puede señalar como una solución o alivio a una crisis energética, el diversificar las fuentes de energía. Muchas de las fuentes alternas en desarrollo no están al alcance de todas las naciones, por eso para un país en desarrollo como México, la conservación y ahorro de energía puede considerarse como la mejor fuente alterna ya que una inversión de capital en este concepto ayuda a hacer un uso más eficiente de los recursos energéticos disponibles coadyuvando a disminuir la contaminación en todas sus formas y a la preservación de un recurso no renovable.

De unos años a la fecha, a venido tomando fuerza la idea de ser más eficiente en el uso de la energía, o lo que es lo mismo, de incrementar la productividad energética, entendida esta como el uso de la mínima cantidad de energía para lograr un producto o servicio.

Esto es particularmente importante ya que bajo las condiciones actuales, la industria de refinación no puede fácilmente incrementar los precios de venta de los productos. Es por esta razón que, inmediatamente después de la crisis del petróleo en 1973, la industria de refinación del petróleo comenzó a dedicar

esfuerzos serios en aplicar todo tipo de medidas de conservación de energía, principalmente en los países desarrollados.

En la etapa inicial, las medidas y métodos empleados en las refinerías han sido principalmente de naturaleza temporal o de emergencia, es decir mejoras en la operación, mantenimiento que no requería mucha inversión. Sin embargo, en el diseño de las refinerías nuevas o en la reconversión de las que están en operación surge la necesidad de adoptar medidas que involucren técnicas y estrategias que ayuden al ahorro de energía.

Adicionalmente, los escalamientos de costo en el precio del crudo y servicios auxiliares, demanda que se implementen programas de ahorro de energía para reducir de manera efectiva, al grado de práctico, el consumo de energía, lo que hace necesario implementar programas de conservación de energía en los que se apliquen técnicas y estrategias para reducir en forma efectiva, a grado práctico, el consumo de energía en refinerías nuevas y existentes. Lo que significa hacer el uso más eficiente posible de la energía, que es una parte integral para una operación segura, lucrativa y eficiente de una refinería.

Ya que en todo sistema que utiliza energía se aprovecha una parte de ella; la magnitud del aprovechamiento depende tanto del proceso utilizado, como del diseño térmico del sistema.

Por otro lado las refinerías se han diseñado por largo tiempo con costos de capital bajos, frecuentemente a expensas de costos de operación altos, pero si se desea efectuar un ahorro de energía, los costos de operación, y por ende los costos de energía, se deben minimizar.

Como se sabe, es en la etapa de diseño de una planta de proceso en donde se establece de una manera fundamental la eficiencia energética del sistema.

En esta etapa es donde se emplean técnicas y/o estrategias para optimizar la utilización de la energía al determinarse principalmente los sistemas de recuperación y ahorro de energía a ser usados.

Este proceso de optimización, no solo implica la aplicación de los parámetros económicos prevalecientes en el momento del diseño, sino la previsión y proyección de dichos parámetros a futuro.

**En plantas en operación es obvio que cualquier inversión que se efectúe para reducir el consumo de energéticos deberá ser justificable económicamente.**

**Sin embargo si se emplean técnicas y/o estrategias de ahorro de energía en la ejecución del diseño o remodelación de la refinería, se pueden reducir substancialmente los costos de operación.**

**Como primer paso del programa de ahorro de energía para una planta existente se debe considerar a la auditoría energética, en la que se identifiquen el consumo total, los usuarios primarios, y la eficiencia en la utilización de la energía, así como las áreas críticas de desperdicio de energía, formando una base para proponer posteriormente soluciones, las cuales consistirían en la implementación de técnicas y estrategias para minimizar el consumo de energía, las cuales deberán ser evaluadas tanto técnica como económicamente.**

**En el presente trabajo se describirán, mostrarán y analizarán técnicas y estrategias de ahorro de energía con objeto de incrementar la eficiencia en el uso de la energía en una refinería, aumentando así su confiabilidad operacional.**

**CAPÍTULO II.  
OBJETIVOS.**

## **II. OBJETIVOS**

**El presente trabajo tiene como objetivo el describir, mostrar y analizar técnicas y estrategias de ahorro de energía desde un punto de vista práctico, con objeto de incrementar la eficiencia y confiabilidad operacional de una refinera .**

**Con el propósito de cumplir el objetivo descrito se llevarán a cabo las siguientes actividades:**

**Investigar en la bibliografía acerca de técnicas y estrategias de ahorro de energía en refineries.**

**Describir y mostrar las técnicas y estrategias encontradas para el ahorro de energía en refineries desde un punto de vista del incremento de eficiencia y confiabilidad operacional de una refinaria de petróleo.**

**CAPÍTULO III.**  
**AUDITORÍAS ENERGÉTICAS EN REFINERÍAS DE PETRÓLEO.**

### **III. AUDITORÍAS ENERGÉTICAS EN REFINERÍAS DE PETRÓLEO.**

La auditoría energética es el estudio cuantitativo o cualitativo de los flujos de energía, aplicando técnicas específicas con objeto de determinar e identificar áreas potenciales para ahorrar energía. La auditoría puede ser de toda una refinería, por planta o equipos individuales.

La auditoría energética debe considerarse como el primer paso en un programa de conservación y ahorro de energía, cuyo propósito es identificar el consumo total de energía, los usuarios primarios, y la eficiencia en su utilización. La auditoría ayudará a enfocar la atención en las áreas críticas y a formar una base para interpretar los resultados, se pueden tener registros del consumo de energía para indicar de manera rápida la cantidad de energía procesada o recuperada.

La auditoría energética debe establecer todos los detalles del flujo de la energía: cantidad, transformaciones, costos, el donde y el como se usa para definir las oportunidades de ahorro.

Dentro de los principales objetivos de una auditoría están los siguientes:

- Establecer metas para la conservación y ahorro de energía.
- Desarrollar y fijar normas específicas.
- Identificar y analizar ahorros oportunos.
- Colaborar en la formación de un banco de datos.
- Desarrollar indicadores energéticos.

De esta forma, un especialista en ahorro de energía o auditor de energía tendrá como función principal organizar los recursos humanos y materiales para determinar los potenciales de ahorro de energía, evaluar las medidas de ahorro energético a poner en marcha, detectar las necesidades para actualizar y depurar los recursos y técnicas requeridas en una auditoría.



**Algunas de las principales actividades de un auditor energético son:**

- Actualizar planos que contengan la información del proceso, equipos y dispositivos a auditar, para su control.**
- Elaborar formatos para el registro de datos.**
- Discriminar áreas de acción.**
- Fijar las referencias o condiciones iniciales en el equipo por auditar.**
- Supervisar las normas de medición (como la calibración), el tipo y uso adecuado de instrumentos, así como el lugar adecuado y las condiciones de la medición.**
- Organizar los levantamientos de datos.**
- Coordinarse con los programas de mantenimiento.**
- Analizar e integrar los reportes de rutina.**
- Definir y estandarizar procedimientos para efectuar balances de materia y energía.**
- Determinar eficiencias y determinar potenciales de ahorro.**
- Implementar un expediente de memorias de cálculo, procedimiento de las auditorías y experiencias.**

**Para poder orientar la auditoría energética, es necesario determinar las características peculiares de la organización de la empresa en base a los bienes y servicios asociados a la producción, de acuerdo al tipo de empresa de que se trate.**

**Uno de los primeros puntos para iniciar una auditoría energética es responder a la pregunta: ¿Cuál es el flujo de energía en la planta?; la respuesta permitirá identificar las principales rutas de la energía, con sus respectivas transformaciones, fuentes y destinos.**

### **III.1 Tipos de Auditoría.**

En forma general se pueden manejar tres tipos o grados de auditorías aplicables a cualquier tipo de empresa, y son: -Auditoría histórica o de primer grado, auditoría técnica o de segundo grado y auditoría de seguimiento o de tercer grado.

A medida que cada nivel se completa, se hace obvio el proceder o no al siguiente nivel. En muchos casos, los mayores beneficios se pueden llevar a cabo al término de los dos primeros niveles.

Las técnicas, la rapidez, el nivel de precisión y el costo de la auditoría estarán en función de la complejidad, el tamaño de las instalaciones y los recursos involucrados.

#### **III.1.1 Auditoría de Primer Grado.**

El primer nivel de auditoría que se debe efectuar es el de primer grado, que tiene como objetivo identificar históricamente la eficiencia del uso de la energía en una planta o proceso. Un indicador de la eficiencia en el uso de la energía es la cantidad de energía consumida por unidad de producción; en el caso de una instalación de procesamiento de gas este podría ser la cantidad de gas combustible usado por volumen de gas de carga.

El indicador de la eficiencia del uso de la energía forma una base para seguir los esfuerzos de ahorro energético. Además, puede ayudar a enfocar la atención en áreas en donde el ahorro energético pueda proporcionar beneficios económicos importantes.

Adicionalmente, en esta auditoría se efectúa la inspección visual del estado de ahorro energético de las instalaciones y el análisis de los registros de operación y mantenimiento que rutinariamente se hacen en cada instalación. Con este tipo de auditoría se pretende identificar situaciones obvias de derroche energético y recomendar medidas de ahorro a través del mantenimiento oportuno de las instalaciones.

Al realizar las auditorías de primer grado se deben anotar los detalles que se detectan a simple vista y que se consideran como desperdicios de energía, tales como fugas de vapor, falta de aislamiento, mala combustión en calderas y calentadores, equipos que operen ineficientemente, etc.

En esta auditoría no se busca efectuar un análisis exhaustivo del uso de la energía sino detectar posibilidades de ahorro, de aplicación inmediata y de nula o baja inversión. Asimismo, se determinan fallas que requieran de estudios complementarios e inversiones medias o altas como sucede con equipo en mal estado, tecnología obsoleta, falta de sistemas de control, recirculaciones abiertas, posibilidades de integración de procesos, dispositivos para aprovechar calor de desperdicio y otras. En estos casos la información recabada sirve como punto de partida para la jerarquización de las medidas de conservación y ahorro de energía y el desarrollo de estudios específicos; cada oportunidad de ahorro debe registrarse debidamente para ser evaluada en términos técnicos y económicos.

El potencial de ahorro en un programa de ahorro de energía a corto plazo, puede proporcionar beneficios tan importantes como los programas de ahorro de energía que requieren inversiones mayores.

Las auditorías de primer grado son las de menor costo y para tener buenos resultados al aplicarlas se debe contar con la participación de los responsables de cada área de trabajo y con la del grupo específico de conservación y ahorro de energía de la instalación.

Es conveniente establecer la periodicidad con que se efectuarán las auditorías con el fin de supervisar los avances de las medidas de ahorro y continuar la búsqueda sistemática de nuevas oportunidades de ahorro energético de energía.

En algunas industrias del sector privado este primer grado de auditoría suele denominarse como auditoría de facturación o preliminar porque se basa en la recopilación de los datos sobre consumo directo de los usuarios de energía y de todas las secciones de la planta, estableciendo un sistema de contabilidad donde se indiquen claramente los costos y consumos así como la cantidad de los bienes y servicios producidos, considerando en aquellos puntos en donde no se cuenta con lecturas directas, las facturas de electricidad o de combustible consumidos o las condiciones de diseño que por medio de un cálculo analítico permite estimar algún consumo o producción, como primera aproximación

### **III.1.2 Auditoría de Segundo Grado.**

Esta auditoría es un análisis detallado de un proceso dividido en subsistemas. El objetivo de esta auditoría es identificar las oportunidades de ahorro de energía y los incentivos para las modificaciones o cambios. En la mayoría de los casos será necesario efectuar un balance de materia y energía para el sistema que se examina. La información requerida para llevar a cabo este nivel de auditoría incluirá datos de operación y especificaciones detalladas de las etapas que consumen energía dentro del sistema o proceso. Mucha de la información requerida, como temperaturas, presiones y flujos, se puede obtener de los diagramas y hojas de proceso. No todas las etapas serán fáciles de analizar; sin embargo, a través de estimaciones apropiadas se pueden determinar los usuarios mayores y su eficiencia.

Una vez que las etapas consumidoras de energía se han identificado, se pueden empezar a aplicar técnicas o estrategias que minimicen el consumo de energía. Un análisis económico mostrará si las medidas de ahorro energético son justificables o no.

Además, en esta auditoría también se incluye información sobre el consumo de energía por cada actividad así como del equipo que utiliza la empresa en la transformación de las materias primas; estos datos se emplearán en la elaboración de balances de materia y energía que deben incluir la evaluación de la eficiencia con que se usa la energía en las áreas y equipos que hacen uso intensivo de ella, como son las unidades de proceso y servicios auxiliares. También debe incluirse un análisis detallado de los registros históricos de las condiciones de operación de los equipos, incluyendo información sobre volúmenes manejados o procesados y consumos de energía por unidad de producto. Esta información se compara tanto con la obtenida directamente en campo, mediante la adecuada instrumentación para efectuar la medición y control, como con los valores de diseño con objeto de determinar variaciones en la eficiencia, tomando en cuenta las capacidades de operación correspondientes.

La cuantificación de las variaciones entre las condiciones de operación actuales y las de diseño permiten jerarquizar el orden en que se analizará cada equipo o proceso; posteriormente se determina el flujo de energía, servicio o producto que se pierde por el equipo en cuestión. Con este valor se calculan las dimensiones o modificaciones del equipo para la recuperación de energía y se

estima su costo en forma preliminar, esto significa que en las auditorías de segundo grado se incluyen evaluaciones de carácter técnico-económico.

La información de campo necesaria para realizar estas evaluaciones se recopilan mediante instrumentos de medición de tipo portátil, fijo o semifijo. En algunos casos no es conveniente instalar equipos de medición permanentes para un estudio, específico por ello es que se ha extendido el empleo de sistemas de medición portátiles y la medición de variables que, en forma indirecta, permitan determinar la energía potencialmente recuperable.

Entre la gama de opciones que ofrece el mercado, los equipos básicos de tipo portátil que generalmente se consideran para llevar a cabo una auditoría de segundo grado son los siguientes:

- Medidor de la velocidad de flujo en tuberías y equipo.
- Vacuómetro y manómetro de tiro.
- Analizador de gases de combustión.
- Radiómetros ópticos.
- Pirómetro digital.
- Wattímetro.
- Factorímetro de potencia.
- Estetoscopio.
- Detector de fugas tipo ultrasonido.

Para cada uno de los equipos enlistados existe una amplia gama de modelos que varía en su rango de aplicación, condiciones límite de operación y costo de adquisición y mantenimiento. La selección depende de las características de la instalación, las condiciones de proceso en que se requiera efectuar la medición, los recursos disponibles y las necesidades particulares de cada centro de trabajo.

Estas auditorías se efectúan con el auxilio de un grupo de expertos en diseño y operación de procesos industriales e instrumentación y medición, principalmente.

Adicionalmente este tipo de auditoría debe incluir dentro de la información recabada los siguientes datos:

- Programa operativo (mensual o anual).
- Tipo de energía usada.
- Volumenes procesados.
- Consumo de energía por unidad de producto.
- Consumo mensual en las unidades estándar.
- Porcentaje de utilización con respecto a la cantidad programada.

Una vez determinados los potenciales de ahorro energético y ahorro, es entonces cuando con criterios de evaluación y factibilidad técnico-económica se deberán considerar otros parámetros incluidos los reglamentos locales y de seguridad, así como de los impactos sociales, ecológicos etc.

### **III.1.3 Auditoría de Tercer Grado.**

Este tipo de auditoría requiere un estudio más profundo de las condiciones de operación y una base de datos más precisa, por lo que no se pueden admitir estimaciones por falta de instrumentación.

Se deben minimizar los errores de medición para obtener datos confiables previendo, en la medida de lo posible, todos aquellos factores que estén involucrados en la operación del proceso o equipo en estudio que no representen el estado permanente o más probable.

Esta auditoria debe efectuarse mediante el uso de equipo especializado de medición y con la participación de especialistas de cada área específica, auxiliados por personal de ingeniería de proceso.

En estas auditorias es común el uso de técnicas de simulación de procesos, con el fin de analizar diferentes esquemas de interrelación de equipos y procesos y por la facilidad que presentan para evaluar los efectos de cambios de condiciones de operación en el consumo específico de energía. Aquí, el análisis es más exhaustivo, por lo cual se requiere de información completa de flujos de materiales, servicios, combustibles y energía eléctrica, además de temperaturas, presiones y propiedades de las diferentes corrientes.

Las recomendaciones derivadas de los resultados que arroja una auditoria de tercer grado, generalmente son de aplicación a mediano y largo plazo y podrían ser: modificaciones a equipos, implementación de sistemas cogenerativos, sustitución de catalizadores, cambio de solventes, modificaciones en el régimen de intercambio de calor, modificaciones en el sistema de control, reemplazo de unidades ineficientes, integración energética con centros vecinos.

Las medidas derivadas de los resultados de estas auditorias requieren un equipo de trabajo integrado con especialistas de diferentes campos: el tipo de realización es largo y, en términos generales, son las más costosas. Además, debido a que las inversiones involucradas van de medianas a altas, la evaluación económica debe ser rigurosa aún con estas características, los beneficios equilibran a los costos en periodos cortos.

Por lo anterior, con objeto de establecer la periodicidad con que deben aplicarse las auditorias de tercer grado, se recomienda tomar como indicador el aumento de la relación entre los costos de energía y de capital.

Los tres niveles de auditoria energética forman una progresión natural: los resultados de cada uno de ellos proporcionarán un mejor panorama del consumo de energía.

### **III.2 Herramientas Para la Realización de la Auditoría.**

Se clasifican en tres grupos:

**A)- Información.**

**B)- Identificación de los vectores de energía.**

**C)- Instrumentación.**

**A)- Información.**

Se considera que un sistema de información, que permite generar datos oportunos y confiables, incluye cuando menos los siguientes rubros:

1. Balance de materia y energía de diseño actualizado para cada planta o proceso (estos datos pueden ser proporcionados por simuladores si no se cuenta con los datos originales).
2. Especificaciones técnicas de los principales equipos consumidores o generadores de energía.
3. Datos actualizados sobre tecnologías similares que tengan mejor aprovechamiento de la energía con objeto de hacer comparaciones.
4. Información de las experiencias en ahorro de energía en otros centros de trabajo.
5. Condiciones reales de operación del equipo (informes de balances de energía).
6. Clasificación de los principales puntos de desperdicio.
7. Inventario del equipo, instrumentos y sus condiciones de uso.
8. Relación de parámetros de consumo y de referencia.



9. Relación de posibles ahorros, sus plazos y argumentos.
10. Relación de sistemas y su monitoreo.
11. Relación de actividades desarrolladas para conservación y ahorro de energía en el propio centro de trabajo.
12. Relación de estudios realizados y por realizar.
13. Relación de costos en sus distintos niveles de evaluación.

La obtención de datos provenientes de operación de plantas, tiene un especial interés para la realización de balances de materia y energía en cada una de las etapas importantes en el consumo de energía

#### **B) Identificación de los Vectores de Energía.**

Un vector de energía es la forma de energía a utilizar para un propósito específico, ver Fig. III.1. Y tiene como función en el sistema energético, identificar la distribución de la energía desde el momento en que se produce hasta los destinos y tiempos en que se emplea. La importancia que se atribuye a un vector energético de ser transportado y almacenado, se refleja en su poder calorífico, también llamado "densidad energética", ver cuadro III.1.

#### **C) Instrumentación.**

Un sistema indicador de los consumos de energía es esencial para el control y evaluación de cualquier programa de conservación y ahorro de energía. por lo que la selección apropiada del equipo de medición es tan importante como el mismo programa y dicho equipo debe usarse con estricto apego a sus indicaciones, porque de lo contrario puede repercutir en el funcionamiento normal del proceso.

Por ejemplo: las caídas de presión ocasionadas por los ajustes de flujos con propósitos de medición pueden convertirse en pérdidas de energía que deberán tomarse en cuenta.

Como principio general, todos los combustibles y otros medios que contengan energía y sean usados en una planta, deben identificarse mediante un diagrama de flujo. Los diversos equipos o unidades de proceso pueden representarse en un diagrama de redes de energía. Las cantidades de energía medibles directamente deben calcularse a partir de mediciones de presión, voltaje, temperatura, flujo, composición de gases u otras propiedades físicas específicas.

Existen tres etapas importantes para determinar la selección del equipo de medición:

- 1.-Dibujar el diagrama de energía, identificando donde será necesario evaluar los consumos de energía.
- 2.-Determinar que propiedades físicas pueden medirse.
- 3.-En base a las dos etapas anteriores, seleccionar el equipo apropiado para medir estas propiedades.

Las variables relativas a la instrumentación, pueden clasificarse de la siguiente manera:

### **III.3 Selección del Equipo de Medición.**

A continuación se dan algunas sugerencias útiles en el proceso de selección del sistema de medición para efectuar una auditoría energética:

- Decidir el uso de los resultados y evaluaciones del flujo de energía; la manera de como será la acción a seguir dependiendo del resultado de estos análisis.
- Determinar que mediciones físicas pueden hacerse más fácilmente para el cálculo de los consumos de energía que se requieran.
- Seleccionar tentativamente los tipos generales de dispositivos primarios de medición que pueden ser usados.
- Obtener, de los fabricantes o sus representantes locales, recomendaciones específicas sobre los instrumentos de control que se necesitan, así como el equipo de medición específico requerido.

- Obtener información de proveedores donde se muestre con detalle los costos, manejo, operación, tamaño de los equipos, así como su precisión y el adiestramiento necesario para su correcta y eficiente aplicación.

La selección final incluye aspectos adicionales por considerar, tales como:

- Resistencia de los dispositivos de medición y control a los cambios de temperatura, corrosión o abrasión de líquidos o materiales en contacto con ellos.
- Facilidad de instalación y retiro de los instrumentos, considerando la posible suspensión temporal del proceso.
- Exactitud del instrumento comparado con otras alternativas.
- Energía requerida para su operación.
- Disponibilidad de refacciones.
- La posibilidad de usar equipo de medición ya instalado en la planta o equipo portátil para dos o más aplicaciones.

#### **III.4 Módulos de información.**

La información que se genera de los diferentes tipos de auditorías energéticas se pueden condensar en cuadros de la siguiente manera.

El Cuadro III.2 muestra un resumen de los diferentes usos o utilizaciones de la energía cuantificados en kilocalorías, por área de consumo y/o fases de un proceso particular.

En la columna 1 se anotan los consumos reales observados para cada área o sistema de la planta.

En la columna 2 se anotan las especificaciones técnicas, referentes al consumo de diseño de los equipos.

En la columna 3 se señalan las variaciones observadas entre la columna 1 y 2.

En seguida (columna 4), se indica la meta de ahorro fijada en función del ahorro potencial previsto por el administrador energético. Esto será de acuerdo al periodo de tiempo seleccionado.

En la columna 5 se anotan las variaciones entre los costos (\$) de los requerimientos reales de energía y los de diseño. Aquí se indica el monto del ahorro potencial cuantificado económicamente.

En los Cuadros III.3 y III.4 se contabilizan los consumos de energía real y de diseño, cuya diferencia representa el margen que establecerá la meta de ahorro energético. Al igual que el cuadro anterior, los diferentes usos de energía son clasificados por áreas o fases del proceso.

Las fuentes a contabilizar pueden ser variadas, lo importante es considerar tanto el consumo real, como el de diseño y su diferencia, en un periodo de tiempo dado.

En la última columna y con la ayuda de una tabla de equivalencias se anotan los totales de consumo energético, cuantificados en kilocalorías, para el periodo de tiempo seleccionado.

El Cuadro III.5 destaca las eventuales pérdidas en que se pueden incurrir a raíz de un uso ineficiente de la energía, en las diferentes áreas en las que la energía se consume.

De esta manera se registran las áreas de hornos, calderas, etc., y se les asignan las eventuales pérdidas, señalándolas en sus columnas.

La constatación de la pérdida se hace a través del consumo real y teórico de la energía, calculado por los técnicos de campo. Se marca una "X" en el cuadro correspondiente a la pérdida, en el área correspondiente.

Este examen puede realizarse en diferentes periodos de tiempo, dando así la posibilidad de un estudio dinámico de éstos.

### **III.5 La Administración en el Ahorro de Energía.**

La gestión de un proyecto de ahorro y uso racional de la energía puede implicar una gran sencillez o una gran complejidad dependiendo del tamaño y característica de la empresa en cuestión, pero siempre estará enfocada a la capacidad de manejar recursos humanos, técnicos y financieros hacia objetivos concretos de conservación y ahorro de energía, mediante acciones que se encaminen a planear, organizar, integrar y controlar los diferentes recursos energéticos que se emplean dentro de los procesos y unidades que conforman una estructura productiva.

Siempre ha sido importante que las empresas, de la naturaleza que sean, realicen esfuerzos para utilizar la energía en forma racional y conservadora; sin embargo, esta actividad cobra una importancia relevante en México. Esto se debe a que después de una prolongada crisis de varios años, durante los cuales la economía se mantuvo estancada y por consecuencia el incremento en consumo energético así como las inversiones para mantener la oferta de energía al ritmo de la demanda también se estancaron, se presenta ahora una etapa de crecimiento gradual cuyas necesidades energéticas no podrán ser satisfechas a menos que se haga un esfuerzo real, intenso y nacional para evitar desperdicios de energía.

Por otro lado, el costo de la energía será cada vez menos marginal dentro de la estructura de costos de producción de las empresas al actualizarse las tarifas y a valores reales, congruentes con la política de modernización del país y la eliminación gradual de subsidios. La apertura comercial al exterior, único modo de sanear la economía, nos obliga a ser más competitivos, a aumentar la productividad y, como consecuencia, a reducir los costos con objeto de tener márgenes de rentabilidad atractivos.

Lo anterior significa que los proyectos orientados al ahorro de energía se multiplicarán en nuestro país en el corto y mediano plazo. Los proyectos de ahorro de energía estarán presentes, conviviendo con proyectos tradicionales de expansión, implantación, reconversión, construcción, reestructuración, etc., y, como cualquier proyecto, deberán administrarse empleando las cuatro funciones básicas:

**PLANEACIÓN:** Establecimiento de objetivos

**ORGANIZACIÓN:** Coordinación de los medios para alcanzar los objetivos.

**DIRECCIÓN:** Manejo y motivación de actividades humanas.

**CONTROL:** Comparación de los resultados con los objetivos.

Estas cuatro funciones tan obvias tan lógicas y a veces tan olvidadas bien aplicadas serán una herramienta imprescindible para llevar a buen término cualquier política de ahorro y uso racional de energía.

### **PLANEACIÓN**

Es la primera fase del proceso, donde se hace el análisis detallado y profundo de la situación real de la empresa en cuanto al uso de la energía, y donde se identifican las unidades susceptibles de ahorro; de esta manera se está en posibilidad de establecer objetivos de reducción y ahorro energético, así como de elaborar planes de acción para alcanzarlos.

Un objetivo de ahorro de energía debe ser una meta bien acotada (en forma cuantitativa, no cualitativa), estableciendo la cantidad de energía que se espera ahorrar y el tiempo necesario para lograrlo.

Es importante no confundir el cumplimiento de un objetivo de ahorro de energía con el sacrificio de la producción o la incomodidad del usuario. Esto desvirtuaría el principio. Se trata de crecer y vivir mejor, pero con un uso eficiente de la energía.

**Para establecer los objetivos estos deberán tener las siguientes características:**

**Difícil.** - Debe ser un reto e implicar un gran interés para su logro.

**Alcanzable.** - No debe producir frustración. La meta debe ser difícil pero conseguible.

**Coherente.** - Los objetivos deben complementarse entre sí, nunca interferirse.

**Aceptado.** - Debe estar plenamente aceptado por las personas que trabajan en ellos.

**Propio.** - No debe estar basado en estadísticas o experiencias de otros. Cada caso es particular.

Para poder determinar las acciones que deberán ponerse en práctica para alcanzar los objetivos deberán tomarse las siguientes consideraciones:

- a) Condición actual basada en la estadística.
- b) Tendencia a condición probable.
- c) Condición deseada en un determinado periodo de tiempo.
- d) Alternativas intermedias o de reserva para alcanzar el objetivo en diferentes escenarios de tiempo, dependiendo del grado de dificultad o costo.

Los objetivos deben establecerse de arriba hacia abajo, es decir habrá que establecer objetivos secundarios que permitan alcanzar el objetivo final o principal, siguiendo una estructura piramidal.

Para cada nivel de la pirámide de objetivos es conveniente establecer los siguientes datos.

- 1) OBJETIVO PERSEGUIDO.
- 2) ACCIONES O ETAPAS PARA SU ALCANCE.
- 3) FECHA INICIAL Y FINAL DE CADA ACCIÓN.
- 4) COSTO PREVISTO Y REAL DE CADA ACCIÓN.
- 5) RESULTADOS (AHORRO EN \$ O UNIDADES).
- 6) RESUMEN FINAL DEL OBJETIVO.

### **ORGANIZACIÓN.**

En la actualidad, en toda empresa, independientemente del tamaño de la misma, debería existir un responsable o coordinador energético. Las funciones de dicho administrador serán en términos generales las siguientes:

- Concentrar la información de costos de energía y estadísticas de consumos.
- Seleccionar las áreas de oportunidad de ahorro de energía.
- Evaluar los objetivos de ahorro potenciales.
- Fijar los objetivos.
- Dirigir el proceso de análisis de estrategias.
- Dirigir y controlar los programas de acción.
- Coordinar las actividades de los diferentes especialistas que participan en dichos programas.
- Evaluar los proyectos y técnicas de ahorro.
- Estar actualizado de nuevas tecnologías de ahorro energético.
- Establecer y controlar las necesidades de capacitación en temas de energía.
- Planear y establecer lineamientos de acción dentro de su área de trabajo.



- Organizar y coordinar adecuadamente los recursos humanos hacia la conservación de los objetivos del programa de ahorro de energía.
- Administrar los recursos propios y promover los que hagan falta.
- Dirigir estudios desde el punto de vista energético.
- Supervisar los análisis técnico-económicos de las medidas de ahorro.
- Promover la capacitación y concientización del recurso humano para apoyar el programa de ahorro de energía.
- Coordinar las actividades de su área y mantener enlaces con las demás áreas de la empresa, con el fin de propiciar la acción integrada del programa en toda su institución.
- Mantener un reporte actualizado de las adquisiciones, existencias y consumos de energéticos.
- Revisar periódicamente la utilización, tendencias y resultados del uso de los energéticos, para asesorar al administrador general.
- Recolectar y organizar los datos y registros departamentales del uso de la energía y asegurarse que los registros y sistemas contables sean uniformes y en unidades homogéneas.
- Coordinar los esfuerzos de todos los usuarios de energía para metas elevadas pero realistas.
- Brindar asesoría técnica sobre equipos, técnicas y estrategias para el ahorro de energía o para identificar fuentes de ayuda técnica adecuadas.
- Localizar e identificar los principales desperdicios de energía, cuantificando las pérdidas en términos financieros y hacer recomendaciones prácticas para reducirlas.
- Despertar el interés de la conservación de energía y mantenerlo vivo con nuevas ideas y actividades.

- Preparar e impartir cursos de entrenamiento, así como dar pláticas cortas, de naturaleza práctica, sobre diversos tópicos técnicos.
- Identificar áreas de actividad que requieran estudios más detallados y concentrar esfuerzos en éstas; asimismo, conservar un registro de estos estudios y verificar periódicamente los avances respectivos.
- Suministrar o elaborar un manual de prácticas recomendables en el uso de la energía.
- Asegurarse de que al hacer mejoras o implementar sugerencias de cualquier fuente, no se ponga en peligro la salud de las personas y la seguridad del lugar en donde se labora.
- Llevar una historia detallada de las acciones que se realicen para mejorar el uso de la energía con el fin de acumular experiencias.
- Mantener contacto con otros grupos de trabajo e intercambiar ideas sobre técnicas de reducción de costos en procesos similares.
- Vincularse con organizaciones de investigación, fabricantes de equipo y asociaciones profesionales con el fin de estar informado de todos los desarrollos importantes en el campo del ahorro de energía.
- Actualizarse sobre los desarrollos nacionales y mundiales relativos a la energía, para asesorar a la administración general.

Es evidente, de acuerdo a sus funciones, que la forma en que un administrador de energía puede actuar más eficientemente depende estrechamente de la calidad y cantidad de la información que utilice; su base de datos será el apoyo principal de sus decisiones.

Por otro lado, el tamaño de la empresa o el impacto de los costos de energía sobre el costo de producción u operación es lo que determina la complejidad de la organización dedicada dentro de la empresa a la actividad de ahorro o uso racional de la energía.

Una refinería requerirá probablemente una dirección energética con sus departamentos y grupos de trabajo, formando una rama adicional dentro de la estructura independiente de las demás direcciones.

Su interrelación con las demás áreas de la refinería implica el conocimiento profundo de las mismas, su problemática, sus necesidades de energía, sus posibilidades de ahorro, sus costumbres operativas, sus objetivos de producción y ventas, etc., por lo que es recomendable que los grupos de trabajo en la nueva dirección energética estén formados por miembros de los departamentos tradicionales de la refinería, con actividades multidisciplinarias orientadas hacia el objetivo de ahorro de energía.

## **DIRECCIÓN.**

Una vez establecidos los objetivos y definida la estructura organizativa adecuada para obtenerlos, se requerirá una buena dirección para conseguir que estos recursos humanos actúen de la forma más armónica y eficaz posible.

Estos criterios de dirección, que parecen del más elemental sentido común pero que siempre es conveniente reflexionar sobre ellos, se aplicarán en forma específica para un proyecto de ahorro de energía así:

a) **SELECCIÓN ADECUADA.** Una buena selección de los integrantes del grupo de trabajo con individuos bien relacionados en aspectos energéticos y con voluntad de colaborar en los planes de ahorro y uso eficiente de energía; este será un punto definitivo para lograr los resultados esperados.

d) **BUENA COMUNICACIÓN.** Debe asegurarse que existe una buena comprensión del tema energético, convencimiento de las ventajas de los planes de acción, estrategias y objetivos.

La comunicación debe ser fluida en todos los niveles y en ambos sentidos, motivando el intercambio de ideas, experiencias, problemas y soluciones.

c) **EQUIPO DE TRABAJO.** Se deben coordinar adecuadamente las diferentes personalidades, actitudes y capacidades de los individuos, de forma que los grupos de trabajo sean productivos. El apoyo e interés por parte de la dirección será primordial para su buen funcionamiento.

d) **ESTÍMULOS E INCENTIVOS.** La dirección será responsable de la sensibilización y formación de los integrantes de los grupos de trabajo. Los objetivos deberán ser fácilmente alcanzables al principio, ya que los éxitos son el

mejor motivador para continuar persiguiendo y consiguiendo objetivos más difíciles.

Una buena dirección encontrará el factor motivador para cada individuo de acuerdo con su personalidad o sensibilidad. En algunos casos este factor será de tipo económico, pero en otros podrá ser de reconocimiento, de reto de conciencia, etc.

En general, debe crearse la conciencia y el interés en el tema energético, no solo como un beneficio económico para la empresa sino como una necesidad más amplia y benéfica para la comunidad y el país.

e) **CONTINUIDAD.** Como cualquier plan a largo plazo, ocurrirá que con el transcurrir del tiempo decaiga el interés o se convierta en rutina cualquier actividad de ahorro de energía, perdiendo su valor y fuerza inicial. Una buena dirección deberá evitar que esto suceda.

La dificultad lógica que se presentará en un proyecto de ahorro de energía, dentro de una empresa, es que constituye una actividad adicional a las actividades normales de la misma, requiriendo una atención y dedicación que justifiquen su razón de existir, tales como incrementar la producción, mejorar la calidad, aumentar las ventas, reducir los costos de producción, etc. La actividad de ahorro de energía aunque implica una reducción de los costos de producción, podría quedar fácilmente en un plano secundario.

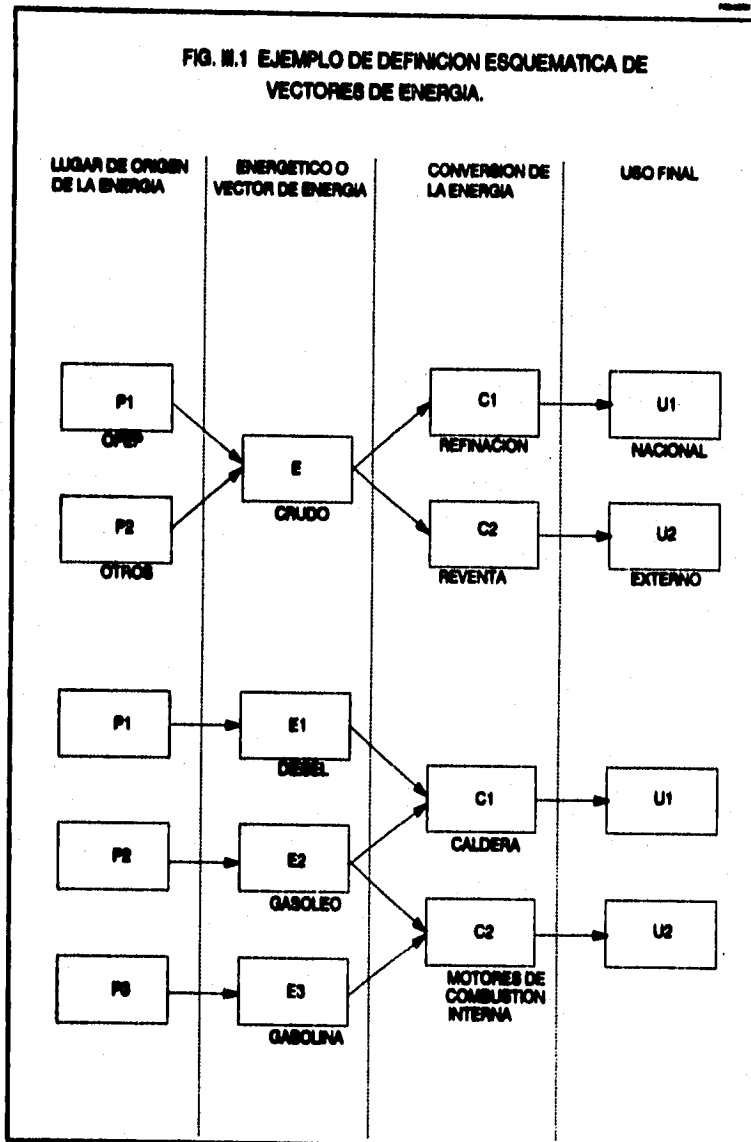
#### **CONTROL.**

La función de control es la que cierra el ciclo administrativo, y consiste en comparar los resultados obtenidos con los objetivos propuestos en la fase de planeación, aplicando los correctivos necesarios en caso de desviaciones.

**CUADRO III.1  
PODERES CALORIFICOS DE VARIOS COMBUSTIBLES**

| <b>ENERGETICO</b>            | <b>DENSIDAD ENERGETICA</b> |
|------------------------------|----------------------------|
| <b>COMBUSTIBLES LIQUIDOS</b> | <b>MM BTU/BARRIL</b>       |
| <b>PETROLEO</b>              | <b>5.7</b>                 |
| <b>GASOLINA</b>              | <b>5.2</b>                 |
| <b>FUEL OIL RESIDUO</b>      | <b>4.2</b>                 |
| <b>FUEL OIL DESTILADO</b>    | <b>5.7</b>                 |
| <b>KEROSINA</b>              | <b>5.6</b>                 |
| <b>GAS NATURAL LIQUIDO</b>   | <b>4.1</b>                 |
| <b>ALCOHOL ETILICO</b>       | <b>4.1</b>                 |
| <b>ALCOHOL METILICO</b>      | <b>3.2</b>                 |
| <b>HIDROGENO LIQUIDO</b>     | <b>2.4</b>                 |
| <b>COMBUSTIBLES GASEOSOS</b> | <b>BTU/PIES</b>            |
| <b>GAS NATURAL LICUADO</b>   | <b>3.6</b>                 |
| <b>GAS NATURAL HUMEDO</b>    | <b>1.1</b>                 |
| <b>GAS NATURAL SECO</b>      | <b>1.08</b>                |
| <b>GAS DE SINTESIS</b>       | <b>1-100</b>               |
| <b>HIDROGENO</b>             | <b>275</b>                 |
| <b>METANO</b>                | <b>913</b>                 |

FIG. III.1 EJEMPLO DE DEFINICION ESQUEMATICA DE VECTORES DE ENERGIA.



**CUADRO III.2  
CONSUMOS ENERGETICOS POR PERIODO.**

| AREAS O SISTEMAS DE PROCESO     | CONSUMO ENERGETICO REAL (1)<br>Kilocaloras | REQUERIMIENTO ENERGETICO DISEÑO (2)<br>Kilocaloras | VARIACION ENTRE EL DISEÑO Y EL REAL (3+2-1)<br>Kilocaloras | META DE AHORRO ENERGETICO POR PERIODO<br>Kilocaloras | VARIACION ENTRE EL COSTO DE DISEÑO Y EL REAL (5+1-2)<br>(6) |
|---------------------------------|--|--|--|--|---|
| SISTEMA DE CALENTAMIENTO        |  |  |  |  |   |
| SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO |  |  |  |  |   |
| SISTEMA DE VAPOR Y CONDENSADO   |  |  |  |  |   |
| SISTEMA DE ILUMINACION          |  |  |  |  |   |
| EQUIPO DE INTER-CAMBIO TERMICO  |  |  |  |  |   |
| BOMBAS                          |  |  |  |  |   |
| COMPRESORES                     |  |  |  |  |   |
|                                 |  |  |  |  |   |

**CUADRO III.3  
CONSUMO DE ENERGIA POR PERIODO**

| FUENTE<br>PERIODO | ELECTRICIDAD |      |     | GAS NATURAL |      |     | VAPOR DE BAJA |      |     | VAPOR DE ALTA |      |     | OTROS |      |     | TOTAL<br>Kwh |      |     |
|-------------------|--------------|------|-----|-------------|------|-----|---------------|------|-----|---------------|------|-----|-------|------|-----|--------------|------|-----|
|                   | DIS          | REAL | DIF | DIS         | REAL | DIF | DIS           | REAL | DIF | DIS           | REAL | DIF | DIS   | REAL | DIF | DIS          | REAL | DIF |
|                   | ENERO        |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |              |      |     |
| FEBRERO           |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |              |      |     |
| MARZO             |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |              |      |     |

1 DIS=DISPENSADO  
2 DIF=DIFERENCIA



**CUADRO III.4  
CONSUMO DE ENERGIA POR AREA DE PROCESO**

| FUENTE<br>AREAS O<br>SERVICIOS | ELECTRICIDAD |      |     | GAS NATURAL |      |     | VAPOR DE BAJA |      |     | VAPOR DE ALTA |      |     | OTROS |      |     | TOTAL<br>HECTOCALORIAS |      |     |
|--------------------------------|--------------|------|-----|-------------|------|-----|---------------|------|-----|---------------|------|-----|-------|------|-----|------------------------|------|-----|
|                                | DIS          | REAL | DIF | DIS         | REAL | DIF | DIS           | REAL | DIF | DIS           | REAL | DIF | DIS   | REAL | DIF | DIS                    | REAL | DIF |
| ILUMINACION                    |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| VENTILACION                    |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| HORNOS                         |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| CALDERAS                       |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| COMPRESORES                    |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| INTERCAMBIADORES               |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| SOLOARES                       |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| TURBINAS                       |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| BOMBAS                         |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |
| TUBERIAS                       |              |      |     |             |      |     |               |      |     |               |      |     |       |      |     |                        |      |     |

DIS=DEBERO

DIF=DIFERENCIA

NOTA: ESTE ES UN EJEMPLO DE ALGUNAS AREAS DE CONSUMO.

CUADRO III.5

IDENTIFICACION DE AHORROS POTENCIALES DE ENERGIA POR EQUIPOS DE PROCESO

| TIPO DE<br>AREAS O<br>EQUIPOS | PERDIDAS DE<br>COMBUSTIBLE | PERDIDAS DE<br>VAPOR | PERDIDAS DE<br>REFRESCADO | AISLAMIENTO<br>INADECUADO | EQUIPOS QUE<br>NO OPERAN<br>EFICIENTE-<br>MENTE | EQUIPOS QUE<br>OPERAN<br>INNECESARIA-<br>MENTE |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|--|
| BOMBAS                        |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| HORNOS                        | X                          |                      |                           |                           |   |  |
| CALDERAS                      | X                          |                      |                           |                           |   |  |
| COMPRESORES                   |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| TRAMPAS DE VAPOR              |                            |                      |                           |                           |   |  |
| TANQUES Y<br>RECIPIENTES      |                            |                      |                           |                           |   |  |
| TORNES                        |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| TUBERIAS                      |                            | X                    | X                         | X                         |   |  |
| INTERCAMBIADORES              |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| BOQUINAS                      |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| TURBINAS                      |                            |                      |                           |                           |   | X  |
| RESERVADORES                  |                            |                      |                           |                           | X   |  |
| CONDENSADORES                 |                            |                      |                           |                           | X   |  |

VER TABLA DE EQUIVALENCIAS ENERGETICAS  
EN CASO DE QUE EXISTAN PERDIDAS MARCAR CON X LA CELLA CORRESPONDIENTE

**CAPÍTULO IV.  
MANEJO DEL VAPOR (USO EFICIENTE).**

#### **IV. MANEJO DEL VAPOR (USO EFICIENTE).**

##### **IV.1 Generalidades.**

El manejo del vapor es una parte vital de las operaciones de una refinería de petróleo.

Su manejo requiere conocimiento de la localización, método y cantidad de energía en forma de vapor que se produce y consume. Existe una tendencia en la industria de mirar con más importancia a la producción eficiente del vapor que al consumo eficiente de la energía involucrada en el vapor. Se gana poco generando vapor más eficientemente si su energía no se usa eficazmente, y en el clima actual de escasez de energía e incremento de costos en los combustibles, la producción y uso eficientes de la energía es significativamente más importante que hace algunos años.

##### **IV.1.1 Uso Eficiente del Vapor.**

El uso eficiente del vapor involucra la producción y utilización del vapor de la manera más económica posible para satisfacer las presiones y temperaturas de las operaciones de proceso en las que se requiera. Esto conserva energía, reduce gastos por combustible manteniendo así el control del costo de los productos que se generan.

##### **IV.1.2 Reducción del Consumo de Vapor.**

En la mayoría de las plantas, la eficiencia en el consumo de vapor, definida como la relación entre la energía usada en el vapor suministrado y la energía en el vapor de salida, es mucho menor que la eficiencia de producción del vapor, esto ocurre ya que se pierde una cantidad considerable de energía a la atmósfera o porque se descarta vapor a causa de que pierde su nivel de utilidad.

El vapor se puede generar a niveles superiores de presión y temperatura de los que realmente se requieren. Por lo tanto, es posible emplear tanto la energía mecánica como la calórica presentes en él. La energía mecánica se utiliza para manejar turbinas para bombas y compresores. El vapor se descarga de turbinas

de abatimiento para satisfacer las demandas de temperatura inferiores de las operaciones de proceso.

Muchas operaciones de proceso permiten que el vapor de proceso condense. Con lo que es posible extraer el calor latente del vapor y, en muchos casos, gran parte de su calor sensible. En otras palabras, la diferencia en el contenido de calor del vapor sobrecalentado de alta presión y el condensado de baja presión, se usa en las operaciones de proceso. La recuperación de condensado para reuso en calderas de refinarias puede ser de hasta 40%

#### **IV.1.3 Balance de vapor.**

Los objetivos primarios de un balance detallado de vapor es proveer información concerniente a la producción y consumo de vapor dentro de la planta, información con la cual se pueden identificar las áreas en dónde sea necesario aplicar mejoras en conservación de energía.

El desarrollo del balance de vapor requiere reunir información considerable con respecto a las presiones y temperaturas, así como de los flujos de vapor y condensado tanto en el área de consumo como en la de producción.

Probablemente el área de mayor incertidumbre de los datos recopilados es en la medición del flujo, particularmente para el vapor.

Así, algunas sugerencias con respecto a la determinación del flujo son:

- \*Los medidores de flujo son necesarios, específicamente en las áreas que producen o consumen grandes cantidades de vapor.

- \*Frecuentemente, los flujos se pueden establecer indirectamente de los balances de calor en intercambiadores de calor y economizadores.

- \*Cortar el suministro de vapor a piezas individuales de equipo por algunos minutos se mostrará como un decremento en el flujo y así indicará el consumo de vapor.

- \*El vapor descargado en válvulas para disminuir la presión del sistema se puede estimar anotando las posiciones de la válvula y las caídas de presión.

\*Los flujos de vapor a través de turbinas se pueden estimar con datos de diseño.

\*La acumulación de condensados de rehervidores y condensadores se puede calcular cerrando las salidas por periodos cortos de tiempo y anotando los cambios de nivel en los recipientes involucrados.

\*El condensado de trampas se puede medir en algunos casos o se puede estimar de las especificaciones de trampas.

\*Se pueden estimar las pérdidas debido a fugas y venteo a la atmósfera.

\*Aunque el vapor es un material manejable, y las mediciones técnicas pueden ser aproximadas, se han experimentado balances con un (+/-)10% de exactitud que es posible en refinerías de petróleo.

En algunas plantas con sistemas de registro de datos y computadoras, los balances de vapor se pueden programar y generar rutinariamente.

#### **IV.1.4 Vapor de Baja Presión.**

Frecuentemente, el vapor de baja presión se descarga a la atmósfera. El vapor de baja presión, que es alto en calor latente, se puede usar directamente para desaerear el agua de alimentación a calderas, e indirectamente a través del intercambio de calor para el precalentamiento del crudo o también para el calentamiento de edificios y cuartos de control. El condensado se puede recuperar y emplear como agua de alimentación a calderas para aprovechar toda la energía calórica posible.

#### **IV.1.5 Fugas de Vapor.**

Las fugas están siempre presentes en los sistemas de vapor de las refinerías por lo que se requiere tener un programa de mantenimiento constante para el sistema de vapor.

#### **IV.1.6 Venteo de Vapor.**

El venteo del vapor en exceso directamente a la atmósfera es un desperdicio de energía por lo que se debe encontrar un uso a dicho vapor.

#### **IV.2 Pérdidas de Vapor en Tuberías y Aislamiento en Líneas.**

Un material aislante es aquel que ofrece básicamente una gran resistencia al flujo de calor a través de él, sin embargo, las condiciones a las que está sometido dicho material en las instalaciones industriales, requiere de otras propiedades como son:

Resistencia mecánica, ser no-corrosivo, que no propicie microorganismos, no combustible, que no desprenda gases tóxicos y resistencia a la transferencia de calor.

La resistencia al flujo de calor es inversamente proporcional a la densidad del material, esto se constituye en una limitante para obtener mejores aislantes ya que serían necesariamente materiales muy frágiles y no llenarían los demás requerimientos físicos mencionados. Físicamente los aislantes térmicos son soportes mecánicos de pequeñas celdas de aire, los cuales tienen muy baja conductividad térmica siendo por consiguiente excelentes aislantes.

Un sistema de aislamiento diseñado apropiadamente puede conservar la energía calorífica, mantener las temperaturas de proceso, evitar la condensación de vapores de agua en superficies metálicas, proveer protección al personal y también aislar a los fluidos en las tuberías del medio externo en caso de fuego. Contrariamente, un material incorrectamente seleccionado y un sistema fabricado e instalado deficientemente pueden ocasionar fuego, explosión y por ende riesgo para la gente que se encuentre en derredor.

Aislar adecuadamente es una inversión de capital de un momento pero su efecto en el ahorro de energía es importante y de largo plazo.

Las pérdidas de calor en equipos y sistemas de una planta de procesamiento se pueden rastrear y eliminar sistemáticamente. Tal como ocurre en el sistema de tuberías de una refinería.

Aunque las tuberías desnudas que transportan fluidos calientes o fríos se pueden encontrar hoy en día en refinerías, esto no es común. Por otro lado, en los casos de tuberías con aislamiento deteriorado o inadecuado de acuerdo a los estándares comunes y en los que ocurre ya sea que una cantidad excesiva de calor se elimina de una línea caliente o que se absorbe por una línea fría, la energía se está desperdiciando inútilmente.

Aquí, el problema estriba en definir que es una pérdida excesiva de energía, y el juicio surge junto con el aspecto económico.

El aislamiento de tuberías que era considerado completamente adecuado hace algunos años, actualmente puede no ser satisfactorio teniendo presentes el aumento en los precios del combustible.

Factores como estos señalan la necesidad de una cuidadosa reevaluación del estado corriente de la tubería aislada así como de las prácticas usadas al seleccionar, instalar y mantener el aislamiento de la tubería.

Por lo anterior, es conveniente instituir un programa sistemático con objeto de mejorar las condiciones de los sistemas de aislamiento de tuberías a un nivel más acorde con las prioridades de una economía en escasez energética.

#### **IV.2.1 Otros Aspectos Importantes en el Manejo del Vapor.**

En cualquier esfuerzo de este tipo, no se debe limitar la consideración a sólo las propiedades térmicas del material aislante. Por ejemplo, las bridas y accesorios en un sistema de tubería bien aislado se dejan algunas veces desnudas con la creencia de que las pérdidas de calor en estas partes son muy pequeñas como para justificar el gasto de aislarlas. El hecho es que las pérdidas de calor en tales partes pueden ser sorprendentemente grandes. Una "T" en una línea de vapor de 8 plgs., por ejemplo, puede perder cerca de 9000 Btu/h cuando la línea transporta vapor a 100 psi de presión. Para un sistema que opera 7200 h/año, la pérdida anual aproximadamente equivale al valor de calentamiento de 450 galones de combustible. Un aislamiento adecuado que prevea alrededor del 90% de esta pérdida se podría instalar a un costo por de bajo de 1 año de los ahorros anuales.

La condición del aislamiento es también un factor importante. A medida que la velocidad del aire que se mueve a través de la superficie caliente se incrementa,



sucede lo mismo con la pérdida de calor de esa superficie. Para superficies selladas y bien aisladas, este efecto es muy pequeño. Sin embargo, si el aislamiento tiene hendiduras y grietas por las que el aire pueda circular, la pérdida de calor se puede incrementar significativamente. Es esencial, por lo tanto, que todo aislamiento en una línea caliente este sellado firmemente, especialmente cuando se use en tuberías localizadas a la intemperie. En este último caso, el aislamiento necesita ser protegido contra el medio ambiente así como contra infiltraciones de aire.

Un sellado completo también es necesario para aislamientos usados en líneas de fluidos fríos para prevenir la penetración de aire húmedo. Si el aire penetra al aislamiento, es probable que ocurra condensación afectando seriamente la efectividad del aislamiento o causándole daño físico en caso de ocurrir un congelamiento. Así, un buen sello contra humedad es un requerimiento esencial para tales aplicaciones.

#### **IV.2.2 Materiales.**

Todas las medidas sugeridas son representativas de prácticas de aplicación de estrategias convenientes que pueden contribuir significativamente a la integridad y efectividad de los sistemas de aislamiento en tuberías. Pero la máxima acometida de cualquier mejoramiento serio de aislamiento se debe dirigir a los materiales de aislamiento en si para asegurar que sean adecuados para el servicio en términos de criterios económicos basados en niveles de costos de energía predecibles. El objetivo es encontrar "el espesor económico del aislamiento" aquel espesor al cual la suma de los costos de calor perdido y aislamiento instalado estén a un mínimo.

Como consecuencia de la elevación en el costo de los combustibles durante los últimos años, el espesor económico del aislamiento para tubería ha venido aumentando proporcionalmente, y para muchas aplicaciones industriales, por lo menos se ha duplicado.

Para llevar a cabo ahorros de energía en aislamientos se requiere del entendimiento de los tipos y propiedades de los materiales de aislamiento térmico disponibles, y un método sistemático para su selección. Básicamente existen tres consideraciones de mayor importancia que gobiernan la selección de estos materiales: temperatura de operación, características de la transmisión de calor, y costo instalado. Las primeras dos consideraciones están relacionadas

con las condiciones específicas de los materiales mientras que la tercera es un factor de aplicación que también tiene relevancia importante en el valor del espesor económico.

#### **IV.2.3 Temperatura de Operación.**

Todos los fabricantes de aislamiento categorizan sus materiales por intervalo de temperatura de aplicación. Y hay una cantidad de materiales diferentes en el mercado, que ofrecen una variedad de alternativas que cubren el espectro total de los requerimientos de tubería industrial desde -450°F hasta 2000°F y mayores. Estos intervalos de temperatura de servicio para aislamientos comunes de tubería industrial se muestran gráficamente en la tabla IV.1

##### **Transmisión de Calor.**

El flujo de transferencia de calor a través de un material aislante depende de la resistencia interna del material, la resistencia de la superficie de la tubería, y la diferencia en temperatura entre la superficie de la tubería y el aire circundante. La resistencia interna del material al flujo de calor, por su parte, es directamente proporcional al espesor del material e inversamente proporcional a su conductividad. Los valores de conductividad para aislamientos típicos varían con la temperatura promedio del aislamiento.

#### **IV.2.4 Costo Instalado.**

Cuando se evalúan los materiales aislantes para su adecuación en una aplicación dada, el único costo que cuenta es el costo instalado. El precio inicial de los materiales es generalmente un criterio pobre sobre el cual basar los juicios de valor. Es común encontrar que un material relativamente caro en realidad tiene un costo instalado menor que un material menos caro a causa de diferencias en los requerimientos de instalación.

Algunos aislamientos requieren preparación especial de la superficie a la cual van a ser aplicados, otros no. En instalaciones de líneas frías los requerimientos de barreras de vapor, y sellos varían de material a material. Además, algunos aislamientos de baja temperatura tienen resistencia a la compresión, y pueden requerir arreglos de soportería especiales cuando se usan líneas suspendidas. Una excepción aquí es el vidrio celular que tiene una de las más altas

resistencias a la compresión. Todas estas consideraciones pueden afectar el costo instalado.

Los aislamientos de tubería se suministran en varias formas. Los materiales rígidos tales como el silicato de calcio, vidrio celular, fibra de vidrio, espuma de uretano, etc., vienen en secciones cilíndricas preformadas o secciones curvas de 3 o 4 pies de longitud. Los materiales flexibles tales como las lanas minerales y elastómeros espumados, así como otros, se proveen como mantas prefabricadas para ajustar al tamaño de la tubería. Además hay materiales granulares tales como el UNTAITE, que se usa como aislamiento para tubería enterrada.

Tanto los aislamientos flexibles como los rígidos se ajustan alrededor de la tubería. Se usa una variedad de materiales como recubrimientos de tubería que van desde mastique, papel, lona, vinilo, hojas de PVC, chaquetas de aluminio, acero y acero inoxidable. Algunas veces la chaqueta se suministra con el aislamiento e incluso puede adherirse a éste. Aunque algunos de estos recubrimientos proveen un efecto aislante adicional, su función principal es proteger al aislamiento del daño. Las chaquetas de metal son, por un margen amplio los recubrimientos más caros. Son siempre recomendados para tubería externa, especialmente donde existan condiciones ambientales severas. Las chaquetas de metal también se usan en interiores conio medida de mejorar la resistencia contra fuego de los sistemas de aislamiento de tuberías.

Todos estos factores, el tipo de material aislante y recubrimiento, y las formas en las que se suministran y aplican tienen una relación importante en el costo instalado.

Los aislamientos se suministran generalmente en espesores que van desde 1/2 plg. en incrementos de 1 a 1/2 plg. a un máximo de 4plgs. Los espesores mayores instalados son posibles usando dos o más capas de material, y la mayoría de los aislamientos están disponibles en tamaños de anidamiento diseñados para proveer un ajuste de acomodo en arreglos multicapas. Esta provisión es especialmente útil para los esfuerzos de conservación de energía ya que el aislamiento se puede rápidamente mejorar a niveles de espesor económicos corrientes adicionando capas de material más que rasgando y reemplazando el aislamiento existente.

Esta capacidad de las múltiples capas, es importante en el aislamiento de tuberías arriba de 600°F, ya que a estos niveles de temperatura la expansión de la tubería es un factor importante que puede causar estragos con las uniones de

un aislamiento simple. Para tal servicio un arreglo de doble capa es la única solución práctica.

#### **IV.2.5 La Selección Final.**

Ya sea que se seleccione aislamiento para una nueva instalación de tubería o como parte de un programa de mejoramiento para un sistema de tubería aislada existente, primero se debe reunir cierta información básica. Un buen punto de partida es la lista de especificaciones que se muestra en la Fig. IV.1 y en la Tabla IV.1. Tomando esta información como referencia, se puede efectuar la selección del material adecuado por un proceso de eliminación.

Un tamizado de los materiales aislantes existentes se puede llevar a cabo a través de un análisis de la literatura de los fabricantes y sus materiales para disminuir el intervalo de selecciones a algunos productos. En este análisis los criterios básicos son la temperatura de operación y la conductividad térmica. Para aplicaciones en tuberías calientes, se puede emplear cualquier material con una temperatura de servicio máxima mayor que la requerida, tomando en cuenta que el valor de conductividad tiende a ser menor a medida que la temperatura máxima límite del material disminuye.

Después de este tamizado preliminar, las posibilidades de selección que emergen pueden reducirse a un sólo material por medio de una evaluación cuidadosa de las propiedades del aislamiento en términos específicos de los requerimientos de aplicación, y una comparación de los costos de instalación para los varios materiales estimada por fabricantes o a partir de datos suministrados por ellos. Una vez que la selección se ha hecho, lo que resta es determinar el espesor económico del material.

En esta determinación, los factores que se requieren tomar en cuenta son los costos del combustible presentes y futuros, inversión de capital en planta y aislamiento, el costo del dinero, periodo de amortización, costo de mantenimiento y horas de operación de la planta. Todos estos factores están incorporados en la tabla de espesores económicos mostradas en la Tabla IV.2.

Los datos tabulados representan espesores estandarizados que satisfarán la mayoría de las condiciones en tuberías calientes y están basadas conservativamente, en la consideración de un incremento anual de 4% en los costos del combustible.

Estas tablas fueron calculadas usando un procedimiento desarrollado por la Thermal Insulation Manufacturers Association. Llamados ECON-I, el procedimiento se detalla en un manual publicado por TIMA y hace uso de una serie de tablas y gráficas para señalar con precisión un espesor económico precalculado de aislamiento para una serie de dada de condiciones de aplicación.

Para materiales y condiciones de operación diferentes a los mostrados, el espesor del aislamiento económico se puede calcular a través de un proceso de cálculo sistemático.

1.- Calcular el costo de las pérdidas de calor ( o el calor ganado en el caso de líneas frías) para una longitud dada de tubería (por ejemplo 100 pies) para un intervalo de espesores de aislamiento. Este costo se determina multiplicando la pérdida de calor total de la tubería (Btu por hora x número de horas de operación al año) por el costo del combustible (dólares por Btu de poder calorífico del combustible) y dividiendo por la eficiencia de combustión. Recordando que el costo del combustible que se usa aquí debe ser un valor proyectado que refleje el costo promedio del combustible durante el período de vida económica del aislamiento.

Estas pérdidas de calor del aislamiento se pueden usualmente obtener a partir de literatura de fabricantes.

2.- Calcular el costo instalado del aislamiento para la longitud dada de tubería y dividir por el período de amortización(años).

Se debe incluir una tolerancia por gastos de mantenimiento del aislamiento e interés sobre la inversión que representa.

3.- Para cada espesor de aislamiento sumar los costos totales obtenidos en 1 y 2. Cuando estos costos totales sean tabulados en orden creciente del espesor de aislamiento, surgirá un claro patrón: el costo total decrece progresivamente, alcanza un valor mínimo, y después comienza a incrementarse. El espesor del aislamiento correspondiente al costo total mínimo es el espesor económico.

Cuando las especificaciones térmicas de aislamientos de tubería se aproximan sistemáticamente como se ha indicado, el resultado es un ahorro máximo de energía dentro de los límites prudentes de las prácticas económicas.

### **IV.3 INSTALACIÓN DE TIC PARA EL CONTROL DEL FLUJO DE VAPOR (REDUCCIÓN EN LA TEMPERATURA DE TANQUES CALENTADOS).**

Muchos tanques y recipientes grandes usados para almacenar aceites combustibles residuales tienen calentadores de vapor para mantener a los aceites en un estado líquido y bombeable. Usualmente la temperatura de estos recipientes se controla manualmente. Sin embargo, el uso de un Controlador Indicador de Temperatura (TIC) en tanques sin aislamiento ocasiona que se tenga un mejor control de la temperatura objetivo disminuyendo al mismo tiempo el consumo de vapor, como se observa en la Fig. IV.2.

Si adicionalmente los tanques y recipientes son aislados, se puede reducir aun más la cantidad de vapor necesario para mantener las temperaturas de almacenamiento requeridas.

### **IV.4 SELECCIÓN, PÉRDIDAS DE VAPOR Y MONITOREO DE TRAMPAS DE VAPOR.**

Una trampa de vapor es un dispositivo que deja salir agua o condensado, pero que retiene al vapor. En otras palabras es una válvula automática de condensado.

Otra función importante de las trampas de vapor es la eliminación de aire y gas que estén presentes en las líneas junto con el condensado.

El aire puede entrar al sistema de la caldera ya sea a través del agua de repuesto, o puede ser succionada hacia el sistema debido al vacío causado durante la condensación del vapor durante el paro de la planta.

Otros gases no condensables como dióxido de carbono y ocasionalmente monóxido de carbono también pueden entrar al sistema a causa de los minerales presentes en el agua de alimentación a calderas llevándose a cabo una reacción química durante el proceso de ebullición.

Estos gases junto con el aire tienden a formar capas que actúan como aislamiento, sin embargo cuando se mezclan con vapor, el aire y gas disminuyen dramáticamente la temperatura de la mezcla resultante. Por lo anterior es

aconsejable no sólo eliminar rápidamente el condensado sino también el aire y el gas presentes con objeto de tener altas eficiencias y temperaturas en el equipo.

Una trampa de vapor debe servir para tres funciones principales:

1. Eliminar el condensado, reteniendo el vapor.
2. Eliminar el aire y el gas rápidamente, especialmente en el arranque después que el equipo ha estado fuera de operación por un cierto período de tiempo.
3. Llevar a cabo la eliminación del condensado, aire y gas respondiendo prontamente a las condiciones cambiantes de la línea.

Para cumplir estos requerimientos, una trampa de vapor debe abrir cuando el condensado, el aire o el gas estén presentes pero deberá cerrar cuando el vapor llegue a la trampa. La trampa de vapor puede hacer esto, respondiendo a los cambios de temperatura en la línea, esto es, debe ser capaz de diferenciar entre vapor y condensado; o segundo, puede ser capaz de diferenciar entre líquido y vapor. En el primer caso la trampa abre y cierra debido a los cambios de temperatura antes de ella; en el segundo caso opera debido al cambio de fase del fluido, de vapor a agua.

Las trampas convencionales caen dentro de tres categorías. Cada categoría opera bajo un principio diferente para diferenciar entre vapor y condensado.

**1.-MECÁNICA-** Opera con diferencia de densidad entre vapor y condensado. Entre las mecánicas están las de cubeta invertida y cubeta flotante.

En la trampa tipo flotador que se muestra en la Figura IV.3, cuando el condensado se acumula en el cuerpo de la trampa, el flotador se eleva y abre la válvula. A medida que el condensado disminuye, la válvula cierra, la válvula se localiza abajo del nivel del agua, esto previene el escape de cualquier cantidad de vapor vivo cuando se opera apropiadamente. Desafortunadamente, esto también previene el escape de aire o gases presentes. Por esta razón la trampa tiene un venteo incorporado.

La trampa de cubeta invertida mostrada en la Fig.IV.4, se introdujo para mejorar el flotador de la trampa. En el arranque, la cubeta descansa en el fondo

de la trampa y la válvula está abierta, descargando aire y gases. Cuando el condensado se acumula, crea un sello de agua en el fondo de la cubeta. El vapor que entra a la cubeta ocasiona que ésta se eleve, cerrando la válvula. Un pequeño orificio en la parte superior deja salir lentamente vapor, permitiendo que el condensado entre a la cubeta. Cuando entra suficiente condensado a la cubeta, este pierde su flotación. La cubeta de nuevo se sumerge, abriendo la válvula y descargando condensado. Aunque ésta trampa puede ventear aire, su capacidad para hacerlo es limitada. Y si se van a ventear grandes cantidades de aire, se debe proveer de un venteo adicional.

Las trampas de cubeta invertida se deben cebar antes de arrancar para crear el sello de agua alrededor de la cubeta. Son propensas a congelamiento pero son resistentes al golpe de ariete.

**2.-TERMOSTÁTICA-** Opera por diferencia de temperatura entre vapor y condensado.

Es esencialmente una válvula de control de temperatura autoactuada ajustada a una temperatura específica, la trampa opera satisfactoriamente sólo a una presión de vapor específica. Si la temperatura de saturación del vapor (en relación a su presión) disminuye por abajo de la temperatura fijada al termostato, la trampa abrirá y descargará vapor. Si la temperatura de saturación del vapor es mayor, el condensado debe enfriar substancialmente antes de que la trampa abra. Si la temperatura de cierre se fija a 212°F, o menor, la trampa nunca descargará vapor vivo. Sin embargo, el condensado llena la línea de drenado y se acumula en el proceso ya que debe enfriar hasta 212°F antes de que la trampa abra. Esta característica conserva energía ya que el calor sensible se emplea antes de descargar el condensado, pero ésta ventaja sólo puede efectuarse si el proceso puede soportar pérdida de superficie de transferencia de calor o una diferencial menor de temperatura. Por otro lado, la acumulación del condensado puede ser contraproducente ya que al reducir el área de transferencia se requiere incrementar la presión en el vapor.

Este problema se resuelve con la trampa termostática de presión balanceada Fig. IV.5, que reacciona a la presión así como a la temperatura

La trampa termostática tipo fuelle mostrada en la Fig. IV.6, consta de un fuelle lleno de un líquido empleado para accionar el mecanismo de la válvula. En el arranque la válvula está abierta, permitiendo que el gas y el aire atrapados en el sistema sean venteados libremente. A medida que el vapor entra a la trampa, el



fluido en el fuelle empieza a ebulir y la expansión resultante cierra la válvula. Cuando el condensado está por abajo de la temperatura del vapor, el líquido contrae al fuelle, abriendo la válvula y eliminando el condensado. El fuelle debe ser flexible para permitir una constante expansión y contracción. Lo que significa que el fuelle es un dispositivo delicado, lo que afecta a esta trampa en caso de existir golpe de ariete.

La trampa bimetalica mostrada en la Fig. IV.7, es una trampa relativamente nueva en el mercado. Esta trampa usa la diferencia en el coeficiente de expansión de dos grados diferentes de acero para operar la válvula. Los dos metales están formados juntos en forma de "delta". Esto permite un movimiento vertical de la válvula. En el arranque está completamente abierta permitiendo de nuevo que el aire y gases escapen. A medida que se alcanzan temperaturas mas calientes, la delta se expandirá, cerrando parcialmente la válvula. Cuando entra vapor vivo a la trampa, la delta se expandirá totalmente, cerrando completamente la válvula. Como se mencionó previamente, esta trampa es relativamente nueva en el mercado, y no hay disponible datos de funcionamiento. Esta trampa no es tan vulnerable al golpe de ariete como la trampa de fuelle, pero el tiempo de respuesta a la variación en temperatura es más lenta.

Esta trampa es generalmente a prueba de congelamiento a menos que la carga de condensado sea substancialmente mayor que la capacidad máxima de la trampa. Así, este tipo de trampa se instala con frecuencia en serpentines de tanques de almacenamiento grandes.

**3.-TERMODINÁMICA-** Opera usando la diferencia en energía termodinámica disponible entre vapor y condensado. Esto es, usa la diferencia de temperaturas.

La trampa termodinámica opera con la diferencia en la energía disponible entre el condensado y el vapor. El tipo disco de la trampa termodinámica se muestra en la Fig.IV.8. En el arranque la presión en las líneas de vapor harán que el disco se eleve, venteando aire y gases. El condensado que aún no a alcanzado la temperatura de saturación también será venteado libremente. A medida que el vapor entra a la trampa, se creará una presión en la parte trasera del disco, ocasionando que éste cierre. Cuando el vapor condensa a agua, la presión no existirá más y la trampa abrirá de nuevo. Esta trampa ha ganado gran popularidad, probablemente debido a su pequeño tamaño y precio. Permitirá que escape una pequeña cantidad de vapor vivo. También es altamente dependiente de la temperatura ambiente para una operación eficiente. En el aire

circundante la trampa está fría, el vapor en la cámara superior de la trampa condensará más rápido, venteadando una cantidad excesiva de vapor vivo. Para una operación más eficiente esta trampa debe ser aislada.

#### **IV.4.1 Selección del Tipo de Trampa.**

Las aplicaciones de las trampas de vapor se encuentran dentro de tres categorías básicas: Goteo, Trazado y Proceso

Las Trampas Para Goteo drenan el condensado que se forma como resultado del calor perdido en las líneas de vapor y el equipo manejado con vapor. Si se permite que se acumule, el condensado puede causar golpes de ariete peligrosos, corrosión y un daño global a la tubería, válvulas y otros equipos.

Las trampas trazadoras drenan el condensado de las líneas de vapor, que es tubería cubierta y que se mantiene caliente con vapor.

El trazado en el invierno protege contra el congelamiento; el trazado de proceso mantiene a los líquidos suficientemente fluidos para ser bombeados (aceites pesados, azufre, etc.).

Las aplicaciones de proceso de las trampas de vapor incluyen gases de calentamiento, líquidos o sólidos que usan vapor directa o indirectamente

Habiendo definido la aplicación de la trampa, se requiere seleccionar el tipo correcto, observando los criterios de funcionamiento, tales como modo de falla de diseño (abierto o cerrado), la velocidad de respuesta, la capacidad de manejo de aire, la facilidad de inspección, el criterio ambiental (congelamiento o alta temperatura), la presencia de golpe de ariete con agua, intervalo de presiones de operación y presencia de sobrecalentamiento. Otros criterios más característicos son la facilidad de instalación y mantenimiento (incluyendo la flexibilidad para ser colocadas en tubería horizontal o vertical, drene integral y válvula de purga.

La tabla IV.3, es una lista general de tipos de trampas con criterios de funcionamiento, pero se pueden encontrar variaciones para algunas trampas en donde los fabricantes han modificado la tecnología básica.

#### **IV.4.2 Monitoreo de Trampas de Vapor.**

Las trampas que no operan adecuadamente representan enormes pérdidas de vapor por lo que es necesario tener un programa de mantenimiento.

Las claves para un programa de mantenimiento para trampas de vapor son: un mantenimiento (inspección) regular y una solución adecuada a los problemas que se presenten. El funcionamiento de las trampas se debe evaluar por trabajadores que hayan sido entrenados para efectuar las evaluaciones. La persona que inspecciona debe entender la operación de la trampa y su modo de falla de diseño. El fabricante de la trampa debe verificar que las trampas estén operando apropiadamente como parte del programa de entrenamiento para el mantenimiento. Se debe dar atención al modo de falla, operación característica y temperatura de descarga.

Hay tres formas de inspeccionar una trampa de vapor: 1) visual, 2) por sonido, 3) por temperatura. El método visual se usa cuando las trampas descargan a la atmósfera o cuando se tiene una "T" de prueba. Mientras la trampa está descargando, observamos tanto la operación característica y evidencia del vapor purgado. El método del sonido se usa cuando la descarga no se puede ver. Con éste método se escucha la operación característica si la trampa opera abierta/cerrada en forma claramente audible. Un estetoscopio o probador electrostático puede ayudar con la percepción de sonidos. El último método, temperatura, es el mejor indicador de la operación, excepto en sistemas a baja presión, de 15 psig o menos. Una trampa de vapor con una diferencia alta de temperatura a través de ella está probablemente funcionando convenientemente. Si la temperatura de salida se aproxima a la temperatura de entrada, la trampa está purgando vapor o hay una contrapresión grande en el sistema de retorno.

Una trampa de vapor puede perder vapor por cuatro razones:

- 1.-Porque consume o descarga vapor en la operación normal a causa del diseño.
- 2.-El desgaste gradual causa un incremento lento y con frecuencia imperceptible en la descarga del vapor.
- 3.-Falla precipitadamente, dejando escapar vapor o cerrando el mecanismo de descarga del condensado.

4.- Un mal funcionamiento temporal debido a cambios en las condiciones del proceso cierra la válvula en una posición, hasta que las condiciones se restablecen y la trampa regresa a su estado normal.

Las trampas de vapor defectuosas son fuente costosa de pérdidas de vapor y energía. Es usual encontrar, en un periodo de tiempo, que muchas trampas de vapor están trabajando inadecuadamente. Las trampas de vapor que descargan directamente a la atmósfera son una fuente tan grande de desperdicio de energía como lo son las fugas de vapor en líneas. Las trampas de vapor que descargan al sistema de recolección de condensados también pueden ser fuentes importantes de desperdicio de energía si el vapor de baja presión se ventea a la atmósfera.

Al corregir problemas en las trampas de vapor, por lo menos se deben emplear dos de los tres métodos mencionados. La inspección de las trampas se puede hacer fácilmente seleccionando los tipos abierto/cerrado que permiten ser revisadas rápidamente con un probador ultrasónico. Hay que recordar que si una trampa es muy difícil de inspeccionar, probablemente uno no sabrá cuando ésta necesite mantenimiento.

Tomando en cuenta que el número de trampas en plantas químicas puede ser desde algunos cientos hasta miles, la operación de una trampa de vapor se puede perder. Podemos ver que en cualquier momento algunas trampas de vapor ya habrán fallado y otras estén por hacerlo.

El enfoque de manejar a la población de trampas se convierte en el de poner en funcionamiento en forma regular inspecciones programadas para localizar fallas siguiendo con un ciclo de reemplazo y reparación.

A mayor frecuencia de inspecciones efectuadas, menor será la incidencia de trampas con falla en un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo, si se espera que las trampas duren 5 años, entonces 20% de las trampas fallarán por año. Si se inspecciona una vez al año, entonces mantendremos un nivel de operación normal del 90%. Si se inspecciona dos veces al año, entonces se puede alcanzar un nivel de operación promedio del 95%. La determinación de la mejor frecuencia de inspección se convierte en un análisis económico de costos de inspecciones y fases de reparación balanceado contra los costos de energía.

Los costos consisten principalmente de la mano de obra necesaria para inspeccionar y hacer las reparaciones.

Si las trampas son difíciles de revisar o no reparables en línea, la mano de obra se incrementa notablemente. Por lo tanto, el proceso inicial en la selección de la trampa debe incluir la consideración de características como la facilidad de inspección o reparabilidad en línea.

Los ahorros por mano de obra son importantes ya que, en la mayoría de los casos cuando la planta está comenzando un programa de trampas de vapor, se está haciendo con fuerza de trabajo existente.

Si consideramos plantas operando con un ciclo al año de inspección-reparación, el uso de trampas renovables y fácil de revisar puede permitir dos ciclos por año sin horas hombre adicionales. Con objeto de evaluar la mejor frecuencia del ciclo para un programa, se requiere una historia clara del funcionamiento. Por lo tanto se recomienda tener un sistema de registro de datos del funcionamiento de las trampas de vapor. El registro de datos debe considerar la historia de la trampa en forma individual así como la población total de trampas. Cada trampa debe ser identificada y localizada recopilando toda la información pertinente. En poblaciones grandes, los datos pueden ser abrumadores, por lo que una PC u otro tipo de computadora se puede requerir para analizar los datos, proveer reportes, e imprimir ordenes de trabajo para mantenimiento.

Un buen programa para el mantenimiento de trampas resultará en un mejor funcionamiento del sistema, un incremento en la eficiencia del proceso, menores costos globales y mejoramiento en la seguridad y mantenimiento de la planta. Y lo más importante, en un ahorro monetario, ya que los ahorros de energía generados por un programa de mantenimiento exitoso pagarán los gastos del programa.

Las trampas de vapor pueden obstruirse, tapadas por ensuciamiento y quedar fuera de servicio ya sea porque el vapor no esté en uso, o a causa de que alguna válvula haya sido dejada abierta dejando escapar vapor o haya sido cerrada incorrectamente. El mal funcionamiento puede ocasionar perjuicios, daño al equipo, o paro de la producción en caso de que estas trampas sean esenciales para la protección u operación del sistema.

Un análisis de costos para trampas trazadoras y de goteo de baja capacidad indica que se pueden tener pérdidas de más de 2000\$/año de vapor. A ese paso sólo tomaría 2 meses recuperar el costo de una nueva trampa con los ahorros en vapor.

Una vida de cinco años es una expectativa razonable para una trampa de vapor en servicio normal. El efecto del ensuciamiento, aplicación inadecuada, subdiseño, sobrediseño e instalación impropia son importantes al determinar la vida de servicio global. En estudios de fallas en trampas se ha encontrado que casi la mitad de todas las fallas no son resultado del uso normal, sino que fueron causadas por una de las condiciones antes mencionadas.

El ensuciamiento representa un problema importante, causando alrededor del 10% de todas las fallas. El mayor énfasis en el entrenamiento, más la disponibilidad de éste por parte de los fabricantes de trampas, ha resultado en mejoras en la operación de las trampas de vapor al punto que se han reportado tiempos de vida de servicio de trampas de hasta diez años. Pero para muchos usuarios de vapor, los efectos del ensuciamiento, selección y dimensionamiento inadecuados, así como los problemas de instalación son problemas de todos los días.

Un diseño y especificación apropiados pueden eliminar mucha de la falta de aplicación, instalación impropia, sobredimensionamiento e inaccesibilidad de las trampas de vapor.

Así, un programa de mantenimiento:

- \*mejorará la seguridad
- \*incrementará la producción
- \*reducirá los costos de mantenimiento y otros eliminando problemas en el retomo de condensados, congelamientos, daños por golpe de ariete y corrosión.

#### **IV.5 FUGAS EN EL SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADOS Y RECUPERACIÓN DEL CONDENSADO.**

Las pérdidas en el sistema de retorno de condensados ocurren generalmente de dos maneras. Primero, a través de fugas o fallas en las líneas de condensado. Segundo, el calor se pierde de las líneas de condensado debido a un aislamiento inadecuado.

#### **IV.5.1 Recuperación de Condensado Caliente.**

Recircular el condensado reduce los costos por energía, tratamiento del agua para calderas y tratamiento del agua de desecho.

Aunque el condensado obstruye la distribución eficiente del vapor, puede ser una fuente valiosa de energía. A causa de su contenido de energía se puede recircular para propósitos de calentamiento, para uso en proceso, o, como ya ha sido tratado, para uso en agua de alimentación a calderas.

Emplear el condensado caliente ahorra no solamente la energía presente en el condensado, sino que también reduce la cantidad de agua de repuesto que se requiere en la caldera para generar vapor.

Por ejemplo, producir 10,000 lb/h de vapor cuyo condensado no se retorna a la caldera como agua de alimentación requerirá tratar 10 millones de galones por año de agua para calderas y descargar 10 millones de galones por año (30,000 galones/día) de agua de desecho al drenaje. El no recuperar la entalpía en 10,000 lb/h de condensado de 50 psi desechará 20,000 millones de Btu/año. Mucho de ese calor se puede recuperar, ya sea retornándolo a la caldera o usándolo como calor de proceso.

Recuperar el condensado y reusarlo como agua para caldera es una manera efectiva de usar el poder calórico del condensado caliente. Por ejemplo, producir una libra de vapor de 150 psi a partir de agua a 70°F requiere cerca de 1156 Btu. Producirlo a partir de condensado recirculado de 200°F requiere 130 Btu menos, lo que equivale a un ahorro del 11%.

En la mayoría de las plantas se sabe del valor de retornar el condensado a la caldera para su reuso como agua pretratada. Pero a menos que la caldera esté cerca de la fuente del condensado, mucho del calor se puede perder en su camino a la caldera.

Una línea de retorno de condensado de 2 pulgadas sin aislar transportando condensado a 200°F perderá aproximadamente 30000 Btu/h por cada 100 pies de tubería. El aislar la línea disminuirá la pérdida en cerca del 80 %.

El condensado caliente a un flujo de 10000 lb/h a través de 5000 pies de línea de retorno no aislada perderá todo su poder de calentamiento; aún si la línea está aislada, la temperatura del condensado disminuirá en cerca de 30 °F.

A causa de esta pérdida de calor, es con frecuencia prudente usar condensado caliente para calentamiento de proceso antes de retornarlo a la caldera para su reuso. El condensado caliente se debe recolectar y usar como agua de reposición a calderas.

#### **IV.5.2 Uso del Vapor de Flasheo.**

A medida que el condensado pasa a través de una trampa de vapor, ocurre una caída de presión a un valor menor a la presión de proceso. Para mantener un balance termodinámico, una porción del condensado se evapora, produciendo vapor flasheado. Este, como cualquier vapor, contiene calor latente que se puede usar en alguna operación que pueda usar vapor de baja presión.

El vapor flasheado se puede acumular en un recipiente inmediatamente corriente abajo de la trampa, en donde se separa del condensado.

Este vapor "libre" recuperado se puede emplear en calentadores a baja temperatura, precalentadores, y trazadores. El proceso en el que se use este vapor debe localizarse razonablemente cerca de la fuente del vapor flasheado y debe tener una demanda de vapor por lo menos tan alta como la cantidad de vapor de flasheo que estaría disponible.

Un arreglo ideal para el uso de vapor de flasheo es en un intercambiador de dos etapas. El vapor de flasheo liberado por el condensado del intercambiador de dos etapas de alta temperatura se usa en el precalentador de la primera etapa. Cuando la carga de vapor en la unidad cambia y la cantidad de vapor de flasheo se incrementa o disminuye, el serpentín que usa vapor de flasheo necesariamente tiene de manera proporcional una demanda mayor o menor. Esto lo capacitará para emplear todo el vapor de flasheo no importando cual sea la carga de vapor.

Un sistema tal, de un intercambiador de calor, se ilustra en la Fig. IV.9. El condensado y el vapor de flasheo se descargan a través de la trampa de vapor de la unidad superior, que es un intercambiador de calor vapor-agua. Después las dos fases son separadas en el condensador de flasheo inferior, y ambos generan calor que se transfiere al agua de retorno del sistema de calentamiento antes de



que alcance al intercambiador de calor principal. Esta unidad se completa por una bomba que retorna el condensado al tanque de alimentación a la caldera.

El vapor de flasheo es también con frecuencia usado para calentamiento y para líneas de trazado.

#### **IV.5.3 Problemas de Recirculación de Condensado.**

El condensado de recirculación también tiene problemas. El más común ocurre a causa de que el condensado es agua saturada en su punto de ebullición. A medida que el condensado se mueve a través de una trampa de vapor, su presión disminuye, vaporizándose en parte, y creándose vapor de flasheo. La presencia de vapor de flasheo puede sobrecargar la línea de retorno de condensado con vapor, incrementando el volumen en la línea y haciendo más difícil el flujo del condensado restante. La presión incrementada en la línea de condensado también puede resultar en la generación de una alta contrapresión en las trampas de vapor, lo que reducirá su capacidad.

Aún, si las tuberías de condensado fueran diseñadas lo suficientemente grandes para flujo a dos fases, las líneas estarían subdiseñadas. Esto es porque quizás fueron diseñadas para recircular sólo una pequeña porción del condensado de la planta. Hoy día, existen plantas que recuperan del 60 al 80% de su condensado y que buscan estrategias para recircular un mayor porcentaje.

#### **IV.5.4 Operación de los Intercambiadores de Calor.**

Comúnmente existe suficiente presión en los cabezales de distribución de vapor para mover el condensado a través de la trampa y hacia el sistema de recuperación de condensado, pero en muchas plantas se trata de descargar condensado a líneas de retorno elevadas no existiendo suficiente presión para llegar a ese punto, lo que crea dificultad para mover el condensado ocasionando que también se pueda reducir la capacidad de las trampas de vapor al reducir la presión diferencial disponible en la trampa.

Una forma de aliviar este problema de caída de presión es empleando líneas de retorno más grandes. Para asegurar que la línea de retorno de condensado esté

correctamente dimensionada, se debe considerar el manejo de flujo a dos fases, es decir vapor y condensado.

Adicionalmente, no hay siempre suficiente presión en el vapor en los intercambiadores de proceso para enviar el condensado a la línea de retorno. Existen dos condiciones de proceso que evitarán que el condensado drene fuera de la trampa y cause inundación de los intercambiadores: contrapresión alta del condensado y una baja presión del vapor en el intercambiador. Cuando uno de los dos sucede habrá insuficiente presión diferencial para mover el condensado del intercambiador de calor, a través de la trampa, y hacia la línea de retorno de condensado. El condensado no drenará y el cambiador comenzará a llenarse de agua.

Los intercambiadores de calor operan en un amplio intervalo de presiones del vapor que con frecuencia son menores que la presión de la línea. Si el intercambiador está sobrediseñado para la carga de calentamiento, o si la carga térmica se reduce debido a bajos flujos de producción, la presión del vapor en el intercambiador puede estar aún abajo de la presión atmosférica. Además, los intercambiadores de calor y los calentadores de proceso que emplean vapor de flasheo necesariamente generan condensado a la misma presión (o menor) que la presión en la línea de condensado. Como resultado, se requieren usualmente bombas de condensado para la mayoría de los sistemas de recuperación de vapor.

Las bombas de condensado pueden ayudar a reducir los problemas de retorno de condensados. Las bombas eléctricas de condensado pueden tener una limitación de diseño. Ya que el condensado en el lado de la succión es agua en su punto de ebullición, la única cabeza positiva neta de succión (NPSH) disponible para una bomba de transferencia de condensado es aquella que se pueda crear por cabeza hidráulica. Las bombas centrífugas son muy sensitivas al NPSH. Si el NPSH no es suficiente, la bomba no sólo rehusará bombear, sino que también sus componentes se dañarán. Sin embargo, las bombas de condensado operadas a presión requieren sólo suficiente NPSH para que el condensado fluya hacia la bomba.

Las bombas de condensado también son esenciales para remover el condensado de un intercambiador de proceso cuando el suministro de vapor se cierra durante un paro. Sin presión de vapor para impulsarlo hacia la trampa, el condensado permanecerá en el calentador causando daño debido a la corrosión y congelamiento.

#### **IV.5.5 Bombas de Recuperación de Condensado.**

Generalmente se utilizan dos tipos de bomba de condensado: las bombas centrífugas y las bombas operadas a presión. Usadas junto con un tanque recibidor y un controlador de nivel, una bomba elimina la necesidad de una trampa de vapor. Sin embargo, eliminar una simple trampa de vapor no siempre compensa la complejidad adicional y costo de una bomba centrífuga. Instalar y reparar el sistema de la bomba centrífuga requiere de tres tipos de mano de obra; mecánica, eléctrica y de instrumentación. Además, a causa de los requerimientos de NPSH de una bomba centrífuga, el condensado debe con frecuencia ser enfriado antes de poder ser bombeado, lo que reduce la cantidad de calor que se puede recuperar.

Una bomba operada a presión es más simple, aunque puede requerir de una trampa de vapor. La bomba operada a presión se instala corriente arriba de una trampa termostática y de un flotador, así la bomba actúa sólo cuando el condensado no drene naturalmente. Esto la hace ideal para regular intercambiadores de calor, que requieren una bomba de condensado sólo por un tiempo, y para intercambiadores que se pueden parar en clima frío.

##### **IV.5.5.1 Instalación del Sistema de Bombeo de Condensado.**

Los componentes y arreglo de un sistema de bombeo de condensado dependen del proceso, aplicación y tipo de bomba usada. El sistema tradicional mostrado en la Fig. IV.10, usa una trampa de vapor, un tanque recibidor que ventea a la atmósfera, y una bomba. El sistema es satisfactorio mientras se cumplan los siguientes criterios:

1. La presión del vapor en el intercambiador debe siempre ser mayor que la atmosférica para que el condensado drene a través de la trampa y hacia el tanque recibidor. Se puede emplear cualquier tipo de trampa apropiada para la aplicación en el proceso.
2. Ya que el condensado vaporiza parcialmente cuando se expande a la presión atmosférica, el recipiente debe ser lo suficientemente grande para separar el vapor de flasheo del condensado líquido.

3. La línea de venteo del tanque debe ser lo suficientemente grande para relevar el vapor flasheado.

4. Si se usa una bomba centrífuga, la altura vertical entre el recibidor y la bomba debe ser lo suficientemente grande para proveer el NPSH requerido por la bomba.

5. El uso de una bomba centrífuga requiere de un sensor de nivel en el tanque que controle la operación de la bomba, así como válvulas check en cualquier lado de la bomba. (Estas funciones de control de flujo son una parte necesaria de la operación de una bomba operada a presión y por lo tanto son una parte integral del diseño de la bomba.)

Este sistema tiene dos desventajas. Primero, requiere que la presión de vapor del intercambiador nunca sea menor que la atmosférica. Si es así, el condensado no drenará por la trampa hacia el tanque recibidor y el intercambiador se inundará.

Segundo, se pierden cantidades substanciales de condensado y energía calórica en el flasheo del vapor. Además, el vapor flasheado condensará en el equipo, causando corrosión, apareciendo como contaminante del aire.

El arreglo alternativo de la Figura IV.11 tiene varias ventajas sobre el sistema tradicional.

Este sistema no genera vapor de flasheo, puede operar con cualquier presión del intercambiador (incluyendo subatmosférica), requiere un recibidor pequeño y un venteo, y la bomba opera sólo cuando se requiere. En este arreglo el tanque ventea al lado del vapor del intercambiador. Estando a la misma presión que el condensado, no se genera vapor de flasheo. Aquí, la trampa de vapor debe localizarse corriente abajo de la bomba.

Si existe suficiente diferencia de presión para que el condensado fluya del intercambiador al tanque, a través de la trampa y hacia la línea de retorno, el recibidor no se llena de condensado y la bomba no enciende. Si no hay suficiente diferencia de presión, comenzará la inundación. Sin embargo, antes de que el condensado pueda acumularse en el cambiador se detecta su nivel y se bombea fuera del sistema. La trampa usada en este arreglo debe ser una que permanezca abierta constantemente cuando la bomba esté descargando, tal como una de flotador y termostática.

Además de eliminar el vapor de flasheo, la pérdida de calor asociada y el daño al equipo circundante, este arreglo requiere un tanque receptor mucho más pequeño ya que no separa vapor del condensado. cuando se usa en conjunto con una bomba a presión, el tanque sólo requiere de 6 pulgadas de diámetro por 24 de longitud para manejar 10,000 lb/h de condensado a 125 psi. No se requiere línea de venteo.

En el caso especial en que la presión del vapor en el cambiador nunca exceda la presión en la línea de retorno, no se requiere trampa después de la bomba de condensado. La misma bomba y sus válvulas check sirven como trampa de vapor que provee su propia fuerza motriz para descargar ella misma. Sin embargo, si la presión en el intercambiador alguna vez excede la presión en la línea de retorno, se escaparía vapor vivo por el sistema, por lo que es usualmente más seguro instalar una trampa.

Las limitaciones de la bomba centrífuga todavía aplican a este arreglo. A pesar de que la presión del sistema arriba del condensado es mayor que en el sistema de venteo, también la presión del condensado es proporcionalmente mayor. La bomba centrífuga todavía requiere una cabeza estática significativa en el lado de la succión para cumplir con sus requerimientos mínimos de NPSH.

#### **IV.5.5.2 Funcionamiento de la Bomba Operada a Presión.**

La bomba operada a presión Fig. IV.12, está formada de una cámara, mecanismo flotante, válvulas de venteo y de vapor, y válvulas check. Cuando la cámara se llena de condensado, un flotador se eleva y los resortes abren una válvula para introducir vapor o presión motriz hacia la cámara. Las fuerzas motrices de presión empujan al condensado hacia afuera y a través de la trampa hacia la línea de retorno. Una válvula check previene que el condensado se regrese al proceso. Cuando la cámara de la bomba se drena, el flotador cae, cerrando la válvula de presión motriz y venteando la cámara. partes en movimiento son las dos válvulas (la válvula de entrada de vapor(J) y la válvula de salida (K) sobre la cámara y sus mecanismos de accionamiento. Algunas bombas operadas a presión usan una solenoide para operar las válvulas; otras usan el movimiento mecánico del flotador.

1. En la posición normal antes del arranque, el flotador (C) está en su posición más baja con la válvula de vapor (J) cerrada y la válvula de salida (K) abierta.

2. Cuando el líquido fluye por gravedad a través de la válvula check de entrada(A) hacia el cuerpo de la bomba, el flotador (C) empieza a elevarse.

3. A medida que el flotador se eleva, el eslabón del mecanismo (E) se engancha, lo que incrementa la tensión en los resortes(G).

Cuando el flotador se ha elevado a su máxima posición, la energía de los resortes se libera instantáneamente, causando que el mecanismo de engrane(H) empuje hacia arriba y al centro, moviendo la barra de empuje (L) hacia arriba para abrir simultáneamente la válvula de entrada de vapor y cerrando la válvula de salida (K).

4. El vapor fluye ahora hacia la válvula de vapor (J) y desarrolla una presión dentro del cuerpo, forzando al líquido a salir a través de la válvula check de descarga (M). La válvula check de entrada (A) estará cerrada durante el ciclo de descarga.

5. A medida que el nivel del líquido en el cuerpo de la bomba disminuye, también lo hace la posición del flotador. Antes de que el flotador alcance su posición más baja, el mecanismo de unión (E) se engancha, incrementando la tensión en los resortes(G).

Cuando el flotador está en su posición más baja en el cuerpo, la energía en los resortes se libera instantáneamente, causando que el mecanismo de enganche (H) se dirija hacia el centro y hacia abajo, moviendo la barra de empuje (L) hacia abajo y causando que la válvula de vapor(J) se cierre y que la válvula de salida (K) abra simultáneamente.

6. El líquido fluye de nuevo por la válvula check de entrada (A) para llenar el cuerpo de la bomba, y el ciclo se repite.

#### **IV.5.6 Contaminación del Condensado.**

Para algunos procesos, la posibilidad de contaminar el condensado con fluido de proceso puede no garantizar el riesgo de retornar el condensado directamente a la caldera. Por ejemplo si un intercambiador en una columna de recuperación de HCL tuviera fugas, el condensado de vapor se podría contaminar con ácido.

**Transportar ese condensado contaminado para reusarlo en la caldera podría dañar la caldera y corroer el sistema de retorno de condensados.**

**Ya que la fuga de fluido de proceso es con frecuencia un problema serio que se debe corregir inmediatamente, se usan comúnmente detectores en el sistema de retorno de condensados los que indican la presencia de ácidos de proceso. Estos detectores también se pueden emplear para desviar el condensado del sistema de alimentación de agua a la caldera.**

**Por algunas circunstancias, el recircular directamente el condensado a la caldera puede no justificarse. Pero, el calor en el condensado puede aún recuperarse. El condensado se puede emplear en: 1) el área de proceso en un intercambiador que use ya sea el vapor de flasheo del condensado o el condensado mismo, 2) las operaciones que requieren un suministro continuo de agua caliente, o 3) como fuente de agua caliente de proceso.**

**TABLA IV.1 INTERVALOS DE TEMPERATURA DE SERVICIO DE MATERIALES AISLANTES COMUNMENTE USADOS EN TUBERÍAS.**

| MATERIAL                            | TEMPERATURA EN °F |      |     |     |      |      |      |
|-------------------------------------|-------------------|------|-----|-----|------|------|------|
|                                     | 0                 | 200  | 400 | 600 | 1200 | 1800 | 2400 |
| CALCIO ALUMINA-FERRO SILICATO       |                   |      |     |     |      | 1800 |      |
| SILICATO DE CALCIO                  |                   |      |     |     |      | 1200 |      |
| FIBRAS DE CERAMICA (SILICA ALUMINA) |                   |      |     |     |      |      | 2000 |
| VIDRIO CELULAR                      | -450              |      |     |     |      | 800  |      |
| FIBRA DE VIDRIO                     | -60               |      |     |     | 450  |      |      |
| ELASTOMEROS ESPUMADOS               | -40               |      |     |     | 225  |      |      |
| LANA MINERAL                        | -150              |      |     |     |      |      | 1900 |
| UNTAITE                             |                   | 35   |     |     |      | 460  |      |
| ESPUMA DE URETANO (FLEXIBLE)        |                   | -50  |     |     |      | 200  |      |
| ESPUMA DE URETANO (RIGIDA)          |                   | -250 |     |     |      | 225  |      |



**FIG. IV.1 LISTA DE ESPECIFICACIONES TERMICAS DE AISLAMIENTO DE TUBERIA.**

|                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| TAMAÑO _____ PLG            | REQUERIMIENTOS DE MAT. AISLANTE |
| LONGITUD _____ PIES         | ____ CONDUCTIVIDAD TERMICA      |
| SERVICIO _____ CALIENTE     | ____ RESISTENCIA                |
| _____ FRIO                  | ____ RESISTENCIA QUIMICA        |
| TEMPERATURA DE LA TUBERIA   | ____ RESISTENCIA A LA HUMEDAD   |
| _____ °F MAXIMO             | ____ PESO POR PIE               |
| TEMP. AMBIENTE DEL AIRE     | ESPESOR DEL MATERIAL AISLANTE   |
| _____ °F MAXIMO             | ____ MINIMO(plg)                |
| _____ °F MINIMO             | ____ MAXIMO PERMISIBLE(plg)     |
| _____ °F PROMEDIO           | RECUBRIMIENTO                   |
| CICLO DE SERVICIO           | ____ ESTANDAR SUMINISTRADO      |
| _____ HRS/AÑO               | ____ POR FABRICANTE             |
| LOCALIZACION                | ____ INTEGRAL                   |
| _____ INTERIOR              | ____ SEPARADO                   |
| _____ EXTERIOR              | ____ ESPECIAL                   |
| _____ SOBRE PISO            | CLASIFICACION AL FUEGO          |
| _____ BAJO EL PISO          | ____ AISLAMIENTO                |
| ATMOSFERA                   | ____ CUBIERTA                   |
| _____ CORROSIVA             | ____ CUBIERTA                   |
| (AGENTE DE CORROSION) _____ | COSTO DEL MATERIAL              |
| _____ HUMEDO                | ____ AISLAMIENTO                |
| _____ SECO                  | ____ CUBIERTA                   |
| PERDIDA DE CALOR O GANANCIA | ____ BARRERA DE VAPOR           |
| DE CALOR PERMISIBLE         | TIEMPO DE INSTALACION           |
| _____ BTU/PIE               | ____ HR                         |
|                             | COSTO DE INSTALACION            |
|                             | ____ Dolares/plg                |
|                             | TIEMPO DE ENTREGA               |
|                             | ____ Dias                       |

**TABLA N.2**

**TABLA DE ESPESORES ECONOMICOS PARA MATERIALES  
COMUNMENTE USADOS PARA AISLAMIENTO EN TUBERIAS.**

| NOM. PIPE SIZE, IN. | INSULATION THICKNESS, IN.          |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|---------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                     | When operating temperature (F) is: |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |
|                     | 100                                | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 |
| 0.75                | 0.5                                | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0  | 5.5  | 6.0  | 6.5  |
| 1.00                | 0.5                                | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0  | 5.5  | 6.0  | 6.5  |
| 1.25                | 0.5                                | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0  | 5.5  | 6.0  | 6.5  |
| 1.50                | 0.5                                | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0  | 5.5  | 6.0  | 6.5  |
| 2.00                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 2.50                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 3.00                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 3.50                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 4.00                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 4.50                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 5.00                | 1.0                                | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  |
| 6.00                | 1.5                                | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  |
| 7.00                | 1.5                                | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  |
| 8.00                | 1.5                                | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  |
| 9.00                | 1.5                                | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  |
| 10.00               | 1.5                                | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  |
| 12.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 14.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 16.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 18.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 20.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 24.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 28.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |
| 36.00               | 2.0                                | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  |

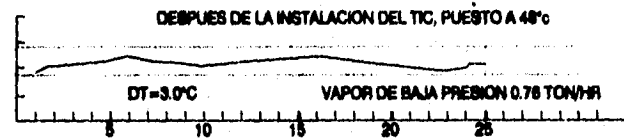
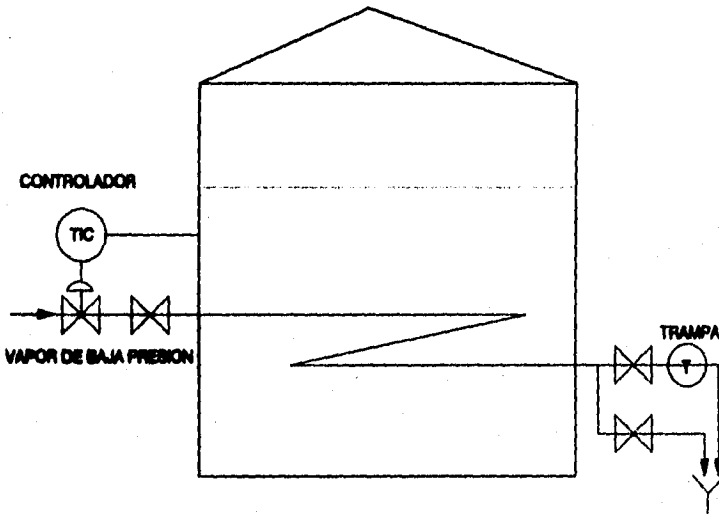
(Based on 18 inches)

| NOM. PIPE SIZE, IN. | INSULATION THICKNESS, IN.          |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|---------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                     | When operating temperature (F) is: |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|                     | 100                                | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| 0.75                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 1.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 1.25                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 1.50                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 2.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 2.50                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 3.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 3.50                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 4.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 4.50                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 5.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 6.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 7.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 8.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 9.00                | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 10.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 12.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 14.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 16.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 18.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 20.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 24.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 28.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |
| 36.00               | 0.2                                | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.5  |

\* These data represent standard thickness that will satisfy most industrial plant conditions, and include allowances for energy cost increases, capital investment, plant depreciation, insulation maintenance cost, and operating time. The thickness calculations were performed according to procedure detailed in "ECON-How to Determine Economic Thickness of Thermal Insulation." Copies of this recently published manual, which was prepared by York Research Corp., are available for \$10 per copy from: Thermal Insulation Manufacturers Association, 7 Kirby Place, Mt. Kisco, NY 10549.

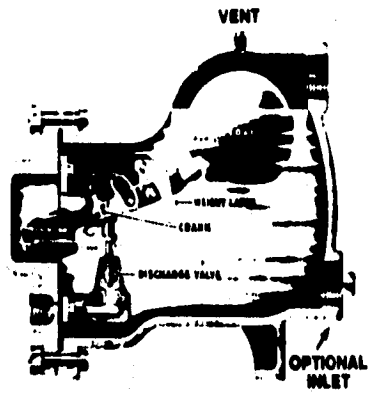
**FIG. IV.2 CONTROLADOR DE TEMPERATURA EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO.**

CAPACIDAD 11,300 KL.

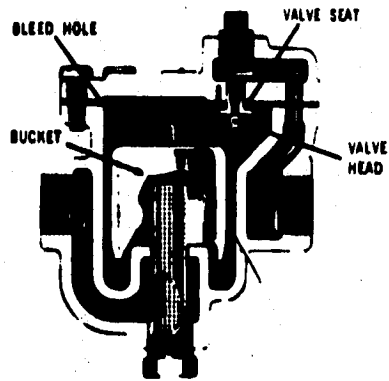


| TIC  | ANTES | DESPUES |
|--|-------|---------|
| DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA REAL Y LA OBJETIVO (°C) | 11.0  | 3.0     |
| CONSUMO DE VAPOR (T/H)                                     | 0.86  | 0.76    |

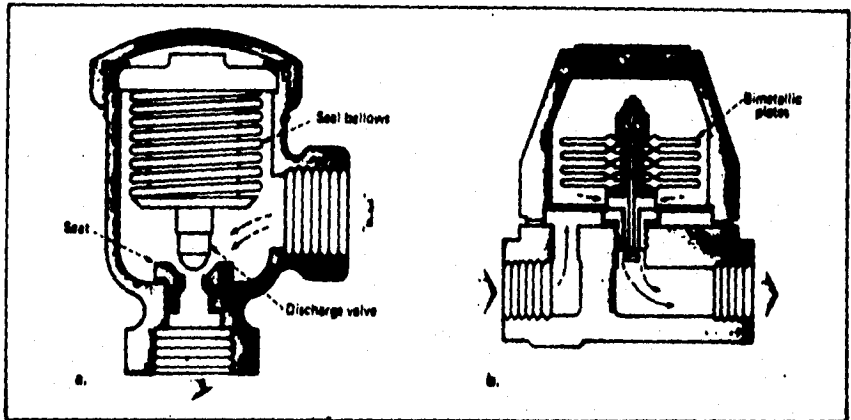
VAPOR AHORRADO: 800 TONS/AÑO



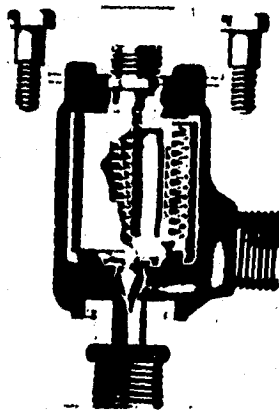
**FIGURA IV.3 TRAMPA TIPO FLOTADOR**



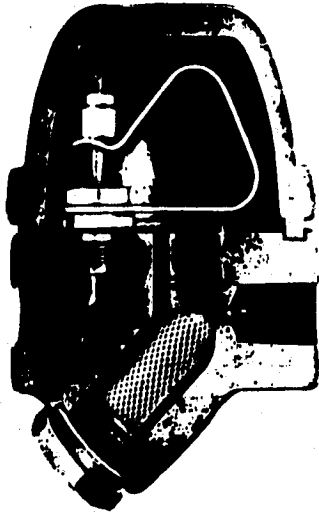
**FIGURA IV.4 TRAMPA DE CUBETA INVERTIDA**



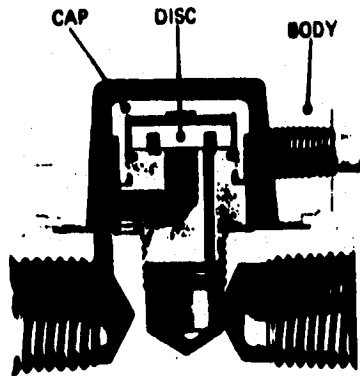
**FIGURA IV.5 TRAMPA TERMOSTATICA TIPO FUELLE (a) Y TIPO BIMETALICA (b).**



**FIGURA IV.6 TRAMPA DE FUELLES (TERMOSTATICA)**



**FIGURA IV.7 TRAMPA BIMETALICA.**

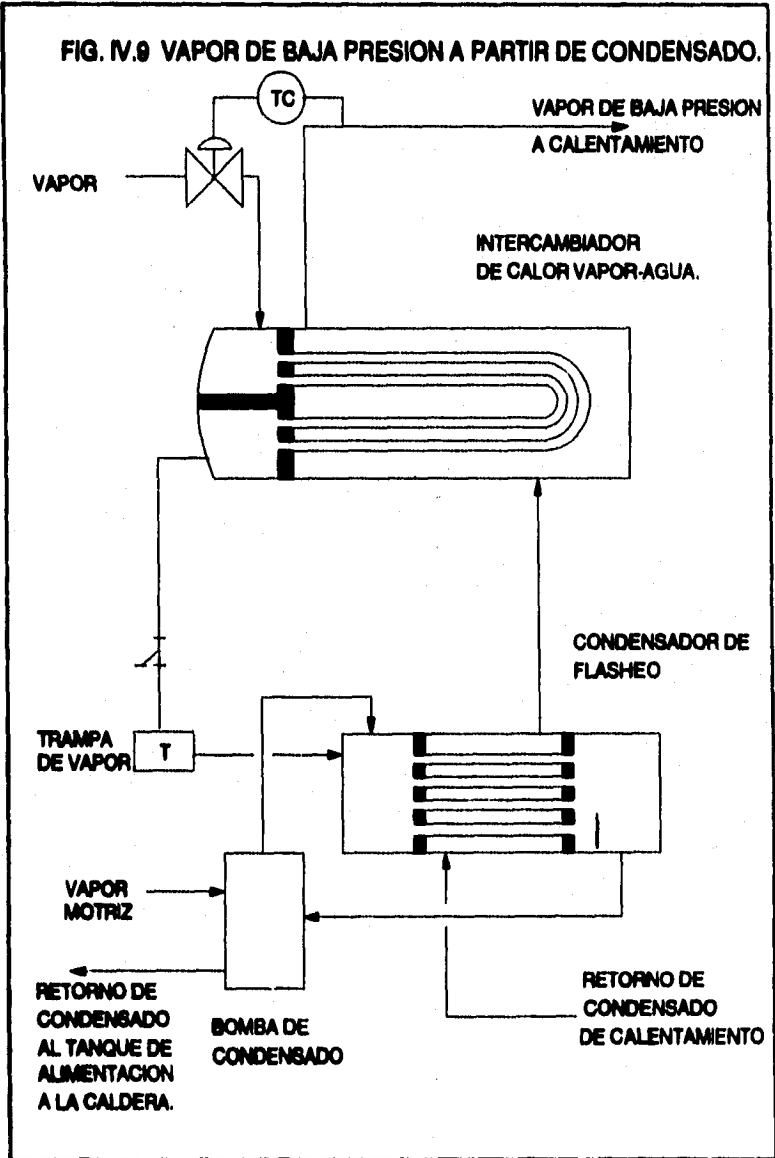


**FIGURA IV.8 TRAMPA TERMODINAMICA DE DISCO**

TABLA N.3 TIPOS DE TRAMPAS DE VAPOR CON CRITERIOS TÍPICOS DE FUNCIONAMIENTO

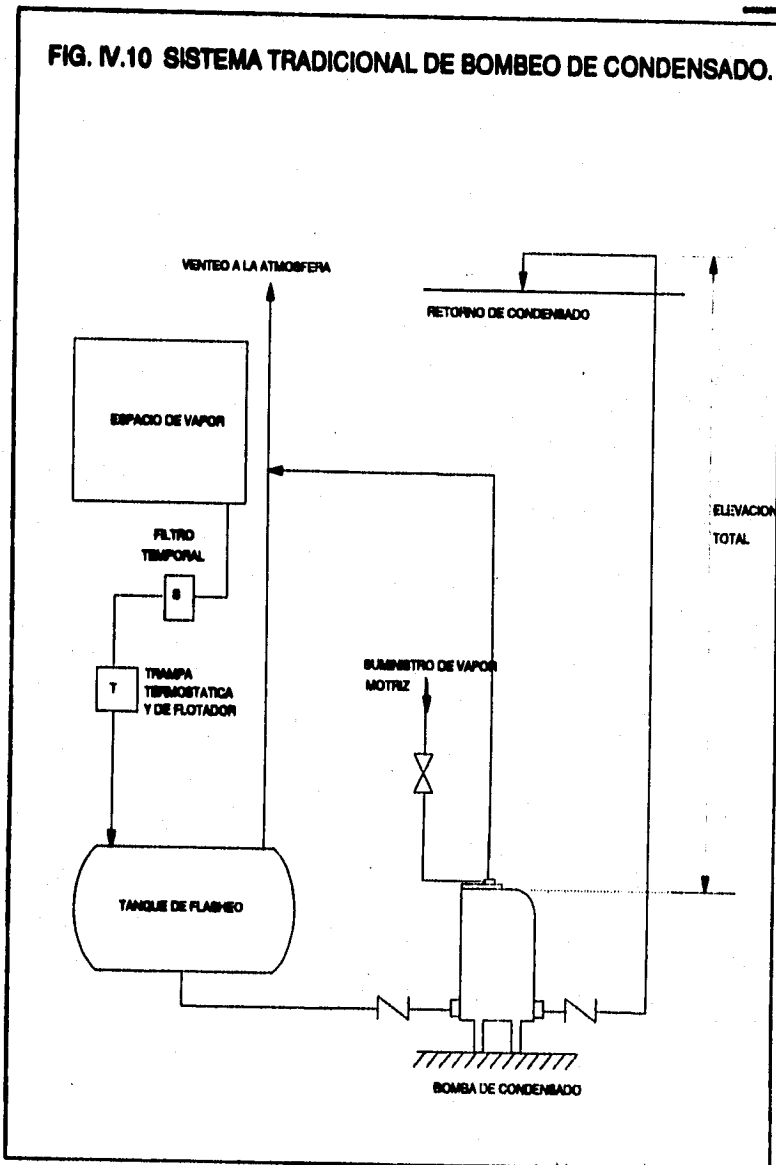
| TIPO                                       | MECANICA            |                               | TERMOSTATICA |         |               | TERMODINAMICA |        |         |
|--|---------------------|-------------------------------|--------------|---------|---------------|---------------|--------|---------|
|  | CUBETA<br>INVERTIDA | FLOTADOR<br>Y<br>TERMOSTATICA | FUELLE       | BIMETAL | DI-<br>FRAGMA | DISCO         | PISTON | PALANCA |
| MODO DE FALLA                              | A ó C               | C                             | A ó C        | A       | A ó C         | A             | A      | A       |
| RANGO DE PRESION<br>AMPLIA                 | NO                  | NO                            | SI           | NO      | SI            | SI            | SI     | SI      |
| FACIL CHEQUEO                              | SI                  | NO                            | NO           | NO      | NO            | SI            | SI     | SI      |
| CAPACIDAD DE MANEJO<br>DEL AIRE            | P                   | E                             | E            | R       | R             | P             | B      | B       |
| MANEJA VAPOR<br>SOBRECALENTADO             | NO                  | NO                            | NO           | SI      | NO            | SI            | SI     | SI      |
| RESPUESTA RAPIDA                           | SI                  | SI                            | SI           | NO      | NO            | SI            | SI     | SI      |
| RESISTENCIA AL GOLPE<br>DE ARIETE CON AGUA | SI                  | NO                            | NO           | SI      | NO            | SI            | SI     | SI      |
| DISEÑO DEL ORIFICIO<br>DE CONTROL          | NO                  | NO                            | NO           | NO      | NO            | NO            | SI     | SI      |
| CARACTERISTICA DE<br>LA DESCARGA           | ON/OFF              | CONT                          | CONT         | CONT    | CONT          | ON/OFF        | ON/OFF | CONT    |

**A=ABIERTA**  
**C=CERRADA**  
**P=POBRE**  
**E=EXCELENTE**  
**R=REGULAR**  
**CONT=CONTINUA**





**FIG. IV.10 SISTEMA TRADICIONAL DE BOMBEO DE CONDENSADO.**



**FIG. IV.11 SISTEMA ALTERNATIVO DE BOMBEO DE CONDENSADO.**

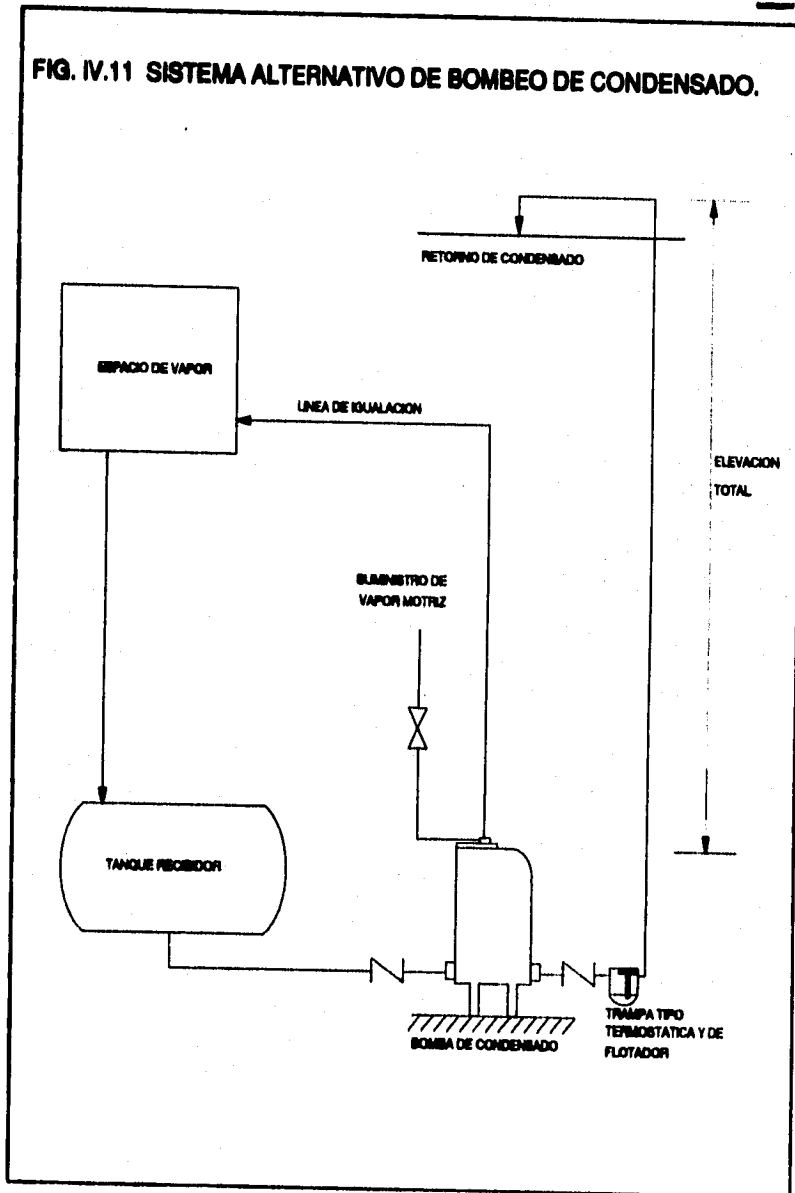
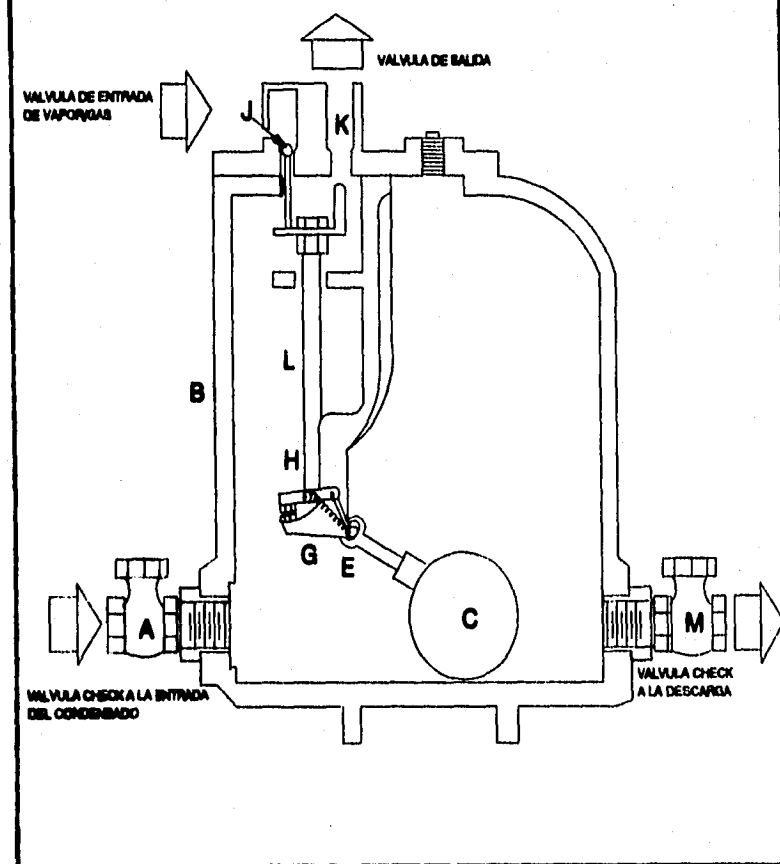


FIG. IV.12 BOMBA DE CONDENSADO OPERADA A PRESION.



**CAPÍTULO V.  
APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE EN EL  
DISEÑO Y REMODELACIÓN DE REDES DE INTERCAMBIO  
TÉRMICO.**

## **V. APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL PUNTO DE PLIEGUE EN EL DISEÑO Y REMODELACIÓN DE REDES DE INTERCAMBIO TÉRMICO.**

Un análisis apropiado de termodinámica puede conducir a mejoras significativas en el ahorro de energía de plantas de proceso.

Es posible identificar las opciones de recuperación de calor como una tarea dentro del diseño de procesos. La que consiste en encontrar la mejor red de intercambiadores, calentadores y enfriadores que manejen las corrientes frías y calientes a un costo de capital anual y de operación mínimos, consistentes con otros objetivos de diseño tales como la operabilidad, controlabilidad, y seguridad.

El costo total de tal red tiende a ser dominado por el tamaño de las demandas de vapor y agua de enfriamiento y por el número de unidades de capital en la red (número total intercambiadores). Como primer paso para el diseño, por lo tanto, se puede establecer el objetivo de generar un diseño que consuma una cantidad mínima de servicios auxiliares y que use el número mínimo de unidades posible.

A este respecto, el método del punto de pliegue ofrece la posibilidad de generar diseños en los que se lleve a cabo una recuperación máxima de energía en redes de intercambio térmico nuevas. Así como la posibilidad de mejorar la recuperación energética en redes de intercambiadores ya existentes debido a que con el método se generan esquemas de integración energética más simples y más apropiados, pudiendo además establecer objetivos para el consumo de energía previos al diseño.

A continuación se describen las etapas a tomar en cuenta en la aplicación del método del punto de pliegue a redes de intercambio de calor para la recuperación de energía.

### **V.1 Formación de las Curvas Compuestas T vs H.**

Las corrientes frías y calientes de un proceso se pueden representar en una gráfica temperatura-entalpía una vez que sus temperaturas de entrada y salida así como sus flujos y propiedades físicas son conocidas.

Empezando por las corrientes individuales es posible construir dos curvas compuestas, una para todas las corrientes calientes en el proceso y otra para todas las corrientes frías, por simple adición de los contenidos de calor sobre el rango de temperaturas del problema.

Esto está ilustrado en la Figura V.1 para un número de corrientes calientes A, B y C que se enfrían a través de los niveles de temperatura indicados.

El resultado de la serie de corrientes frías y calientes se plasma en dos curvas compuestas como se muestra en la Figura V.2. El traslape entre las curvas compuestas representa la recuperación máxima posible de calor dentro del proceso. La diferencia de entalpías en la terminal caliente representa la mínima cantidad de enfriamiento externo requerida y la diferencia en la terminal fría la cantidad mínima de calentamiento externo requerida. A causa de la naturaleza de las curvas, hay un punto en el que existe un acercamiento mínimo, conocido como el Punto de Pliegue.

En la Figura V.3 (a) se muestra el sistema separado en el punto de pliegue.

En la sección arriba del punto de pliegue la curva compuesta caliente cede todo su calor a la curva compuesta fría que requiere sólo calentamiento para la porción restante de la curva compuesta fría. El sistema es por lo tanto un receptor de calor. El calor fluye hacia el sistema a través de un servicio auxiliar de calentamiento y no sale calor del sistema.

Por el contrario, abajo del punto de pliegue el sistema es una fuente de calor. El calor es absorbido por un servicio auxiliar de enfriamiento sin entrar calor al sistema. De aquí, en un diseño que emplea la cantidad de servicios auxiliares mínimos calculados (objetivos), el flujo de calor a través del punto de pliegue es cero.

Sin embargo, la Figura V.3 muestra el caso en el que los consumos mínimos objetivo de servicios auxiliares no se satisfacen. El calentamiento externo se encuentra en exceso (por  $\alpha$ ) del mínimo posible. Por balance de energía alrededor de la fuente y el receptor de calor, debe de existir un flujo de calor  $\alpha$  a través del punto de pliegue y un exceso en el requerimiento de enfriamiento externo auxiliar( $\alpha$ ).

ESTE LIBRO VA EN  
VALOR DE LA BIBLIOTECA

**V.2 Procedimiento Para Definir los Consumos Energéticos Objetivos-"La Tabla Problema".**

Las curvas compuestas descritas podrían usarse para obtener los consumos energéticos para valores dados de  $\Delta T_{min}$  en forma gráfica. Por otro lado, también se puede emplear el método de Linnhoff y Flower conocido como la "Tabla Problema", el cual se describe en seguida, ver Tabla V.1.

Para la construcción de las curvas compuestas los intervalos del balance de entalpía se establecen en base a las temperaturas objetivo y fuente de las corrientes involucradas. Lo mismo se puede hacer para corrientes frías y calientes, para permitir la cantidad máxima posible de intercambio de calor en cada intervalo de temperaturas. La única modificación requerida es asegurar que dentro de cualquier intervalo las corrientes frías y calientes estén separadas por lo menos el  $\Delta T_{min}$ . Esto se hace como se muestra en la Figura V.4. Las corrientes se muestran en forma esquemática con una escala de temperaturas vertical. Los límites de los intervalos de temperatura se sobrepone. Las temperaturas límite de los intervalos se establecen a 1/2 del  $\Delta T_{min}$  abajo de las temperaturas de las corrientes calientes y a 1/2 del  $\Delta T_{min}$  arriba de las temperaturas de las corrientes frías. Así por ejemplo en el intervalo número 2 en la Figura V.4(a), las corrientes 2 y 4 (corrientes calientes) van de 150°C a 145°C, y la corriente 3 (la corriente fría) de 135°C a 140°C.

Establecer los intervalos de esta manera garantiza que sea posible el completo intercambio dentro de cualquier intervalo. De aquí, cada intervalo tendrá ya sea un exceso o un déficit de calor como se indica por el balance de entalpía, pero nunca ambos. Esto se muestra en la Figura V.4(b). Conociendo la población de corrientes en cada intervalo de la Figura V.4(a), se pueden calcular los balances de entalpía de acuerdo con:

$$\Delta H_i = (T_i - T_{i+1})(\sum C_{P\text{frío}} - \sum C_{P\text{caliente}})_i$$

para cualquier intervalo i. La última columna en la Figura V.4(b) indica si un intervalo tiene un déficit o un exceso de calor. Por lo que sería posible un diseño factible de una red basado en la consideración de que todos los intervalos con "exceso" enviarán calor hacia el servicio auxiliar de enfriamiento, y que todos los intervalos con "déficit" tomarán calor de los servicios auxiliares de calentamiento. Sin embargo, esto no sería muy sensato, ya que involucraría el rechazar y recibir calor a temperaturas inapropiadas.

Ahora se puede explotar una característica de los intervalos de temperatura. Es decir, cualquier calor disponible en el intervalo  $i$  está suficientemente caliente para suministrar carga térmica al intervalo  $i+1$ . Esto se muestra en la Figura V.5(a), en donde los intervalos 1 y 2 se usan como ilustración. En lugar de enviar 60kw de exceso de calor del intervalo 1 al servicio auxiliar frío, se puede enviar al intervalo 2. Por lo tanto es posible establecer una "cascada" de calor como se muestra en la Figura V.5(b). Considerando que no se suministra calor al intervalo más caliente (1) a partir del servicio auxiliar de calentamiento, entonces el exceso de 60kw del intervalo uno se envía en forma de cascada al intervalo 2. Allí, se une con los 2.5kw de exceso del intervalo 2, haciendo que se envíen en cascada 62.5kw al intervalo 3. El intervalo 3 tiene un déficit de 82.5kw, de aquí que después de aceptar 62.5 kw se puede decir que está transfiriendo un déficit de 20kw al intervalo 4. El intervalo 4 tiene un exceso de 75kw y así transfiere un exceso de 55kw al intervalo 5. Finalmente, el déficit de 15kw en el intervalo 5 significa que finalmente 40kw es la cantidad de energía que se transfiere en cascada hacia el servicio auxiliar de enfriamiento. Esto de hecho es el balance global de entalpía para el problema. Regresando a los flujos de calor entre los intervalos en la Figura V.5(b), claramente se observa que el flujo negativo de 20kw entre los intervalos 3 y 4 es termodinámicamente imposible.

Para hacerlo factible (igual a cero), se deben adicionar 20kw de calor del servicio auxiliar de calentamiento como se muestra en la Figura V.5(c), y debe ser pasado en forma de cascada a través del sistema. Por balance de entalpía esto significa que todos los flujos se incrementan en 20kw. El resultado neto de ésta operación es que se han calculado los requerimientos mínimos de servicios auxiliares (20kw de calentamiento y 60kw de enfriamiento).

Adicionalmente, se ha localizado la posición del punto de pliegue. Esto es, a la temperatura límite del intervalo de 85°C (corrientes calientes a 90°C y corrientes frías a 80°C), que es en donde el flujo de calor se hace cero.

### V.3 El Significado del "Punto de Pliegue"

La Figura V.6(a) muestra las curvas compuestas para un problema de varias corrientes separado en el punto de pliegue. "Arriba de éste (a la derecha) la curva compuesta caliente transfiere todo su calor a la curva compuesta fría dejando sólo el servicio auxiliar mínimo de calentamiento, por lo que esta región es una receptora de calor, y el calor fluyendo hacia, y no fuera, de ella.



De manera inversa abajo del punto de pliegue sólo se requiere servicio auxiliar mínimo de enfriamiento siendo esta región una fuente de calor. El problema se divide por lo tanto en dos regiones termodinámicamente diferentes siendo cero el flujo de calor a través del punto de pliegue.

De lo anterior se tiene que, en el diseño de una red que transfiera una cantidad de calor( $\alpha$ ) a través del punto de pliegue, por balance de entalpia global, se requerirá una cantidad de calor adicional ( $\alpha$ ) al mínimo de servicios auxiliares de calentamiento y enfriamiento, como se muestra en la Figura V.6.

Por lo que para para efectuar un diseño con un requerimiento de servicios auxiliares mínimo, se tienen que cuidar los siguientes aspectos:

- No transferir calor a través del punto de pliegue.
- No emplear servicio de enfriamiento arriba del punto de pliegue.
- No usar servicio de calentamiento abajo del punto de pliegue.

#### **V.4 Diseño Para Obtener la Mejor Recuperación de Calor. Representación de la Red.**

La red de intercambio de calor puede representarse como se muestra en la Figura V.7, con el punto de pliegue representado como una línea punteada vertical. Arriba del punto de pliegue las corrientes calientes son enfriadas de sus temperaturas de suministro a la temperatura del punto de pliegue, y las corrientes frías se calientan de la temperatura de punto de pliegue a sus temperaturas objetivo. Abajo del punto de pliegue la acción es inversa siendo las corrientes frías calentadas de la temperatura de punto de pliegue a sus temperaturas objetivo mientras que las corrientes frías son calentadas de sus temperaturas de suministro a la temperatura del punto de pliegue.

Con objeto de no tener transferencia de calor a través del punto de pliegue por arriba de este no se debe usar servicio auxiliar de enfriamiento, por lo que todas las corrientes calientes se deben de llevar a la temperatura del punto de pliegue por intercambio con las corrientes frías. Por lo que debemos empezar el diseño en el punto de pliegue, encontrando las combinaciones que cumplan esta condición.

En el ejemplo, arriba del punto de pliegue existen dos corrientes calientes a la temperatura del punto de pliegue, requiriendo por lo tanto dos combinaciones de "punto de pliegue". En la Figura V.8 (a) se muestra la combinación entre las corrientes 2 y 1. Ya que el CP de la corriente 2 es mayor que el de la 1, tan pronto como cualquier carga se coloque en la combinación, la  $\Delta T$  en el intercambiador se hace menor que la  $\Delta T_{min}$  en su extremo caliente. El intercambiador es claramente no factible y por lo tanto se debe buscar otra combinación. En la Figura V.8 (b), se combinan las corrientes 2 y 3, y ahora los gradientes relativos de las gráficas T vs H significan que poner carga al intercambiador abre la  $\Delta T$ . Esta combinación es por lo tanto aceptable. Si se tiene que tomar una decisión de diseño firme, entonces la corriente 4 se tiene que llevar a la temperatura del punto de pliegue combinándola con la corriente 1 (única opción restante para la corriente 4) observando los valores relativos de los CPs para las corrientes 4 y 1, la combinación es factible ( $CP_4 \leq CP_1$ ). No hay más corrientes que requieran ser enfriadas a la temperatura del punto de pliegue por lo que se ha encontrado un diseño factible de punto de pliegue. Este es el único diseño factible de punto de pliegue ya que sólo se requieren dos combinaciones de punto de pliegue. Así, para diseñar inmediatamente arriba del punto de pliegue, se requiere satisfacer el siguiente criterio de CPs:

$CP \text{ corriente caliente} \leq CP \text{ corriente fría}$

Habiendo encontrado una combinación factible en el punto de pliegue, es necesario decidir sobre las cargas de calor de la combinación, de tal manera que se satisfaga a una de las corrientes. La recomendación es "maximizar la carga de calor de tal manera que se satisfaga completamente la carga de una de las corrientes". Esto asegura que se use el número mínimo de unidades.

Ya que la corriente 2 arriba del punto de pliegue requiere 240kw de enfriamiento y la corriente 3 abajo del punto de pliegue requiere 240kw de calentamiento la combinación de estas corrientes se satisface mutuamente. Sin embargo, la combinación 4-1 sólo puede satisfacer a la corriente 4, teniendo una carga de 90 kw y por lo tanto calentando a la corriente 1 sólo hasta 125°C. Ya que ambas corrientes calientes han sido completamente agotadas en estos dos pasos del diseño, la corriente 1 se debe calentar de 125°C hasta su temperatura de suministro de 135°C con calentamiento auxiliar externo como se muestra en la Figura V.8(c). Esto da 20kw, como se muestra por el análisis de la Tabla Problema.

El diseño ha sido unido obedeciendo la restricción de no transferir calor a través del punto de pliegue (la sección "arriba del punto de pliegue" ha sido diseñada independiente de la sección de "abajo del punto de pliegue" sin usar servicio auxiliar de enfriamiento arriba del mismo.

Abajo del punto de pliegue, se sigue la misma filosofía de diseño. En la Figura V.9 (a) se muestran las corrientes abajo del punto de pliegue, ahora lo que se requiere es llevar las corrientes frías a la temperatura del punto de pliegue intercambiando calor con las corrientes calientes, ya que no se desea usar servicio auxiliar de calentamiento abajo de este punto. En el ejemplo sólo existe una corriente abajo del punto de pliegue que se debe combinar con una de las dos corrientes calientes disponibles. La combinación entre las corrientes 1 y 2 es factible como se muestra en el diagrama de la Figura V.9(a) ya que el CP de la corriente caliente es mayor que el de la corriente fría. La otra combinación (corriente 1 con 4) no es factible ya que el CP de la corriente caliente es menor que el CP de la corriente fría.

Inmediatamente abajo del punto de pliegue el criterio necesario es que:

$CP \text{ corriente caliente} \geq CP \text{ corriente fría}$

Maximizar la carga en esta combinación satisface a la corriente 2, siendo la carga de 90 kw. El calentamiento requerido por la corriente 1 es de 120 kw y por lo tanto se requieren 30 kw de calentamiento adicional para llevar a la corriente 1 de su temperatura de suministro de 20°C a 35°C. De nuevo esto debe venir del intercambio con una corriente caliente, siendo la corriente 4 la única disponible. Aunque la desigualdad en CP no se mantiene para esta combinación, esta es factible ya que está lejos del punto de pliegue. Lo que quiere decir que no es una combinación que tenga que llevar la corriente fría a la temperatura del punto de pliegue. Así, como se muestra en la Figura V.9 (b), la combinación no se hace imposible. Poner una carga de 30kw en esta combinación deja un enfriamiento residual de 60kw en la corriente 4 que debe ser absorbido por un servicio auxiliar frío. lo que también se sabe por medio del análisis de la tabla problema.

Uniendo las partes superior e inferior del punto de pliegue se obtiene el diseño global que se muestra en la Figura V.10. Esta efectúa el mejor uso posible de la energía para una  $\Delta T$  de 10°C incorporando cuatro intercambiadores, un calentador y un enfriador.

### V.5 Balance Entre Costo de Capital y Energía.

El costo de capital de los procesos químicos tiende a ser dominado por el número de equipos involucrados en el proceso. Por lo que en redes de intercambiadores existe un fuerte incentivo para reducir el número de combinaciones entre las corrientes calientes y frías.

El número mínimo de unidades incluyendo calentadores y enfriadores en una red se determina por la siguiente ecuación:

$$U_{\min} = N + L - s$$

en donde:

U=número de unidades incluyendo calentadores y enfriadores.

N=número de corrientes incluyendo servicios auxiliares.

L=número de circuitos.

s=número de sistemas por separado.

Normalmente se desean evitar unidades extras, y se diseña para  $L=0$  y también para  $s=1$ . Esto conduce a la ecuación de objetivos:

$$U_{\min} = N - 1$$

### V.6 Establecimiento de Objetivos Para Determinar el Número Mínimo de Unidades.

La figura V.11(a) muestra como la ecuación de objetivos se aplica a un diseño con "recuperación máxima de energía". El punto de pliegue divide al problema en dos regiones termodinámicamente independientes, la ecuación de objetivos se debe aplicar a cada una por separado.

El total de unidades para el problema global, "Umre (unidades para una recuperación máxima de energía)", es la suma de las  $U_{\min}$ s para cada región. Suponiendo, sin embargo, que se transfieren  $\alpha$  unidades de calor a través del punto de pliegue como se muestra en la Figura V.11 (b), incrementando así los servicios auxiliares calientes y fríos por  $\alpha$ . Ahora las regiones no son

termodinámicamente independientes. Aplicando la ecuación para el establecimiento de objetivos al problema total de "energía inactiva", ignorando el punto de pliegue, se llega a la conclusión de que:

$$U_{\min} \leq U_{\min \text{ mre}}$$

Esto sucede ya que al establecer objetivos para el diseño de la red de MRE (máxima recuperación de energía) las corrientes que cruzan el punto de pliegue se cuentan dos veces. La conclusión es de que hay un equilibrio entre la recuperación de energía y el número de unidades empleado.

Refiriéndose al problema de la Figura V.7 y aplicando la fórmula para establecer objetivos a las terminales fría y caliente, se obtiene:

$$U_{\min \text{ mre}} = (5-1) + (4-1) = 7$$

Así, el no. de unidades para una recuperación máxima de energía = 7.

Sin embargo, el diseño final de la Figura V.10 tiene sólo 6 unidades. La razón es la co-incidencia de los datos mencionados en la descripción del diseño de la terminal caliente. Arriba del punto de pliegue como se muestra en la Figura V.8(c), la corriente 2 y 3 forman una subserie, permitiendo que la terminal caliente tenga 3 unidades en lugar de 4 ( $s=2$ ). Aplicando la fórmula para definir objetivos al problema global ignorando el punto de pliegue se obtiene:

$$U_{\min} = (6-1) = 5$$

$$6 = (4 \text{ corrientes} + 2 \text{ servicios auxiliares})$$

De aquí que transfiriendo energía a través del punto de pliegue el campo para reducir el número de unidades es 1.

## V.7 Equilibrando Unidades y Energía.

Ya que el diseño mostrado en la Figura V.10 tiene 6 unidades, en lugar del mínimo de 5 para el problema total ignorando el punto de pliegue, debe existir un circuito en el sistema. El circuito se muestra trazado con una línea punteada en la Figura V.12(a). Ya que hay un circuito en el sistema, se puede seleccionar la carga en una de las combinaciones que se encuentren en el

circuito. Si se selecciona que la carga de la combinación 4 sea cero, se substraen 30 kw de carga del valor de diseño, se elimina la combinación 4 y los 30 kw se deben cargar a la combinación 2, la otra combinación en el circuito. Esto se muestra en la Figura V.12(a). Transfiriendo carga de esta manera, las temperaturas en la red se pueden calcular como se muestra en la Figura V.12(b). Ahora, el valor de  $\Delta T$  en la terminal fría de la combinación 2 es menor que el valor permitido ( $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ ). Las temperaturas violatorias se muestran en rectángulos.

En realidad, se pudo haber anticipado que ocurriría una "violación de la  $\Delta T$  min" "rompiendo" el circuito de esta manera por consideración de la Figura V.12(a). El circuito conecta ambos lados del punto de pliegue. Por lo que cambiando este diseño al romper el circuito, si el uso de servicios auxiliares no se cambia, debe conducir inevitablemente a la violación del  $\Delta T$  min. En algunos problemas el rompimiento del circuito puede causar diferencias de temperatura que sean termodinámicamente imposibles.

Para restaurar la  $\Delta T$  min, se puede explotar una trayectoria a través de la red, como se muestra en la Figura V.13(a). Una trayectoria es una conexión a través de corrientes e intercambiadores entre los servicios auxiliares calientes y fríos. La trayectoria a través de la red en la Figura V.13(a) se muestra punteada yendo desde el calentador, a lo largo de la corriente 1 a la combinación 2, a través de la combinación 2 a la corriente 4, y a lo largo de la corriente 4 al enfriador. Si adicionamos una carga X al calentador, entonces por balance de energía la carga en la combinación 2 debe reducirse por X y la carga al enfriador incrementarse por X. Se ha "aplicado" calor extra X al sistema, reduciendo por lo tanto la carga en la combinación 2 por X. Ahora la combinación 3 no está en la trayectoria, y así su carga no se afecta por esta operación. De aquí la temperatura en la corriente 1 en el lado caliente de la combinación 3 permanece en  $65^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, reduciendo la carga en la combinación 2 debe incrementar  $T_2$ , abriendo así la  $\Delta T$  en su terminal fría. Esto es exactamente lo que se requiere para restablecer la  $\Delta T_{\min}$ . Hay claramente una relación simple entre  $T_2$  y X. La disminución de temperatura en la corriente 4 en la combinación 2 es  $(120 \cdot X)$  dividido por el  $C_p$  de la corriente 4. De aquí:

$$150^{\circ}\text{C} - (120 \cdot X)/1.5 = T_2$$

$$30^{\circ}\text{C} + (60 \cdot X)/1.5 = T_2$$

Ya que  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ , se quiere restablecer  $T_2$  a  $75^{\circ}\text{C}$  se obtiene que  $X=7.5$  kw. Ya que la  $\Delta T_{\min}$  se restablece exactamente, 7.5 kw debe ser la cantidad de energía mínima de sacrificio requerida para producir una solución de  $U_{\min}$ (no. de unidades mínimo) a partir de la solución de  $U_{\min MRE}$ (no. mínimo de unidades para una recuperación máxima de energía. La solución "relajada" se muestra en la Figura V.13(b).

#### **V.8 El Papel de la $\Delta t$ mín.**

Existe una correlación entre la  $\Delta T_{\min}$  y el uso de los servicios auxiliares. La forma de definir la  $\Delta T_{\min}$  económica es por medio del equilibrio (balance) entre la energía gastada y el costo de capital.

Una gráfica de costo de capital anualizado vs  $\Delta T_{\min}$ , y costo de energía vs  $\Delta T_{\min}$ , toman la forma general de la Figura V.14. A medida que los gradientes de energía se incrementan, caracterizados por aumentar la  $\Delta T_{\min}$ , el costo de capital descende (de infinito a  $\Delta T_{\min}=0$ ) y los costos de energía se incrementan. El costo total pasa por lo tanto por un mínimo.

#### **V.9 Casos en los que no se requiere ya sea Servicio Auxiliar de Calentamiento o Servicio Auxiliar de Enfriamiento.**

Normalmente todos los problemas de redes de intercambio térmico requieren de servicio auxiliar de calentamiento y de enfriamiento. En la Figura V.15(a) se muestran dos curvas compuestas para una  $\Delta T_{\min}$  dada, en las que se requiere vapor de calentamiento y agua de enfriamiento.

Sin embargo, si el valor de  $\Delta T_{\min}$  se reduce al cambiar las curvas conjuntamente, habrá un punto en dónde la necesidad por uno de los dos servicios auxiliares desaparezca como se muestra en la Figura V.15(b). En este caso, la necesidad de usar enfriamiento auxiliar desaparece. El valor de  $\Delta T$  al cual esto sucede se denomina " $\Delta T_{\text{umbra}}l$ ". Si las curvas se mueven juntas adicionalmente, esto no ocasiona un cambio adicional en los requerimientos de servicios auxiliares. Más bien, esto significa que parte del calentamiento auxiliar se puede suministrar en la terminal de baja temperatura del problema, como se muestra en la Figura V.15(c). De aquí que, para valores de  $\Delta T_{\min}$

menores que el  $\Delta T_{\text{umbral}}$  no hay equilibrio entre energía y capital, ya que el uso de servicios auxiliares es constante.

En la Figura V.15(d) se muestra la gráfica para  $\Delta T_{\text{min}}$  versus el uso de servicios auxiliares para este tipo de problema, con  $\Delta T_{\text{umbral}}$ . Del  $\Delta T_{\text{min}}=0$  al  $\Delta T_{\text{min}}=\Delta T_{\text{umbral}}$  el calentamiento auxiliar es invariante, y a  $\Delta T$  mínimos mayores surge la necesidad del segundo servicio auxiliar y ambos servicios se incrementan paralelamente. Esto contrasta con lo que sucede con un problema de tipo "punto de pliegue" que se muestra en la Figura V.15(e) en donde ambos servicios están siempre presentes y son función de la  $\Delta T_{\text{min}}$ .

Aunque puede no haber equilibrio entre la energía y el capital para un  $\Delta T_{\text{min}} < \Delta T_{\text{umbral}}$ , esto no significa que todos los problemas de umbral no presenten un equilibrio. A pesar de que para valores de  $\Delta T_{\text{min}}$  hasta el valor del  $\Delta T_{\text{umbral}}$ , la energía es invariante, es posible incrementar la  $\Delta T_{\text{min}}$  más allá de este valor y decrecer el costo total (energía + capital anualizado). En este caso el valor económico de  $\Delta T_{\text{min}}$  cae en algún lugar de la región de equilibrio y para propósitos prácticos el problema cae en uno de tipo punto de pliegue.

#### V.10 División de Corrientes.

En problemas más complejos que el mostrado se requieren reglas y lineamientos adicionales. Estos, constituyen una parte importante del "Método de Diseño del Punto de Pliegue" de Linnhoff y Hindmarsh, método de diseño de redes que se ha descrito en este capítulo.

En la Figura V.16(a) se muestra una serie de corrientes que pasa por arriba del punto de pliegue lo que indica que todas las corrientes calientes se deben enfriar a la temperatura del punto de pliegue por intercambio con corrientes frías. En la Figura V.16(a) hay tres corrientes calientes y dos frías, y así, no importando los Cps de las corrientes, una de las corrientes calientes no puede enfriarse a la temperatura del punto de pliegue por intercambio, la única manera es dividir una de las corrientes frías como se muestra en la Figura V.16(b) en dos ramales paralelos. Ahora el número de corrientes frías más los ramales es igual al número de corrientes calientes y así todas las corrientes calientes pueden intercambiar calor hasta la temperatura del punto de pliegue. De aquí, además del criterio de factibilidad de Cp se tiene el criterio del número de corrientes, para la región arriba del punto de pliegue se tiene que:



$$N_{\text{CALIENTES}} \leq N_{\text{FRÍAS}}$$

En donde:

$N_{\text{CALIENTES}}$  = número de corrientes calientes en el punto de pliegue (incluyendo corrientes totales y divididas).

$N_{\text{FRÍAS}}$  = número de ramales fríos en el punto de pliegue (incluyendo corrientes totales y divididas).

Observando la Figura V.16 (c). El criterio del número de corrientes se satisface (una corriente caliente contra dos corrientes frías) pero el criterio de Cps no se cumple para ninguna de las dos combinaciones posibles. En este caso la solución es dividir una corriente caliente, no obstante algunas veces es mejor dividir una corriente fría como se muestra en la Figura V.16(e) el criterio del número de corrientes se cumple, pero después que la corriente caliente de  $CP=7.0$  se combina con la única corriente fría suficientemente grande ( $CP=12.0$ ), la corriente restante de  $CP=3.0$  no se puede combinar con la corriente fría restante de  $CP=2.0$ . Si ahora una corriente caliente se fuera a dividir, entonces el criterio del número de corrientes no sería satisfecho y una corriente fría tendría por lo tanto que ser dividida.

Por consiguiente, resulta más conveniente dividir la corriente grande fría desde el principio como se muestra en la Figura V.16(f), generando una solución con sólo una división.

Finalmente, se puede decir que la división de corrientes en el punto de pliegue comúnmente se requiere para generar un diseño con una recuperación máxima de energía. En algunos casos esto puede no ser una característica deseable. Sin embargo, las divisiones se pueden eliminar del diseño por relajación energética, de manera similar a la relajación energética para reducir el número de unidades.

#### V.11 Rearreglo de Redes de Intercambio Térmico.

De manera creciente, el Ingeniero Químico se enfrenta con el problema de encontrar formas de mejorar la eficiencia energética de unidades de producción existentes. En seguida se describe un método que muestra una estrategia lógica.

Las Figuras V.17(a) y (b) muestran una representación esquemática de la población de diseños factibles de redes de intercambio térmico y la recuperación de energía. La población está dispersa a una recuperación máxima de energía, pero se incrementa, algunas veces grandemente, a medida que los gradientes se incrementan y la recuperación de energía disminuye (se relaja). El diseño existente será uno de muchos hacia la base de la "pirámide".

Empezar con este diseño como base para encontrar diseños mejorados no es una buena idea. El mejor diseño normalmente no estará dentro de un intervalo fácil de pasos evolutivos para las rutas obvias (Figura V.17(a)). Sin embargo, usando la síntesis de redes de intercambio de calor para generar un diseño con recuperación máxima de energía, se obtiene un punto de partida en la parte superior de la pirámide (Figura V.17(b)). Ahora el diseñado tiene una vista preliminar de la solución y por medio de las rutas evolutivas obvias puede dirigirse hacia cualquier parte. La filosofía se ilustra en las Figuras V.18 y V.19. En la Figura V.18(a) se muestra un diseño existente. Aplicando el método de fijación de objetivos de energía, para un  $\Delta T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$  se requiere una carga térmica auxiliar objetivo de calentamiento de  $106.4 \times 10^3$  kw y una carga térmica auxiliar objetivo de enfriamiento de  $85.7 \times 10^3$  kw. Generando un diseño de máxima recuperación de energía, sólo hay una opción arriba del punto de pliegue que se muestra en la Figura V.18(b). El calentador y la combinación 1 están ambos presentes en el diseño del caso base, pero la combinación entre las corrientes 2 y 5 representan una "nueva" combinación. Abajo del punto de pliegue (Figura V.18(c)), el método de diseño del punto de pliegue requiere una combinación de punto de pliegue, por ejemplo entre las corrientes 1 y 5, que no está presente en el caso base. Después de efectuar la combinación, hay varias opciones para completar el diseño. La filosofía de la estrategia es, donde haya opciones, escoger aquellas en donde exista compatibilidad con el diseño existente. Esta filosofía dicta el diseño para la parte de abajo del punto de pliegue que se muestra en la Figura V.18(c), no requiriendo combinaciones adicionales. Uniendo los diseños para arriba y abajo del punto de pliegue se obtiene el diseño con recuperación de energía máxima que se muestra en la Figura V.19(a).

Este requiere una división de corrientes que no está presente en el caso base, y dos nuevas combinaciones. Para desarrollar este diseño a un sacrificio mínimo de energía de regreso hacia el diseño del caso base, el primer objetivo es la "nueva" combinación con una carga de  $22.1 \times 10^3$  kw eliminando la combinación al romper el circuito que se marca con línea punteada en la Figura V.19(a), se obtiene la red de la Figura V.19(b). Esta red tiene ahora dos

combinaciones no factibles, que requieren que se efectúe una relajación de energía a lo largo de la trayectoria que se muestra. Si se restablece el  $\Delta T_{\min}$ , se obtiene el diseño en la Figura V.19(c). Es importante notar que fue necesario relajar para los 22.1kw x 10<sup>2</sup>kw totales que se perdieron en la combinación eliminada. También es importante remarcar que la relajación de la energía condujo a la eliminación de la división de corriente. El rompimiento de circuitos y la relajación de energía adicionales con una  $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$  conduce al diseño en la Figura V.19(d). Notar que este es el mismo diseño topológico (arreglo de unidades) que el del caso base. Comparado con el caso base, la energía ha sido "sujetada" a lo largo de la trayectoria mostrada, con el incremento de carga en las combinaciones 1 y 3 y el decremento de carga en la combinación 2.

El siguiente paso es efectuar una evaluación de todos los diseños producidos, comparándolos con el diseño del caso base. En esta etapa, se abandona el  $\Delta T_{\min}$  y se evalúan los efectos de los cambios de la red en las unidades individuales. Esto se hace de manera simple por "análisis de Unidades de Area". Aplicando la ecuación  $U.A.=Q/UT_{ML}$  a cada unidad, se evalúa el efecto de los cambios en la red en el área total, con la suposición de que  $U$  permanece constante en cada unidad. Así, por ejemplo en el diseño de máxima recuperación de energía que se muestra en la Figura V.19(a), la combinación I es 2.35 veces el tamaño de su caso base, en parte debido a la carga incrementada y en parte a causa de su gradiente de energía reducido. Habiendo hecho esto, las cargas se deben de cambiar alrededor de los circuitos o a lo largo de las trayectorias en las redes para restablecer los valores de  $UA$  tanto como sea posible a sus valores en el caso base, pero sin eliminar unidades. Notar que se debe hacer completo uso de cualquier capacidad muerta que una unidad pueda tener disponible. Como resultado, se puede generar una tabla en la que se ordenen las posibles esquemas de mejoramiento en términos del uso de energía y listando las modificaciones necesarias para cada equipo. (Notar que la topología para la máxima recuperación de energía es la que se muestra en la Figura V.19(a), la topología del diseño es la mostrada en la Figura V.19(c), y la topología II de diseño la mostrada en la Figura V.19(d). De esta tabla, las "mejores opciones" se identifican para una evaluación adicional, involucrando la simulación detallada del comportamiento de la red.

## **V.12 Aspectos Adicionales en la Aplicación del Método del Punto de Pliegue.**

**Extracción de datos.**- Es importante que los datos se extraigan apropiadamente del diagrama de flujo para asegurar que se obtenga una red óptima de intercambio térmico. Lo mismo sucede para la remodelación de redes existentes de intercambio térmico, de otra manera los resultados no podrán ser confiables.

**Exactitud de los datos.**- En la descripción de la forma para establecer los objetivos se ha considerado que todas las corrientes tienen Cps independientes de la temperatura, sin embargo, los problemas reales dependen hasta cierto grado siempre de la temperatura por lo que es importante saber cuando es importante la aproximación lineal y cuando no.

Por otro lado, es importante remarcar que en la práctica las redes con una recuperación máxima de energía no son las que también presenten una buena operabilidad por lo que para que una red tenga ambas características es necesario relajar la recuperación energética.

Adicionalmente, cabe señalar que el diseñador se enfrenta siempre con mucho más restricciones que las meramente termodinámicas al diseñar las redes de intercambio térmico, evitándose en muchos casos la combinación entre un par dado de corrientes por motivos de corrosión, contaminación de un fluido con otro, seguridad, tramos muy largos de tubería requeridos, o bien por problemas de control.

El imponer la prohibición del intercambio térmico entre dos corrientes dadas puede o no afectar la recuperación de energía de una red dada.

Finalmente, el poder establecer objetivos en cuanto al consumo de energía y al número mínimo de unidades previo al diseño de una red de recuperación de calor es de gran ayuda en el diseño e integración del proceso.

Figura V.1- CONSTRUCCION DE LAS 'CURVAS COMPUESTAS'

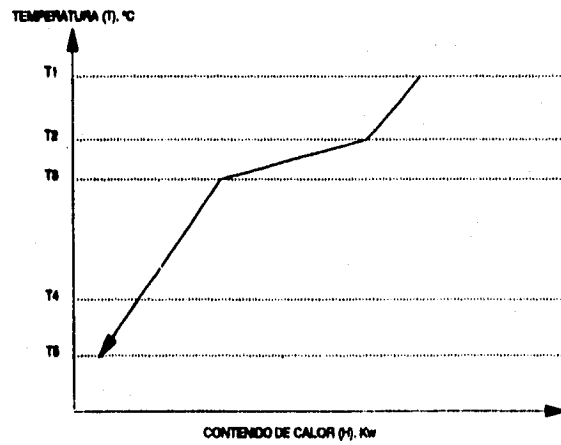
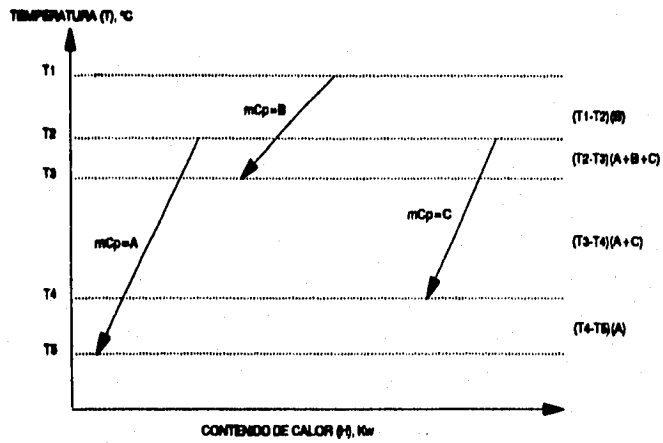


Figura V.2- PREDICCIÓN DE LOS OBJETIVOS ENERGÉTICOS USANDO CURVAS COMPUESTAS.

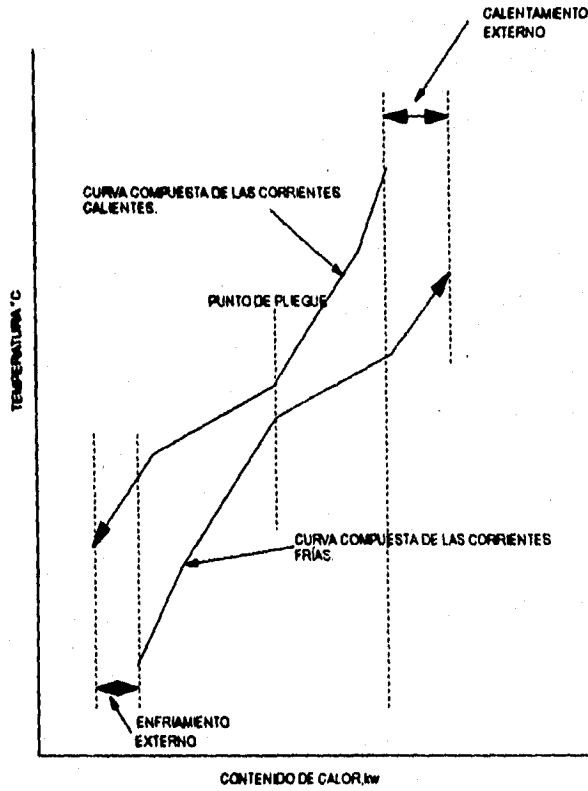
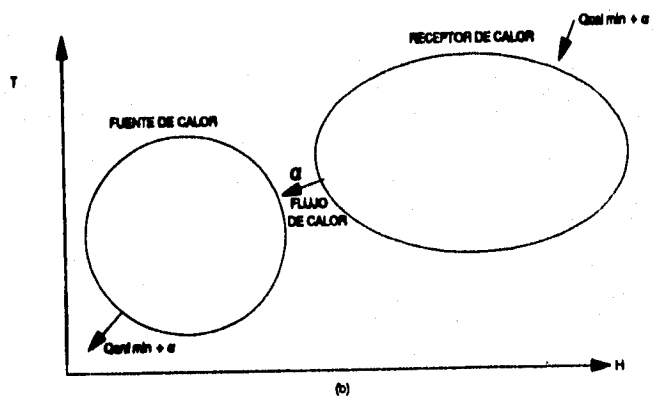
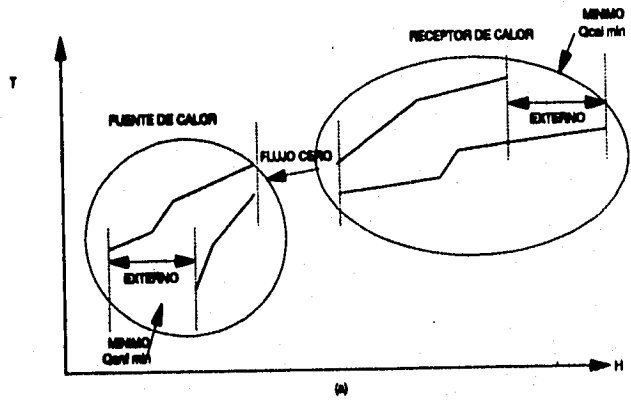


Figura V.3- CARACTERISTICAS DE LA FUENTE Y EL RECEPTOR DE CALOR EN SISTEMAS DE INTERCAMBIO DE CALOR.



**TABLA V.1 "TABLA PROBLEMA"**

**DT mín=10°C**

| <b>CORRIENTE</b>    | <b>FLUJO DE CALOR<br/>WCP (kw/°C)</b> | <b>T SUMINISTRO (°C)</b> | <b>T OBJETIVO (°C) <sub>T2</sub></b> |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| <b>(1) FRIA</b>     | <b>2</b>                              | <b>20</b>                | <b>135</b>                           |
| <b>(2) CALIENTE</b> | <b>3</b>                              | <b>170</b>               | <b>60</b>                            |
| <b>(3) FRIA</b>     | <b>4</b>                              | <b>80</b>                | <b>140</b>                           |
| <b>(4) CALIENTE</b> | <b>1.5</b>                            | <b>150</b>               | <b>30</b>                            |



Figura V.4- ANÁLISIS DEL INTERVALO DE TEMPERATURA

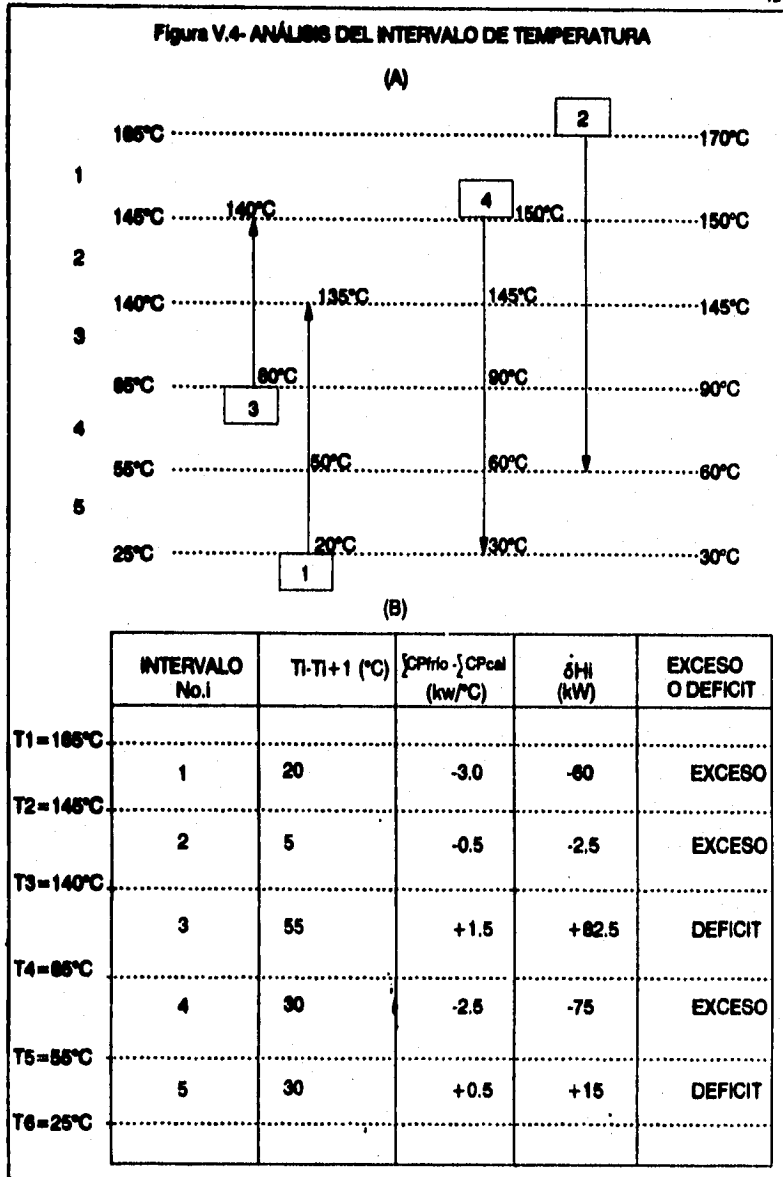


Figura V.5- EL PRINCIPIO DE LA CASCADA DE CALOR-  
 PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA AUXILIAR OBJETIVO  
 POR MEDIO DEL ANÁLISIS DE "LA TABLA PROBLEMA"

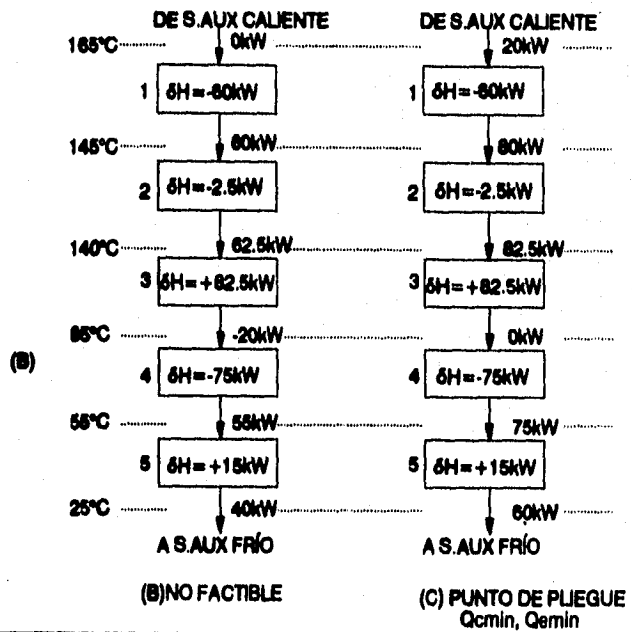
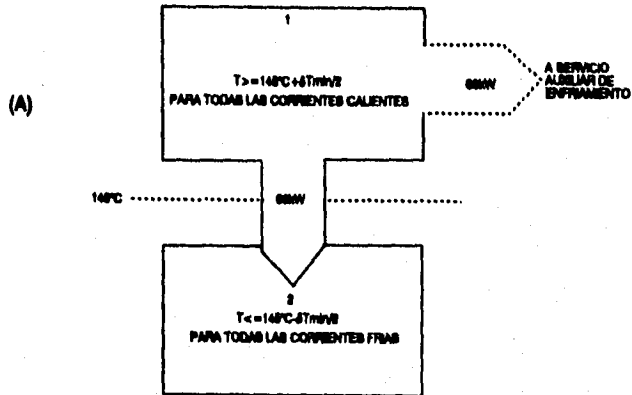
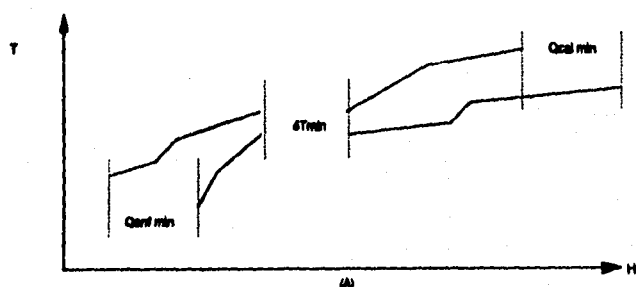
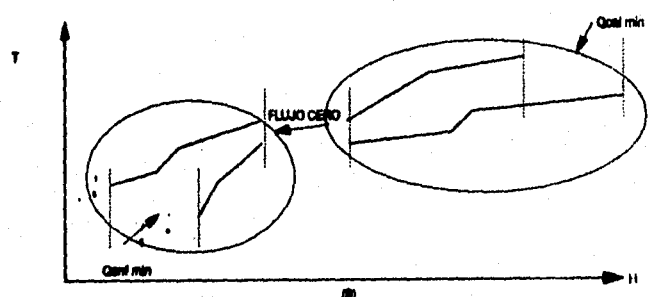


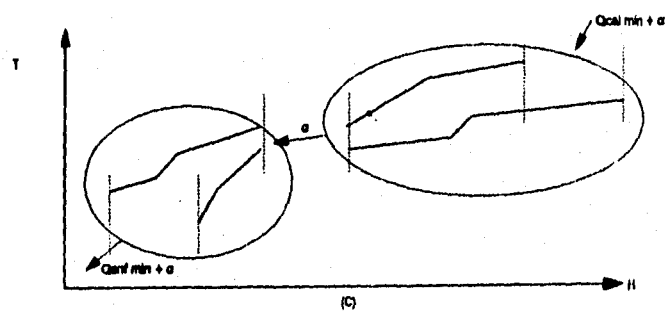
Figura V.6- DIVISION EN EL PUNTO DE PUEGUE



(A)



(B)



(C)

Figura V.7- CORRIENTES DEL PROBLEMA MOSTRANDO EL PUNTO DE PLEGUE

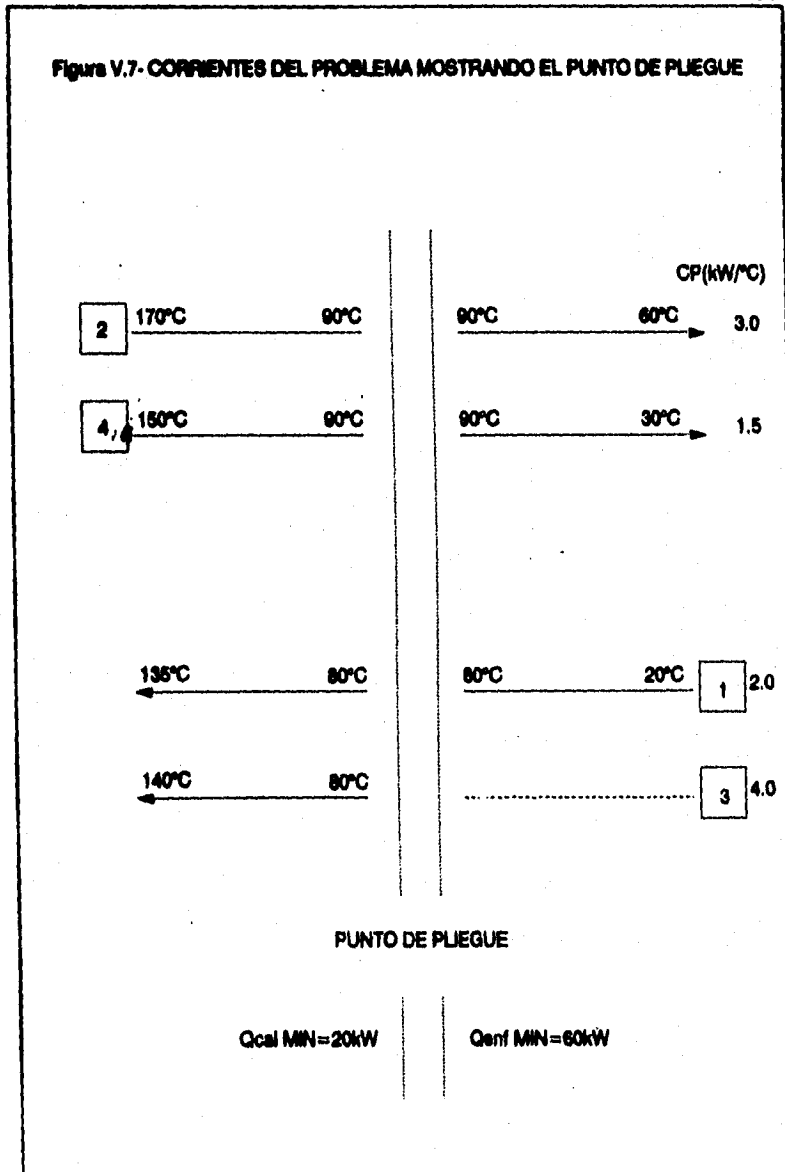


Figura V.6. DISEÑO EN EL EXTREMO CALIENTE

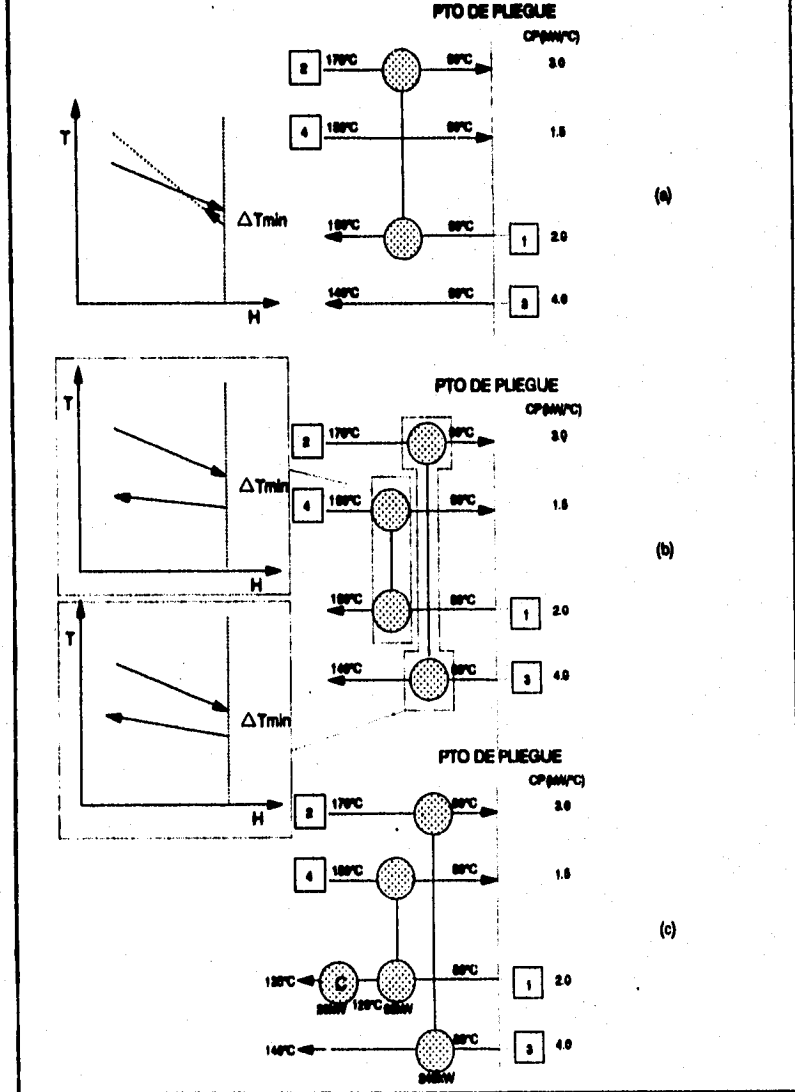


Figura V.9- DISEÑO EN EL EXTREMO FRIO  
PTO DE PLEGUE

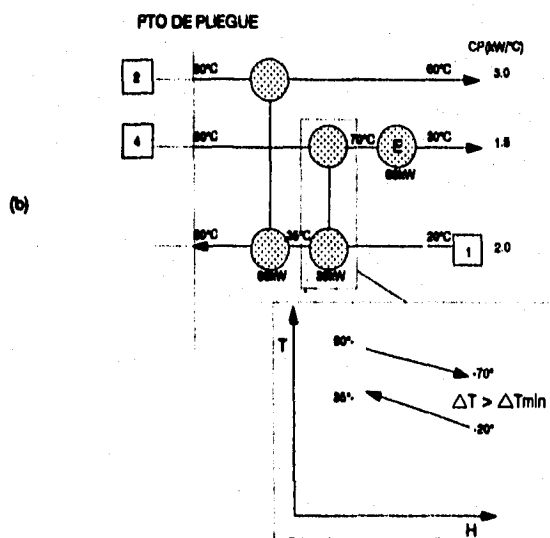
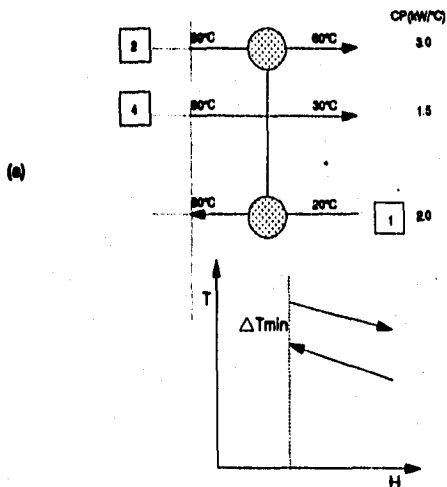


Figura V.10- DISEÑO COMPLETO

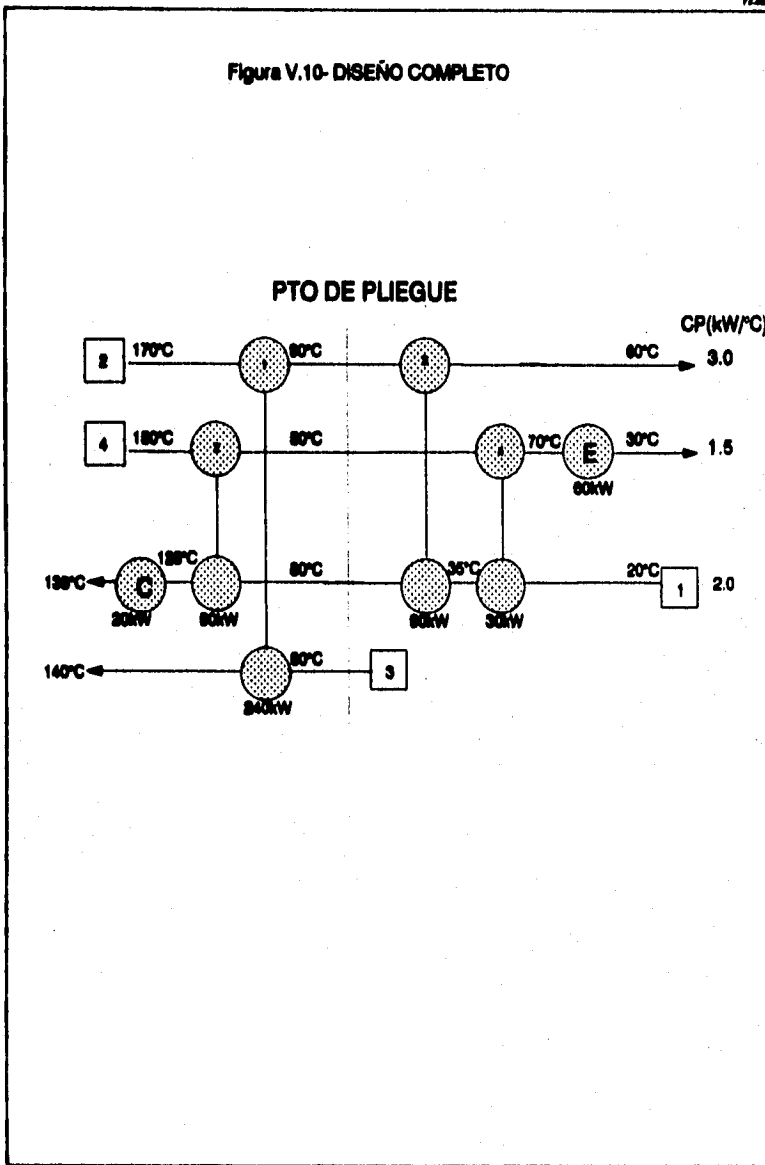


Figura V.11- ESTABLECIENDO OBJETIVOS PARA EL NUMERO DE UNIDADES

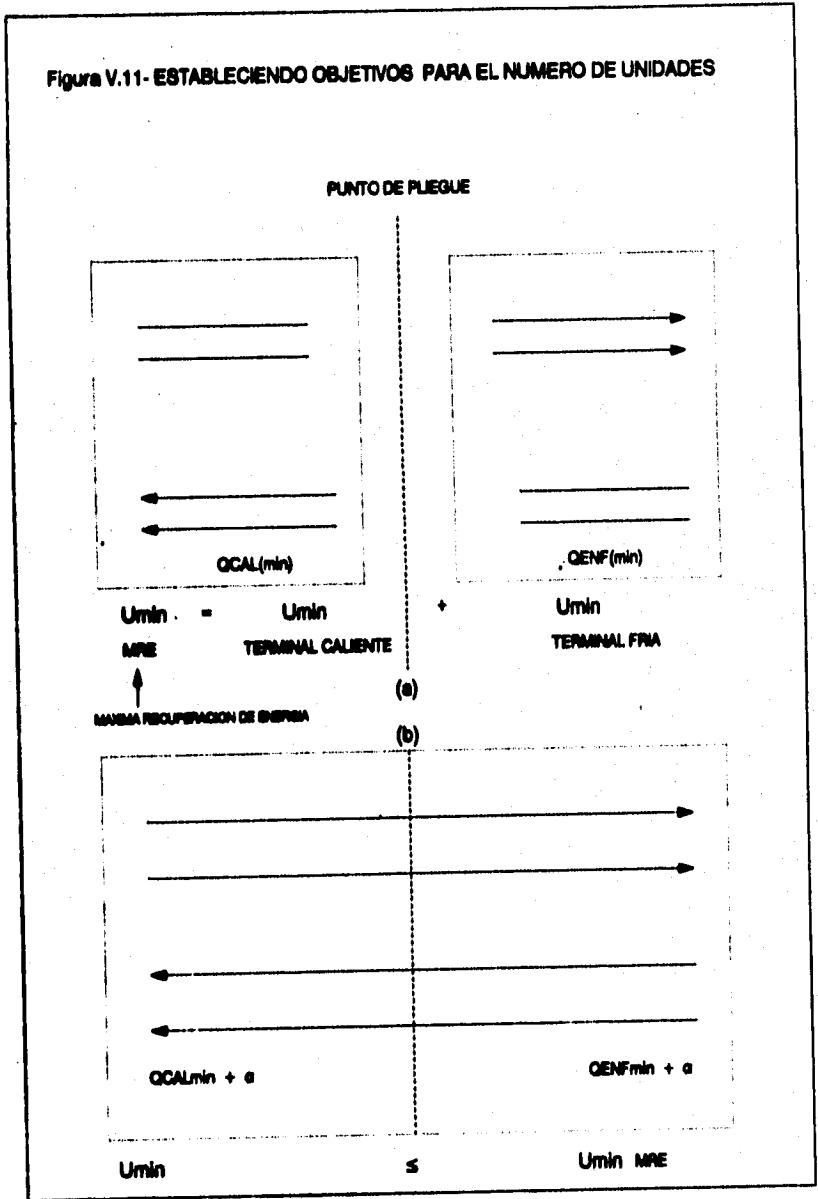




Figura V.12- ROMPIMIENTO DE UN CIRCUITO.

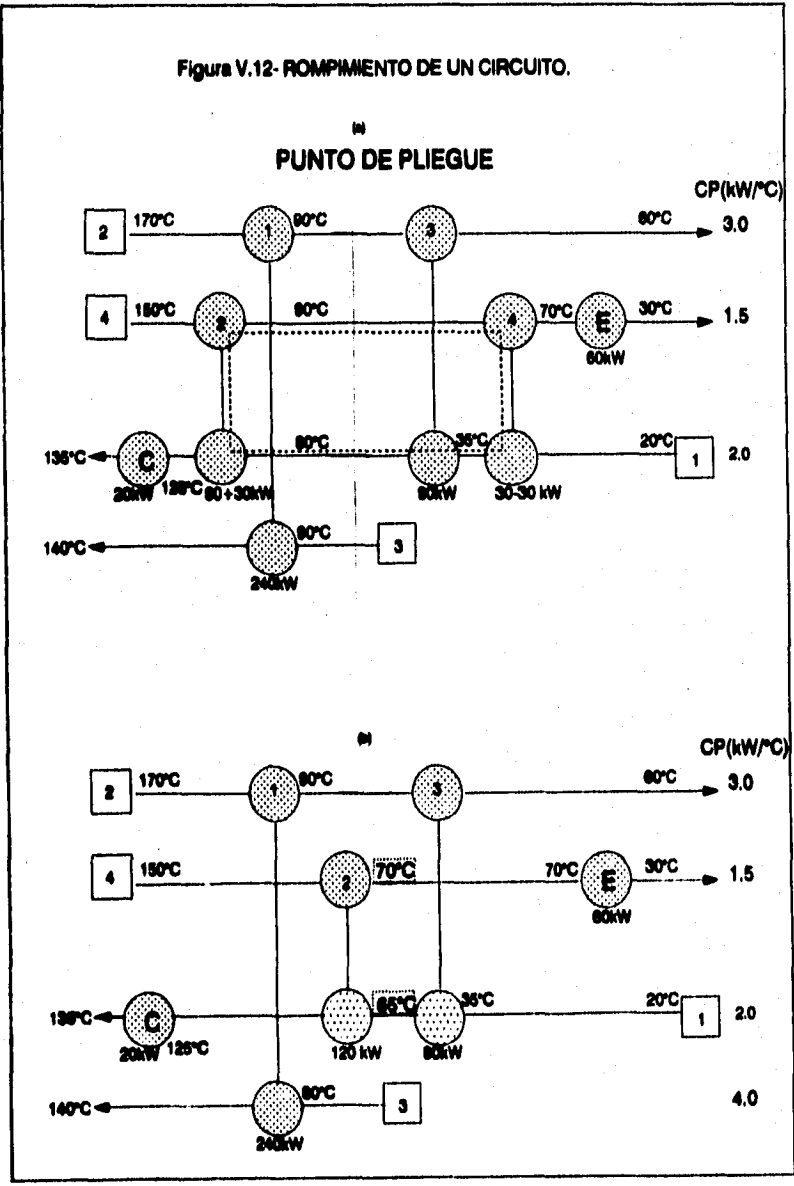


Figura V.13- RELAJACION DE ENERGIA.

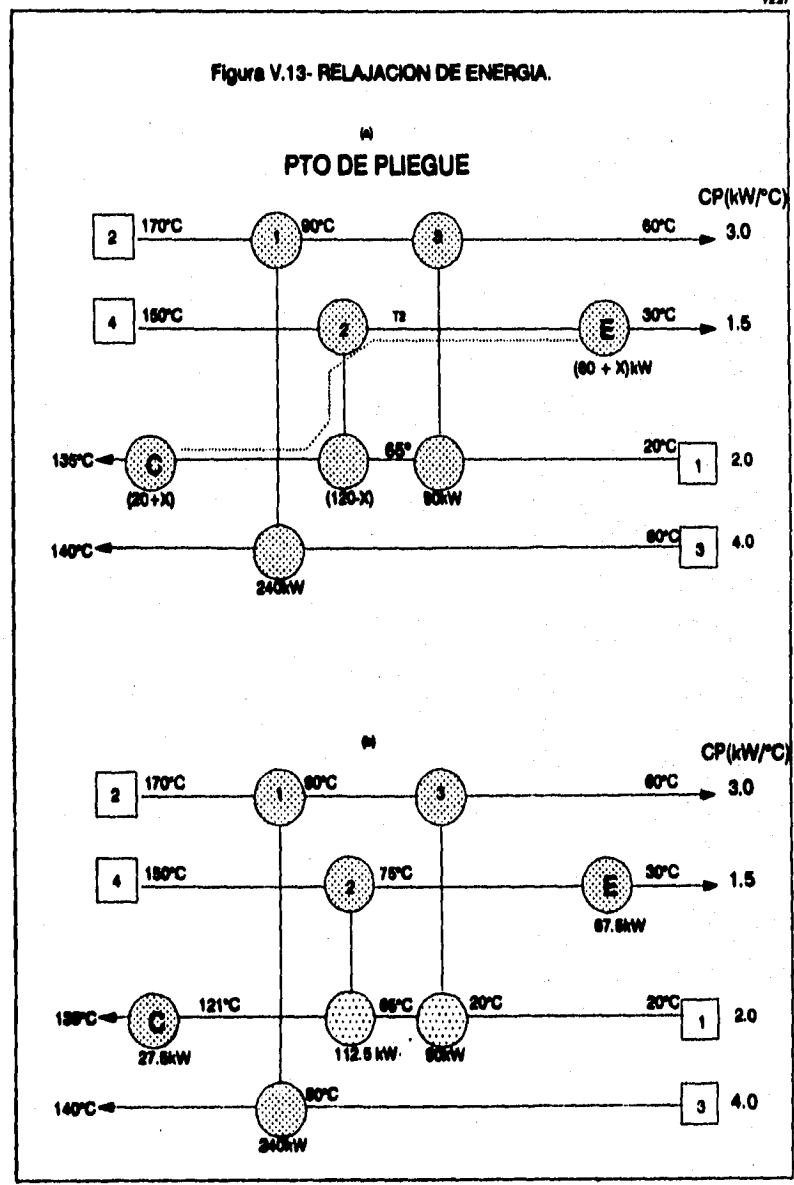


Figura V.14 EVALUACION DEL  $\delta T_{min}$  ECONOMICO.

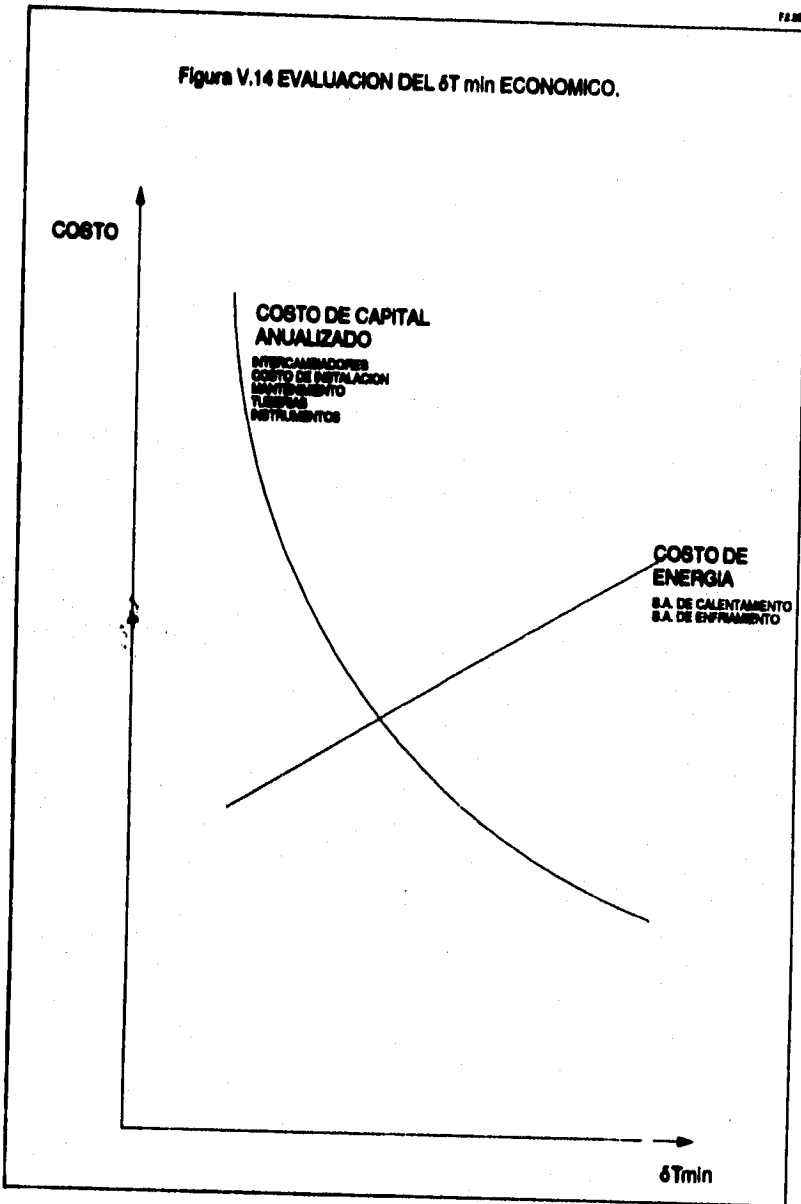


Figura V.15- CASOS QUE REQUIEREN DE UN SOLO SERVICIO AUXILIAR.

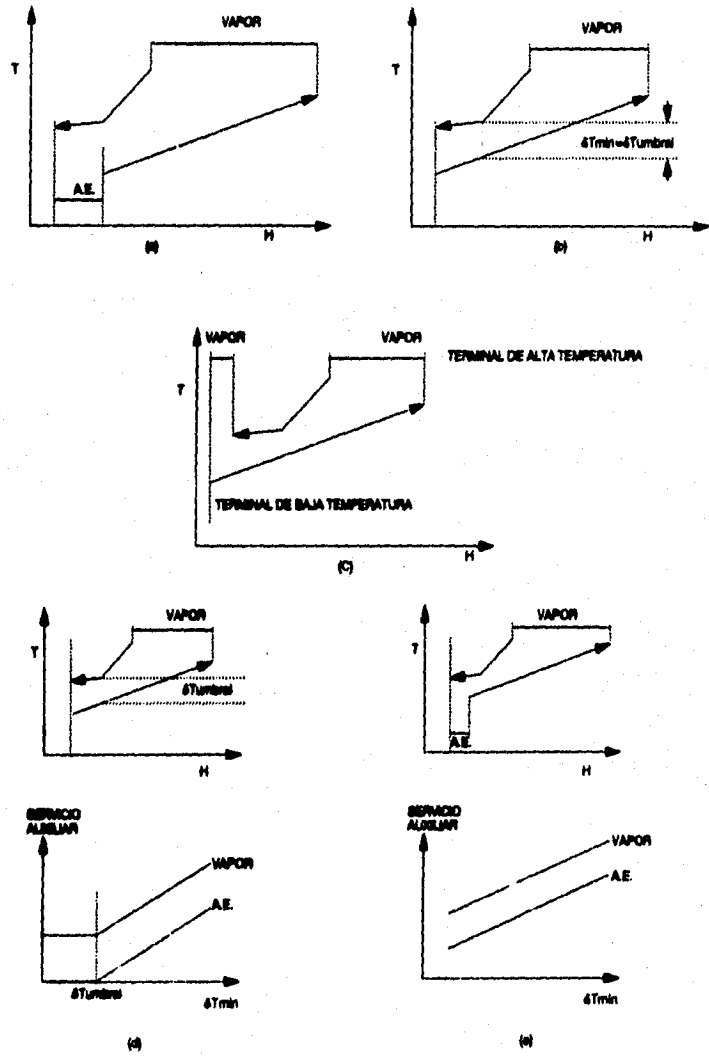


Figura V.16- DIVISION DE CORRIENTES EN EL PUNTO DE PLIEGUE.

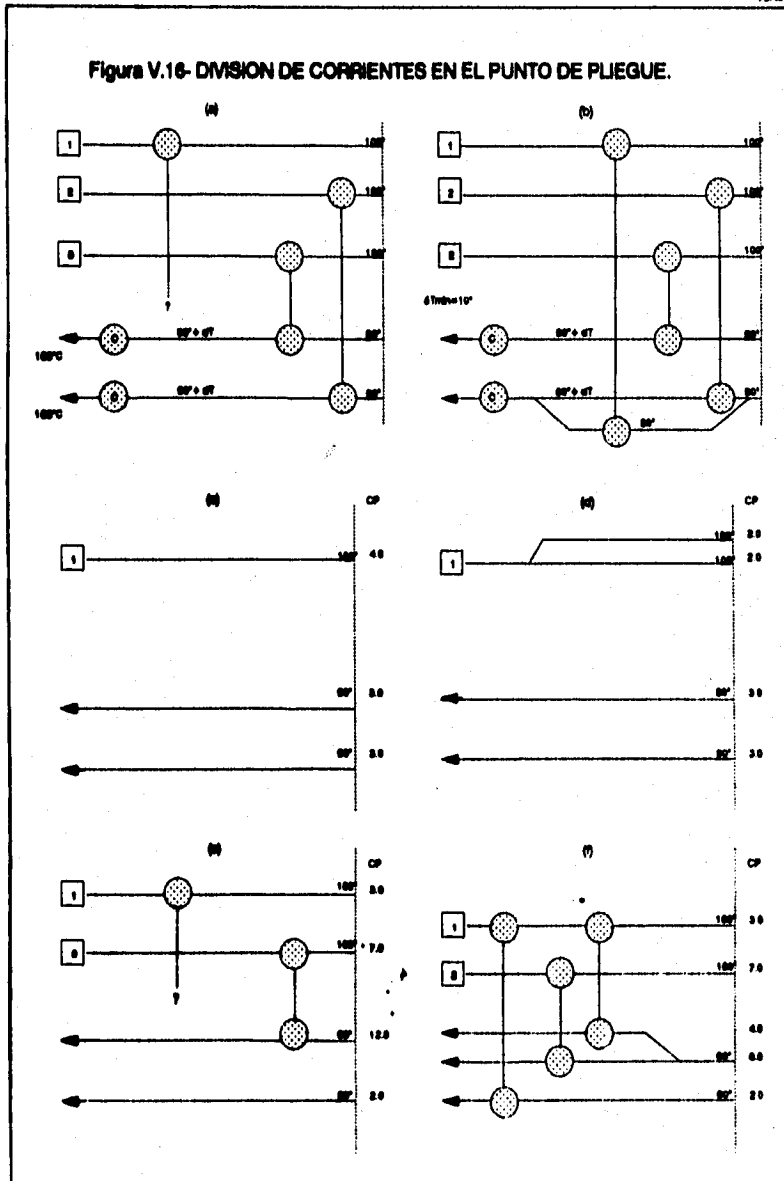


Figura V.17- ESTRATEGIA DE DISEÑO PARA 'REMODELACIONES'

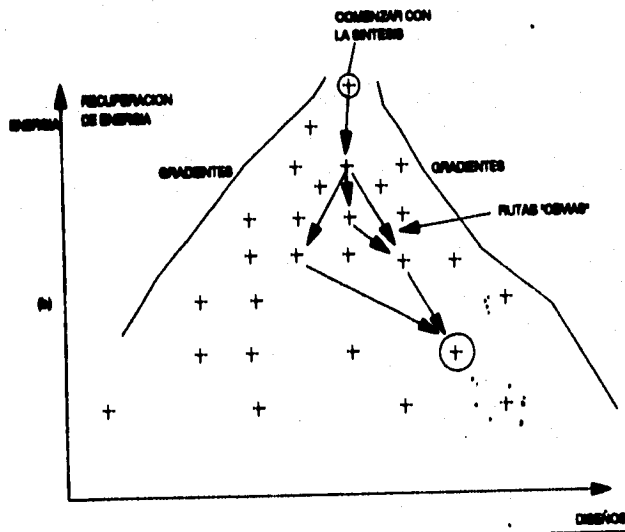
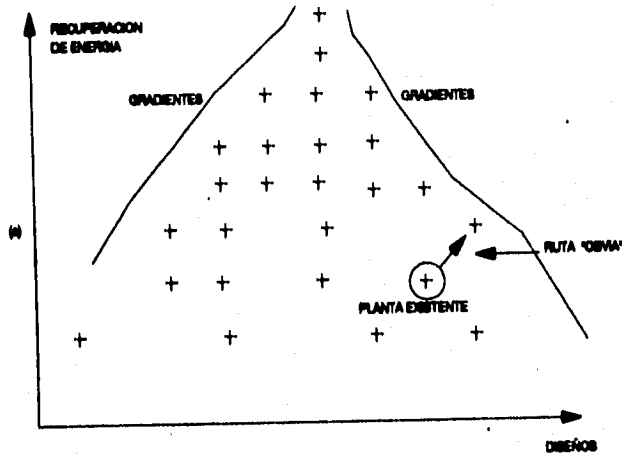


Figura V.16- EJEMPLO DE REMODELACION (DISEÑO DE M R E)

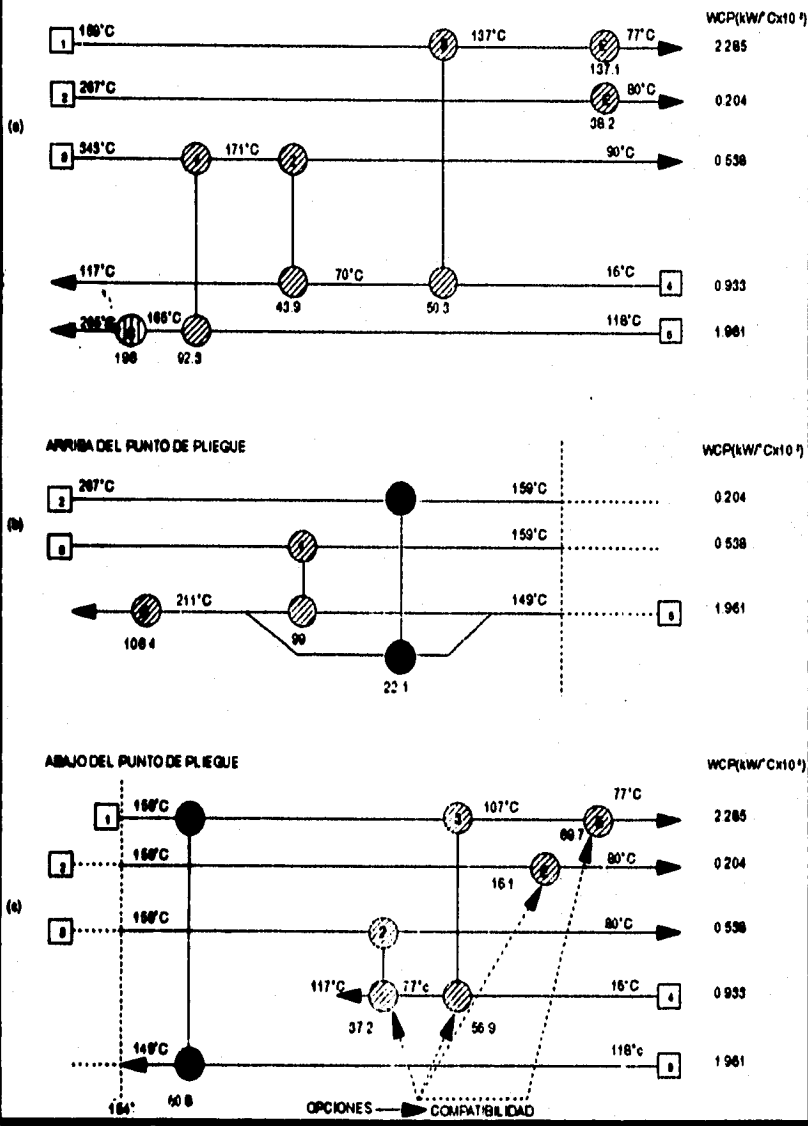
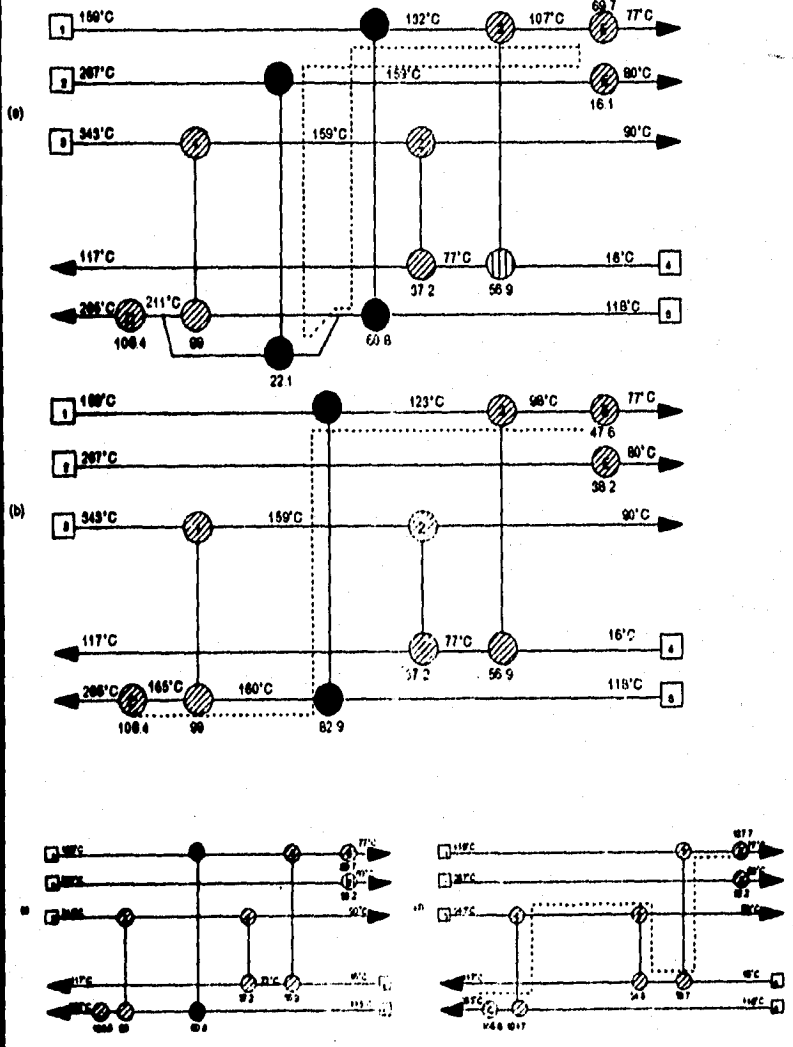


Figura V.10- EJEMPLO DE REMODELACION: EVOLUCION DEL DISEÑO





**CAPÍTULO VI.**  
**AHORRO DE ENERGÍA CON TURBOEXPANSORES.**

## **VI. AHORRO DE ENERGÍA CON TURBOEXPANSORES.**

Cuando existen grandes cantidades de gas que se deben reducir de una presión alta a una baja, o cuando hay disponibles corrientes de proceso a altas temperaturas, se deben tomar en cuenta las turbinas para expansión, una turbina de expansión convierte la energía de un gas o vapor en trabajo mecánico al expandirse éste a través de la turbina. En realidad un expansor es una turbina y una turbina un expansor.

El turboexpansor convierte la energía del gas a alta presión a energía cinética por medio del incremento de la velocidad del gas en las boquillas. Esta después convierte la energía en trabajo por la acción de los chorros a alta presión que chocan en las aspas del expansor.

La energía disponible que se recupera en forma de trabajo depende de la caída de presión y temperatura a la entrada de la turbina.

El proceso de expansión ocurre rápidamente, y el calor transferido hacia, o a partir del gas es normalmente muy pequeño. Consecuentemente, la energía interna del gas disminuye a medida que se produce trabajo, y la temperatura resultante del gas puede ser muy baja que le da al expansor la característica de actuar como refrigerador así como la de ser un dispositivo que produzca trabajo.

La confiabilidad de las turbinas de gas y su versatilidad se han probado en plantas de proceso tales como las de amoníaco, etileno, aire-oxígeno, metanol, licuefacción de gas natural, papel, pulpa, y otros. Así, antes de finalizar el diseño de una planta de proceso, se debe investigar como se puede integrar la energía recuperada en las turbinas de gas dentro del sistema de proceso para así incrementar las ganancias totales de la planta propuesta.

### **VI.1 Ejemplo de Aplicación de una Turbina de Gas.**

En una unidad de craqueo catalítico "FCC" se deposita un subproducto carbonoso, llamado "coque", sobre el catalizador que está en recirculación, y continuamente se "quema" en el regenerador. La regeneración del catalizador tiene lugar a presiones generalmente en el intervalo de 15 a 40 psig y temperaturas de 1100 a 1250 °F. Se usan temperaturas más altas cuando se

practica la combustión total interna del monóxido de carbono a dióxido de carbono.

En la Figura VI.1 se muestra un diagrama simplificado del regenerador y un sistema convencional de gas de combustión. El gas de regeneración se comprime en el soplador de aire y se dirige a una rejilla de distribución hacia la fase densa en el fondo del recipiente. Los compuestos de coque, azufre y nitrógeno que se han depositado en el catalizador durante la reacción de craqueo se convierten a sus óxidos respectivos. Los requerimientos de aire de regeneración pueden variar de aproximadamente 11 a más de 14 lb de aire por libra de coque quemado, dependiendo del modo específico de regeneración que se use. Flujos de gas de chimenea del orden de cientos de miles de libras por hora son típicos para las plantas de craqueo modernas. El gas de combustión pasa a través de las dos etapas de un separador ciclónico, y después fluye a través de una válvula corrediza y una cámara de orificio, las dos actúan en combinación para reducir el gas de chimenea hasta la presión atmosférica.

Aunque los ciclones disminuyen las pérdidas de catalizador en el gas de chimenea a algunos cientos de libras por hora, los finos restantes arrastrados son altamente abrasivos y crean un ambiente erosivo que se debe considerar en el diseño del equipo corriente abajo. Si el CO no ha hecho completa combustión en el regenerador, se puede utilizar una caldera de CO para reducir el contenido de CO del gas de chimenea a valores permisibles convirtiéndolo a  $CO_2$ . El calor resultante de la combustión y el calor sensible del gas de chimenea se recuperan en forma de vapor de alta presión.

Antes de la descarga final a la chimenea, el gas se dirige a un precipitador electrostático u otro dispositivo de control para la recuperación final de finos.

#### **VI.1.2 Sistema de Recuperación de Potencia.**

Como se muestra en la VI.2, el sistema de recuperación de potencia se compone del separador de tercera etapa y del tren de recuperación de potencia. El tren de potencia consiste de la turbina de expansión o recuperadora de potencia, un motor-generador, un soplador de aire y una turbina de vapor, todos los equipos anteriores se montan en serie.

En operación normal, todo el volumen de gas de chimenea del separador se dirige a través de la turbina de expansión. El expansor que actúa como orificio

de expansión y la válvula en la línea de entrada actúan conjuntamente para mantener la presión del regenerador.

La energía recuperada en el expansor maneja al soplador de aire. También se provee de una válvula de desviación para enviar una porción del gas de combustión hacia la turbina en periodos cuando las condiciones son tales que el potencial recuperable de energía excede la capacidad del tren de potencia. El gas effluente del expansor se dirige a la caldera de CO y al precipitador.

En periodos de operación cuando la potencia recuperada no es suficiente para manejar al soplador, la unidad opera como un motor para proveer la potencia restante.

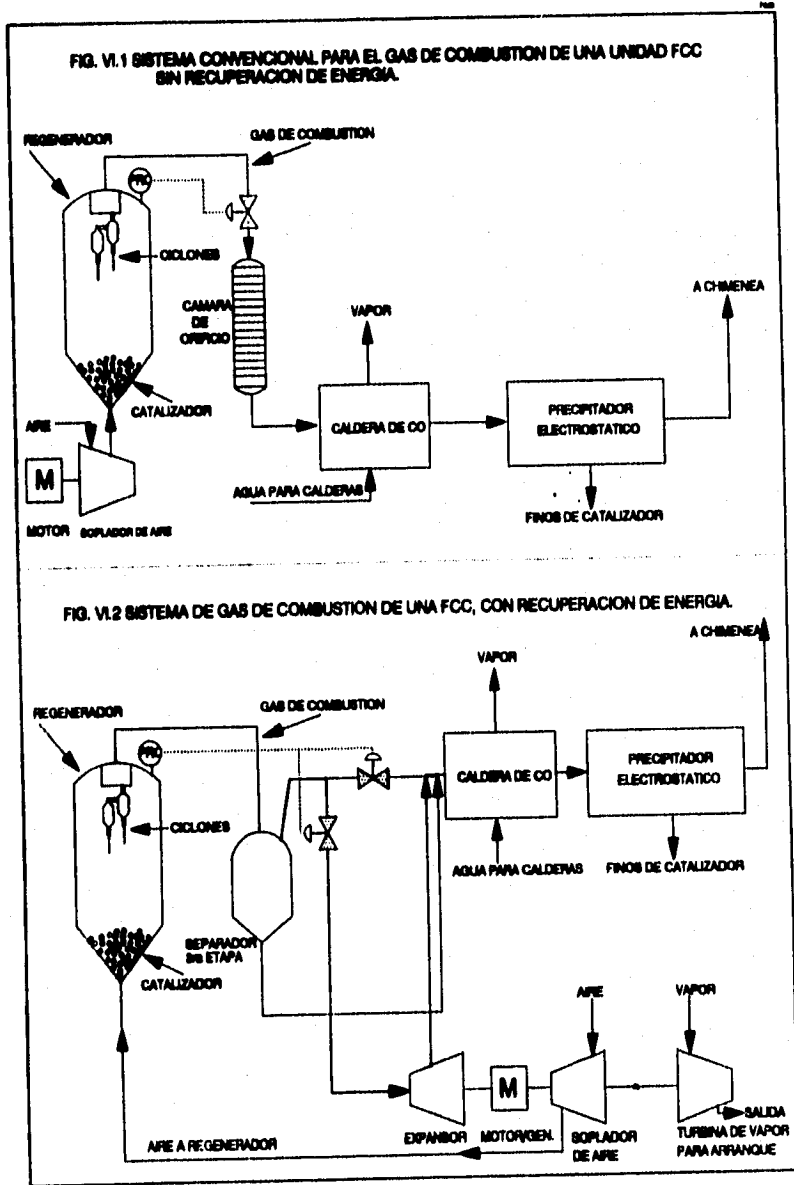
En periodos en los que la potencia recuperada de la turbina sea menor que los requerimientos de energía del soplador, se instala una turbina de vapor para suministrar la potencia restante requerida así como para arrancar el tren de recuperación de potencia.

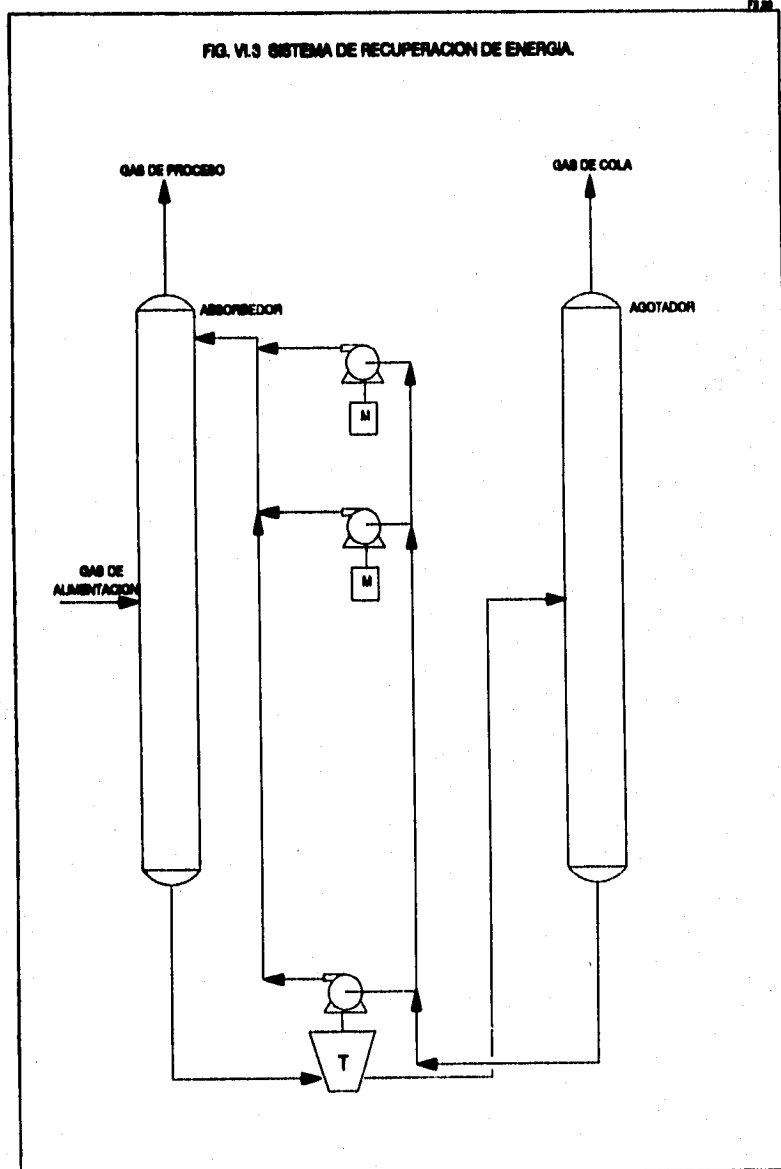
## **VI.2 Recuperación de Potencia con Turbinas Hidráulicas.**

La energía de corrientes de proceso a alta presión, previamente perdida por la regulación o estrangulación a través de una válvula de control, se recupera con turbinas hidráulicas que son esencialmente bombas tipo difusor o de voluta funcionando en reversa. El líquido a alta presión entra en lo que normalmente sería la boquilla de descarga, fluye a través de la periferia y sale por el ojo de cada impulsor. Como con las bombas, estas turbinas pueden ser de una o varias etapas. El número de etapas requeridas es una función de la energía de presión disponible en la corriente de proceso.

## **VI.3 Ejemplo de Aplicación de una Turbina Hidráulica.**

En la Figura VI.3 se muestra el empleo de una turbina hidráulica en un sistema de eliminación de CO<sub>2</sub> en plantas de amoníaco. En estas plantas el absorbedor de CO<sub>2</sub> opera normalmente a varios cientos de psi de presión, mientras que el agotador de CO<sub>2</sub> opera casi a la presión atmosférica. Se requiere energía para bombear la solución pobre a la presión del absorbedor para lo cual se emplea una turbina hidráulica para manejar una de las bombas de solución pobre y se aprovecha así la energía disponible en la corriente líquida a alta presión.





**CAPÍTULO VII.**  
**AHORRO DE ENERGÍA EN CALENTADORES A FUEGO DIRECTO**

## **VII. AHORRO DE ENERGÍA EN CALENTADORES A FUEGO DIRECTO**

En la industria química, frecuentemente se requiere suministrar calor a altas temperaturas a algunas corrientes de proceso para diversos fines, para ello son utilizados los calentadores a fuego directo los cuales consumen grandes cantidades de energía en forma de combustible.

En un calentador a fuego directo el calor liberado de la combustión que se realiza dentro de una cámara aislada, se transfiere a elevadas temperaturas a un fluido que se encuentra en el interior de un serpentín de tubos que comúnmente se colocan a lo largo de las paredes y techo de la cámara de combustión.

Los calentadores a fuego directo de tipo convencional funcionan por medio de tiro natural, es decir, la elevación de los gases producto de la combustión, contenidos en el calentador crean una presión menor a la atmosférica, lo que provoca la penetración del aire dentro de la cámara expulsando así los gases producidos.

Las partes principales que constituyen un calentador a fuego directo se muestran en la Figura VII.1, y se describen a continuación.

### **Paredes.**

Están formadas en su parte exterior por una cubierta de acero y en su parte interior por un material aislante refractario.

La finalidad al incluir este último, es evitar el sobrecalentamiento de la estructura metálica de acero, mantener una temperatura constante en la sección de radiación (hogar) y, además, evitar que se presente el fenómeno de corrosión en la cubierta metálica del equipo cuando se quema un combustible que contiene azufre.

### **Quemadores.**

El combustible y aire necesarios para la combustión se suministran dentro del calentador a fuego directo a través de quemadores, cuyos tipos pueden ser:

- a) Quemadores de combustión, que mezclan aire, combustible y vapor para atomización.



b) Quemadores de gas que mezclan aire y gas.

c) Quemadores que combinan el manejo de combustóleo y gas.

#### Sección de Radiación (Hogar).

Es el primer compartimento del calentador, en el cual el combustible es quemado para producir el calentamiento directo. Las hileras de tubos están colocadas usualmente a lo largo de las paredes y el techo en posición horizontal o vertical.

#### Sección de Convección.

La sección de convección está colocada en la parte superior de la sección de radiación. La transferencia de calor en ella se efectúa por convección, es decir, por la propagación del calor que se realiza de un lugar a otro por el movimiento real de la sustancia caliente.

#### Chimenea.

Es un cilindro hueco colocado en la parte superior de la sección de convección, cuya función es conducir los gases de combustión a la atmósfera.

#### Serpentín de Tubos.

Es el componente más importante y más costoso de un calentador a fuego directo, consiste de un determinado número de tubos conectados en serie por medio de retornos(codos) o cabezales.

Debido al incremento considerable que ha tenido en los últimos años, la producción de energía y a la baja eficiencia de los calentadores, se ha hecho imperiosa la necesidad de encontrar técnicas o estrategias para reducir el consumo de energéticos y aumentar la eficiencia de estos equipos.

Existen varias estrategias para ahorrar energía en un calentador a fuego directo algunas de las cuales se describen a continuación.

### **VII.1 Pre calentamiento de Aire.**

Actualmente, para el ahorro de energía en los calentadores se ha implementado un sistema con pre calentamiento de aire, el cual eleva la eficiencia del calentador hasta 90 o 92 % (con base en el poder calorífico inferior). La diferencia de este tipo de dispositivos con el calentador convencional, es que el sistema con pre calentamiento de aire usa dispositivos recuperadores de calor, los cuales transmiten parte del calor presente en los gases de combustión hacia el aire que será utilizado en el proceso de la combustión. Los dispositivos utilizados para este fin, son conocidos como pre calentadores.

Esta energía adicional en el aire de combustión sirve para reducir el requerimiento de combustible al proporcionar una carga térmica dada.

Un calentador a fuego directo con pre calentamiento de aire además de pre calentador, cuenta con un ventilador de tiro forzado y un ventilador de tiro inducido, con los cuales el sistema funciona con un tiro inducido-forzado, también conocido como tiro balanceado, ver Figura VII.2.

### **VII.2 Instrumentación y Controles Requeridos.**

Llevar a cabo un aprovechamiento óptimo de la energía en un calentador a fuego directo requiere del buen funcionamiento de este, lo que requiere de un cuidadoso y dedicado monitoreo de las variables que intervienen tanto del lado de proceso como del lado de la combustión. Así, los sistemas de control e instrumentación tienen que ser capaces de garantizar un óptimo funcionamiento del calentador, ya que si alguno de éstos falla, el sistema puede no tener el éxito esperado.

#### **VII.2.1 Variables de la Corriente de Proceso.**

Para el control del calentador es conveniente considerar las siguientes variables:

Flujo de la corriente de proceso: Si se desea el control individual de la corriente de carga, se debe monitorear el flujo a cada paso paralelo. Esto se recomienda para calentadores de multipasos que están en servicio de calentamiento de hidrocarburos líquidos. En tales calentadores, un flujo bajo en un paso individual puede promover la vaporización excesiva conduciendo a un

incremento en la caída de presión y una reducción adicional en el flujo de ese paso. Tal condición puede causar el sobrecalentamiento y consecuente ruptura del tubo.

**Temperatura de la corriente de proceso:** Para calentadores a fuego directo con control de flujo por paso, se sugiere instalar indicadores de temperatura para monitorear las temperatura de salida del fluido que salen de cada paso en paralelo. Estas temperaturas de salida por paso son útiles como guía para balancear los flujos para cada paso así como para determinar la cantidad de calor absorbida por la corriente de proceso. Además, monitorear las temperaturas de salida en cada paso tanto de la sección de radiación como de la de convección proporciona un medio para calcular la contribución a la carga térmica requerida en la corriente de proceso de las secciones de convección y radiación.

**Temperatura de la Pared Del Tubo:** La temperatura de la pared del tubo pueden ser una guía importante para el calentamiento y ajustes de flujo. Es un indicador útil de sobrecalentamiento localizado y puede advertir temperaturas de tubo excesivas en donde la fuerza del metal se puede reducir peligrosamente. Como mínimo, se sugieren termocoples en la pared a la salida del tubo para cada paso.

#### **VII.2.2 Variables Para la Combustión.**

**Flujo de quemado de combustible:** La medición del flujo de quemado del combustible en conjunción con el análisis de este para obtener el poder calorífico permite la determinación de la capacidad térmica del calentador.

**Perfil de flujo del gas de combustión:** Las lecturas de la demanda proporcionan datos de las caídas de presión del gas de combustión y son útiles para el ajuste del regulador de tiro y de los registros del quemador. Las mediciones de carga pueden ser una indicación de que tan cerca está el calentador de sus condiciones límite de operación lo que se identificaría por la manifestación de presión positiva del gas de combustión.

**Temperatura del gas de combustión:** Monitorear la temperatura del gas de combustión que sale de la sección de radiación proporciona una guía para el balance de quemado en la caja de combustión y también sirve como una advertencia potencial de condiciones de exceso de quemado. Las temperaturas

del gas de combustión también se deben monitorear a la salida de la sección de convección. Esta temperatura proporciona una indicación de la eficiencia térmica del calentador.

Para secciones de convección que contienen más de un servicio de calentamiento, monitorear la temperatura del gas de combustión que entra a cada serpentín de convección proporcionará una indicación del funcionamiento del precalentador.

**Muestreo del gas de chimenea:** Se recomiendan provisiones para el muestreo del gas de combustión a la salida de la sección de radiación y a la salida de la sección de convección. El contenido de oxígeno y monóxido de carbono del gas de combustión se deben determinar para la muestra a la salida de la sección de radiación ya que esto proporcionará una indicación de la técnica de quemado del operador. Se sugiere el monitoreo del contenido de oxígeno en el gas de combustión que sale de la sección de convección (junto con la temperatura del gas de combustión en este punto) para propósitos de determinar la eficiencia térmica del calentador por el lado de la combustión. Conocer el contenido de oxígeno que sale de las secciones de radiación y convección proporciona una guía rápida para determinar las fugas de aire en la sección de convección.

La Figura VII.3 muestra un sistema con los controles mínimos para un calentador que quema combustible líquido y gas.

**Control de la Carga al calentador.**

Este circuito consiste de una placa de orificio, un transmisor de presión diferencial, un controlador de flujo y una válvula de control. Con este sistema se garantiza que el gasto es constante a través del calentador.

**Control de la Temperatura del Aire al Precalentador Regenerativo.**

El precalentador de aire tipo regenerativo requiere para su correcto funcionamiento de una temperatura mínima del aire a ser precalentado para evitar problemas de corrosión por la condensación de los gases de combustión en el lado frío del precalentador. Para garantizar esta temperatura del aire se utiliza un precalentador de aire con vapor de agua por medio de un circuito de control retroalimentado, integrado por un termopar y una válvula de control de vapor.

#### **Control de la Presión del Calentador.**

Para el correcto funcionamiento del calentador se requiere mantener una adecuada presión en su interior. Esta presión depende de la cantidad de aire para la combustión y del desalojo de los gases quemados por medio de la manipulación del ducto de tiro inducido.

Este sistema de control consiste de un control retroalimentado de la presión y un control prealimentado del gasto del aire al calentador.

El sistema de control retroalimentado está formado por un transmisor de presión, un controlador de presión, el cual envía su información que junto con la señal del sistema prealimentado de gasto actúan sobre el obturador del ducto de tiro inducido.

El sistema de control prealimentado para el gasto del aire al calentador consiste de un tubo "pitot" modificado y un transmisor.

Cuando se presenta una variación en el gasto del aire, la información se adelanta y corrige la apertura del ducto de tiro inducido para adelantarse en el control de la presión del calentador.

#### **Sistema de Control de los Combustibles.**

Debido a que el combustóleo es un aceite pesado hay que suministrarlo para su combustión a cierta temperatura y además atomizarlo por medio de vapor o aire.

Para mantener su temperatura en forma adecuada se tiene que enviar una cierta cantidad al calentador, y una parte de esta se regresa al sistema de almacenamiento de combustóleo ya caliente.

Los pilotos funcionan a través de gas combustible, hecho que se logra a través de un regulador de presión para poder bajar la presión del gas hasta algunas psig, logrando así alimentar los pilotos.

Para poder quemarse, el combustóleo requiere de atomizarse, esto se logra a través de un circuito de control retroalimentado para mantener una diferencia de

presión entre el vapor y el combustible( siempre debe ser mayor la presión del vapor).

Este circuito consta de un transmisor de presión diferencial que envía su señal a un controlador de presión diferencial, el cual compara contra el punto de ajuste fijado para la correcta atomización, y este control envía su señal de corrección a la válvula de control en la línea de vapor.

El sistema de control de combustibles gobierna la cantidad de combustibles quemados y recibe la información de la cantidad de combustibles a quemar, del circuito de control de temperatura.

El sistema de control de combustibles consta de dos circuitos de control retroalimentados de gasto, tanto para el combustible como para el gas que deben repartirse la carga térmica, de acuerdo a la cantidad que se fije en el relacionador, el cual recibe la información del sistema de control de adelanto atraso y la envía como punto de ajuste al controlador de flujo de gas, el cual consiste de una placa de orificio, un transmisor de presión diferencial y de una válvula de control.

#### **Control del Aire para la Combustión.**

Este sistema se comporta como un circuito de control retroalimentado cuando controla el gasto de aire al calentador, y como prealimentado cuando interacciona con el control de presión del calentador. A su vez, este sistema recibe y envía información del sistema de control de temperatura.

#### **Sistema de Control de la Eficiencia de Combustión.**

La eficiencia de combustión depende básicamente de la relación aire-combustible, aspecto que se controla básicamente por la cantidad de oxígeno en los gases quemados, por medio de un controlador de análisis, el cual envía su señal como ajuste de relación a una estación de relación, en donde este circuito de control corrige la cantidad de aire para obtener la relación de aire-combustible más adecuada.

#### **Control de la Temperatura de la Salida de la Carga.**

Este sistema es el encargado de controlar la temperatura de la carga y asegurar a través de su subsistema de adelanto-atraso, que en todas las condiciones exista un exceso de aire para evitar una posible explosión.

### **VII.3 Optimización del Proceso de Combustión.(Relación Aire-Combustible).**

Otra forma de ahorrar energía es optimizando la combustión, es decir, la relación aire-combustible, de tal manera que las pérdidas de calor debidas al calentamiento del exceso de aire no requerido para una combustión completa se minimicen. En la Figura VII.4 se muestra esta segunda forma de ahorro de combustible.

En esta figura se aprecia que una reducción de la cantidad de aire total hacia la izquierda de la zona de máxima eficiencia en la combustión, dará como resultado un incremento en las pérdidas de calor por combustible no quemado. Hacia la derecha de la zona de máxima eficiencia, las pérdidas se incrementan con un exceso de aire. Este es uno de los motivos, además de los problemas de contaminación ambiental, seguridad en la operación, por lo que es importante mantener la relación aire-combustible en la zona de máxima eficiencia.

La magnitud de la zona de máxima eficiencia dependerá de las características de cada instalación en particular como lo es el tipo de quemadores o el tipo de combustible usado).

En las Figuras VII.5 y VII.6 se representan los ahorros que se obtienen al reducir el exceso de aire en los gases de combustión en un calentador industrial, quemando gas natural y combustóleo, respectivamente.

Supóngase que para una instalación dada quemando gas natural, el mínimo óptimo es 2% de oxígeno contenido en los gases de combustión, lo que representa un 10% de exceso de aire( ver Figura VII.5).

Si en un momento dado el contenido de oxígeno en los gases es de 6% , se tendrá un 37 % de exceso de aire, para una temperatura en los gases de 800°F. Esto da como resultado una pérdida de 5 % de combustible, si se compara con el 0 % de pérdidas que se obtiene al mantener un exceso de aire del 10 % . Ahora, en el caso de tener un calentador alimentado por combustóleo se considera como el mínimo óptimo el 3.5 % de oxígeno contenido en los gases de combustión, lo que equivale a un 20 % de exceso de aire.

Si en un momento dado el contenido de oxígeno en los gases de combustión es de 6.4 %, tendremos un 40 % de exceso de aire, para una temperatura en los gases de 800°F. Esto da como resultado una pérdida de 4% de combustible, si se compara con el 0% de pérdidas que se obtiene al mantener un exceso de aire de 20%, ver Figura VII.6.

Se deduce del análisis anterior, la importancia que tiene el controlar eficazmente el proceso de combustión (relación aire-combustible), a través del contenido de oxígeno en los gases de combustión. Para ello es imprescindible el uso de instrumentación y sistemas de control más modernos.

#### **VII.4 Adición de Tubos en la Sección de Convección.**

La recuperación de calor adicional en la sección de convección se puede llevar a cabo cuando la temperatura del gas de combustión en la chimenea es relativamente alta. Se debe considerar primeramente la posibilidad de incrementar la superficie de calentamiento en la sección de convección adicionando varias filas de tubos de convección en el mismo servicio de calentamiento.

#### **VII.5 Limpieza de la Sección de Convección.**

A pesar de que la superficie extendida en la sección de convección aumenta la transferencia de calor, su arreglo físico la hace susceptible a la acumulación de depósitos, particularmente cuando se queman líquidos. Tal ensuciamiento de la superficie de convección reduce la capacidad de la transferencia de calor y da como resultado temperaturas mayores del gas de chimenea y eficiencias térmicas menores.

Por lo tanto, con objeto de operar a eficiencia térmica máxima, es necesario mantener limpia la superficie de convección.

#### **VII.6 Programa de Mantenimiento Preventivo del Equipo.**

Otra forma de ahorrar energía en estos equipos, es establecer y aplicar un programa de mantenimiento preventivo del equipo, incluyendo a la instrumentación involucrada.



**Para establecer el programa de mantenimiento, es necesario tomar en cuenta la experiencia de los trabajadores y las recomendaciones al respecto de los fabricantes de dichos equipos. El programa debe contener el nombre del dispositivo o parte del equipo, al cual se dará mantenimiento, la frecuencia del mismo y la forma de realizarlo.**

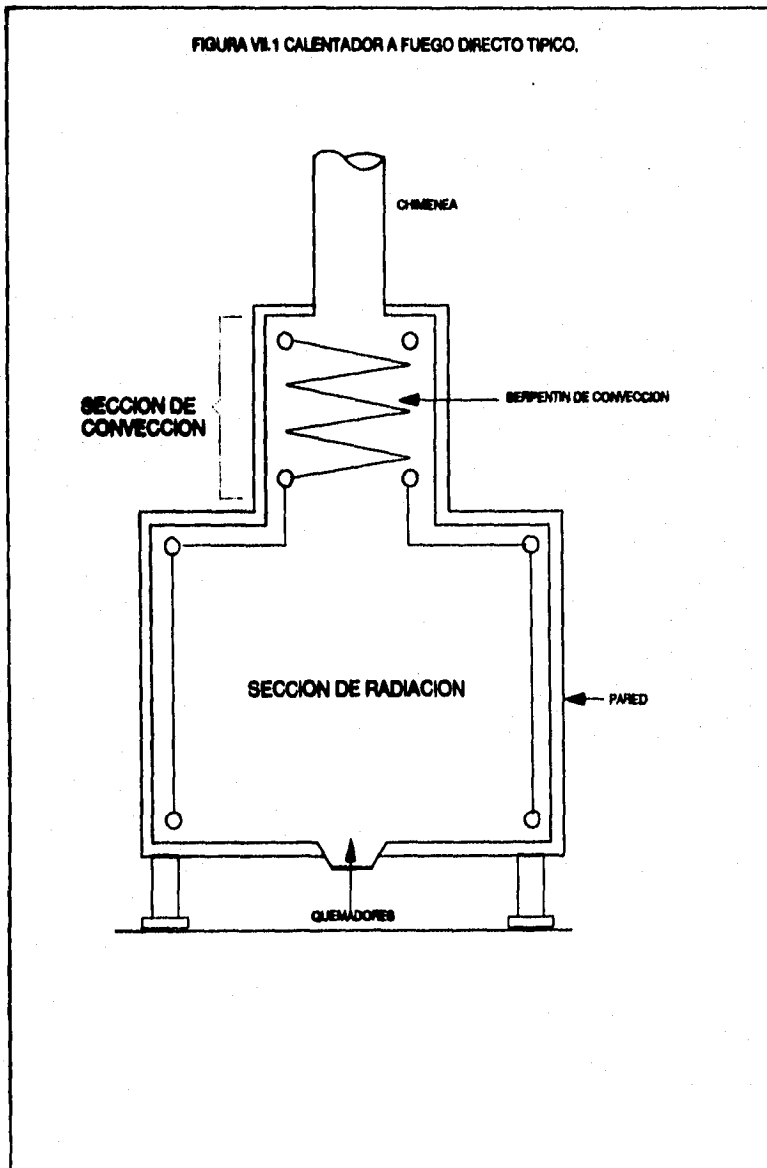


FIGURA VI.2 CALENTADOR A FUEGO DIRECTO CON PRECALENTAMIENTO DE AIRE.

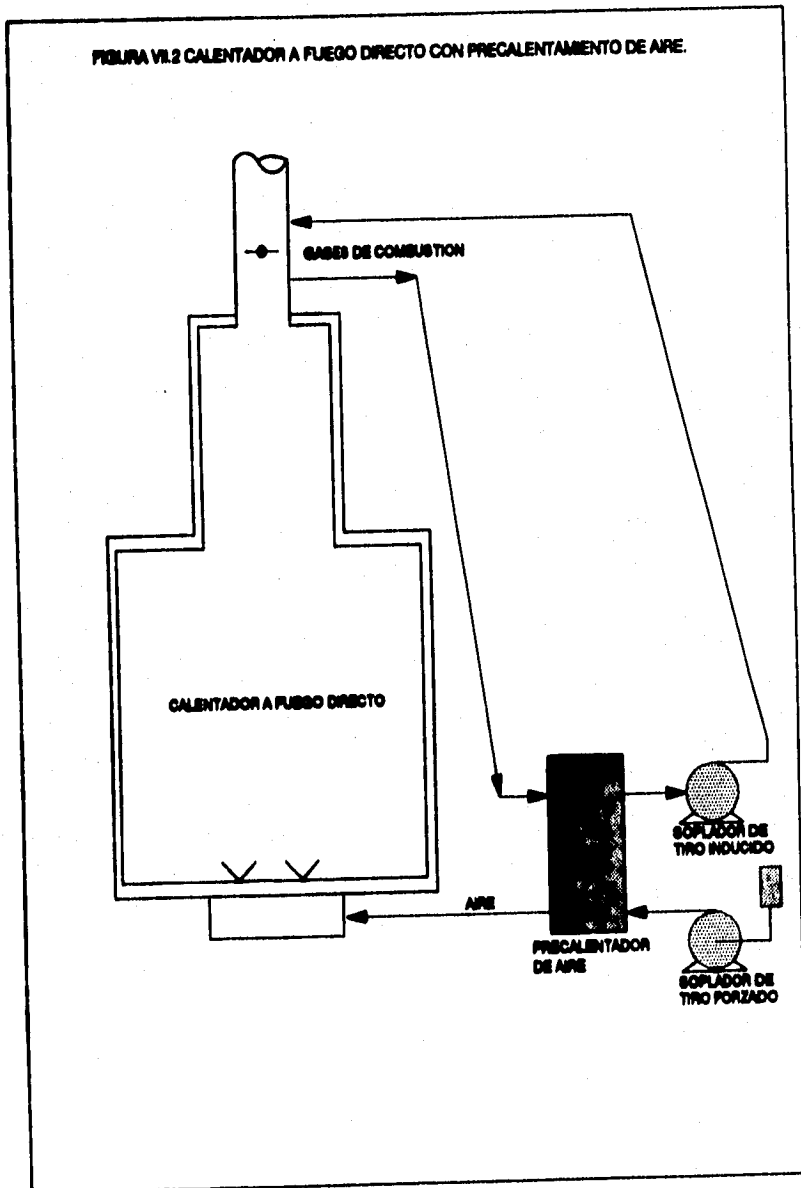


FIGURA VI.3 CONTROLES MÍNIMOS PARA UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO.

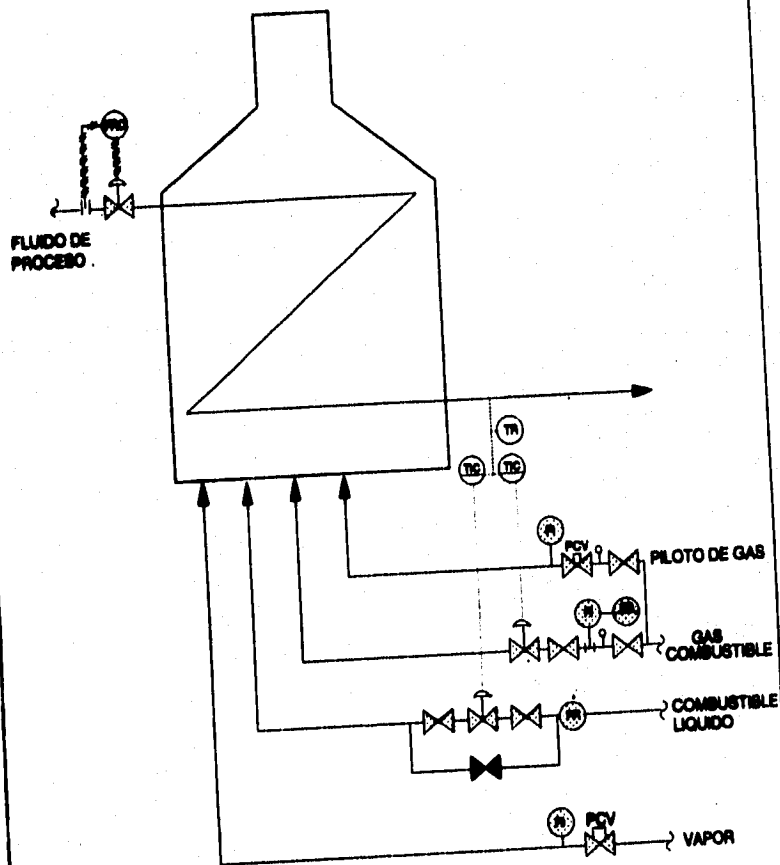


FIGURA VI.4 EFECTOS DEL % DE AIRE EN LA COMBUSTION.

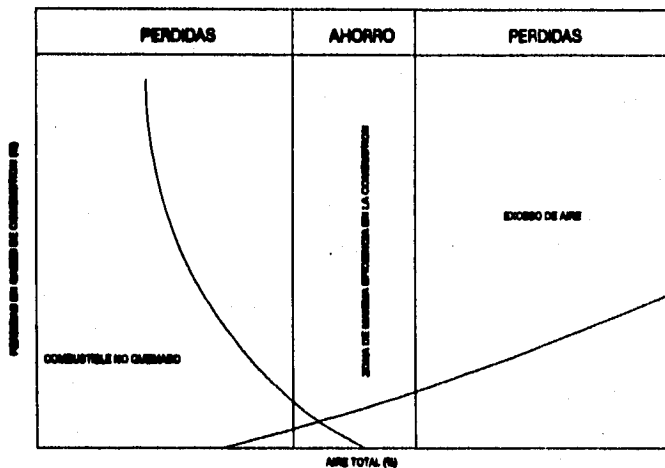


FIGURA VI.5 AHORRO DE COMBUSTIBLE REDUCIENDO EXCESO DE AIRE EN UN CALENTADOR QUE QUEMA GAS NATURAL.

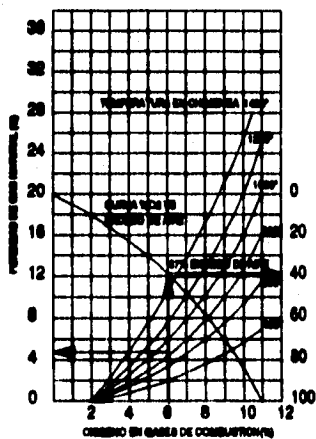
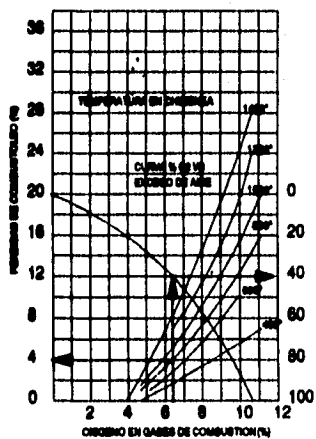


FIGURA VI.6 AHORRO DE COMBUSTIBLE REDUCIENDO EXCESO DE AIRE EN UN CALENTADOR QUE QUEMA COMBUSTOLEO.



**CAPÍTULO VIII.**  
**AHORRO DE ENERGÍA EN MOTORES Y BOMBAS.**

## **VIII. AHORRO DE ENERGÍA EN MOTORES Y BOMBAS.**

Los costos de energía han aumentado rápidamente con lo que aún los ahorros pequeños de energía producen beneficios económicos substanciales. Razón por la cual, para seleccionar las bombas se tienen que tomar en cuenta los costos de energía durante la vida de la bomba además de los criterios de selección normal de funcionamiento, el precio, el tiempo de entrega, el servicio, entre otros. La selección inicial de la bomba correcta puede tener una gran diferencia en consumo de potencia.

### **VIII.1 Clasificación**

Las bombas se pueden clasificar en forma general en dos tipos: dinámicas y de desplazamiento positivo. En las primeras como lo son las centrifugas se aplica energía al líquido que se bombea con un impulsor o una hélice que gira en un eje. La energía cinética aplicada al fluido por el impulsor se convierte en energía de presión cuando el líquido sale del impulsor y avanza a lo largo de una voluta o carcasa de difusor estacionarias. Cuando hay mayor velocidad, que se puede lograr con una velocidad de rotación más alta, un impulsor de mayor diámetro o ambas cosas, se puede lograr una carga más alta.

En las bombas de desplazamiento positivo se aplica energía al líquido dentro de un volumen fijo de desplazamiento, tal como una carcasa o un cilindro, con el movimiento rotatorio de engranes, tornillos o alabes o con pistones o émbolos de movimiento alternativo.

### **VIII.2 Selección.**

La eficiencia mayor posible de la bomba para un flujo y cabeza por etapa dados comúnmente minimizará la energía requerida para manejar la bomba. Cada bomba centrífuga se diseña para rendir su mejor eficiencia a un flujo particular, cabeza y velocidad de flecha como se ve en la Figura VIII.1. Cualquier desviación de esta mejor eficiencia ocasionará un desperdicio de energía.

Las bombas nuevas se deben seleccionar de tal manera que la cabeza de operación y los requerimientos de flujo coincidan exactamente con el punto de óptima eficiencia de la bomba seleccionada.

Por otra parte, la máxima eficiencia posible no solamente es función de un diseño y tamaño de bomba correctos, sino también de la velocidad específica, la cual está relacionada a la forma del impulsor. Para cualquier conjunto de requerimientos de flujo y de cabeza, hay un rango de velocidad específica que dará la mejor eficiencia posible. Algunos modelos de bombas, particularmente de velocidades específicas bajas, son inherentemente menos eficientes en cuanto al funcionamiento hidráulico que otros tipos. Eficiencias del orden de 60% a estas condiciones bajas de flujo son en realidad buenas. Para requerimientos de alta cabeza, es necesario emplear más de una etapa; la cabeza por etapa afecta la velocidad específica y por tanto la eficiencia máxima probable de la bomba. La mejor eficiencia posible de la bomba se puede obtener para bombas con un flujo grande y velocidades específicas de entre 800 y 4000.

Para ahorrar energía y costos de operación las bombas se deben seleccionar tan cerca como sea posible del punto de máxima eficiencia (PME). Si el flujo de diseño está a la derecha del PME, el flujo permitirá que el punto normal caiga sobre o cerca del PME dando como resultado ahorros substanciales durante los años de operación.

### **VIII.3 Mejoramiento en Instalaciones de Bombas Existentes.**

Para mejorar la eficiencia de bombas instaladas, particularmente aquellas cuyo punto de mejor eficiencia no coinciden con el flujo o cabeza reales de operación es posible ahorrar costos de energía en muchas aplicaciones, ya que las mediciones de flujo y cabeza se pueden efectuar en campo. Una incongruencia en flujo o cabeza puede suceder cuando: se cambia el proceso, la bomba se cambia a otra instalación, o las pérdidas de energía por fricción del sistema cambian con el tiempo debido a la corrosión o incrustaciones. Existen varias alternativas para ahorrar energía y costos de potencia.

Si el flujo o cabeza son mayores que los requeridos, el impulsor existente se puede adaptar a un diámetro inferior o se puede ordenar un nuevo impulsor con menor diámetro y guardar el impulsor original para uso futuro en caso de que la resistencia del sistema se incremente o que pueda requerirse un aumento en el flujo.

En muchas ocasiones aunque se haya seleccionado la bomba más eficiente, hay circunstancias en que no se puede operar a máxima eficiencia.



Así, cuando en un proceso se trabaja a varias capacidades, las bombas funcionan a capacidad menor a la de máxima eficiencia. En tal caso se pueden emplear dos o más bombas en paralelo en lugar de una grande para que cuando el proceso trabaje a baja capacidad, una o dos bombas de menor capacidad puedan hacer el trabajo operando a máxima eficiencia.

En muchas aplicaciones, sin embargo, es necesario tener una bomba que suministre menor flujo que el de su capacidad de diseño. En donde el proceso requiere tener un flujo variable de descarga en la bomba, la Figura VIII.2 indica que tan ineficiente resulta operar el motor a carga total y tener una regulación en su salida. Un gobernador de velocidad ajustable que se acople con la velocidad de la bomba al requerimiento de salida permite que el motor opere continuamente a su capacidad de diseño, y por lo tanto, a alta eficiencia pero sólo exige al motor lo necesario para suministrar el flujo de salida demandado.

#### **VIII.4 Selección del Impulsor Correcto.**

La mayoría de las bombas hoy en día son operadas por motores eléctricos, en su mayoría de inducción. Algunas son impulsadas por máquinas (de diesel, gasolina o gas natural) o turbinas (de vapor o gas). Cada una de estas máquinas tiene su propio punto de mejor eficiencia a una potencia de salida y velocidad de flecha particulares. Cualquier desviación del punto de mejor eficiencia del impulsor tendrá como resultado ineficiencias. Son ejemplos, la operación de un motor eléctrico a un voltaje inferior a menos de la potencia máxima de operación, o a un factor de potencia diferente del de las condiciones de diseño.

El ajuste en el requerimiento de potencia y velocidad de la bomba a la potencia y velocidad del gobernador es obviamente necesario para obtener una eficiencia global buena. En muchas instalaciones esto no se hace aún cuando algunas veces es muy fácil hacerlo.

Como se mencionó, los gobernadores de velocidad variable pueden con frecuencia mejorar su eficiencia pero debido a pérdidas de energía al cambiar la velocidad se deben aplicar cuidadosamente.

Otras consideraciones son el tamaño y voltaje del motor destinados para una bomba. Como lo muestra la Figura VIII.3, los motores grandes son inherentemente de diseño de alta eficiencia. Sus pérdidas son bajas, comparadas con las de los motores más pequeños, por lo que hay lugar para un

mejoramiento adicional de la eficiencia. Sin embargo, como lo muestra la Figura VIII.4, los motores de alto voltaje tienden a tener menores eficiencias que los motores diseñados para voltajes menores, primeramente porque sus embobinados necesitan mucho más aislamiento.

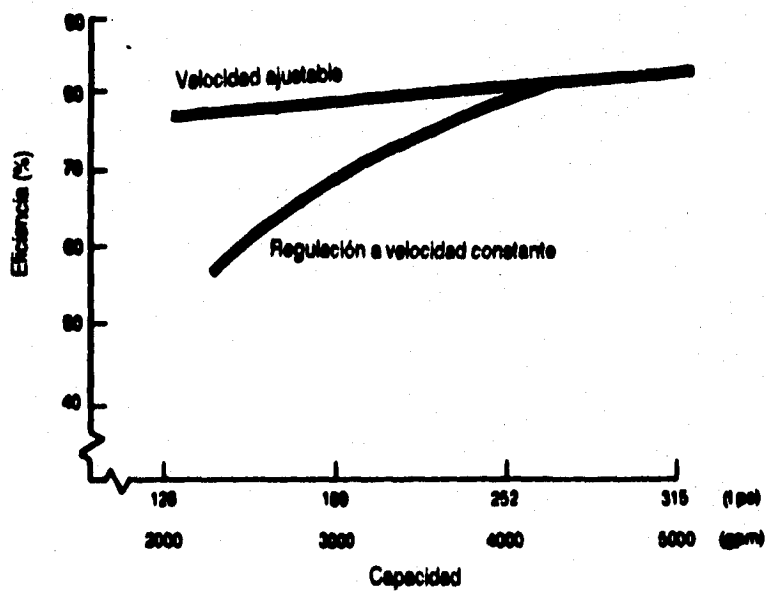


Fig. VIII.2 Eficiencias de una bomba para Lodo

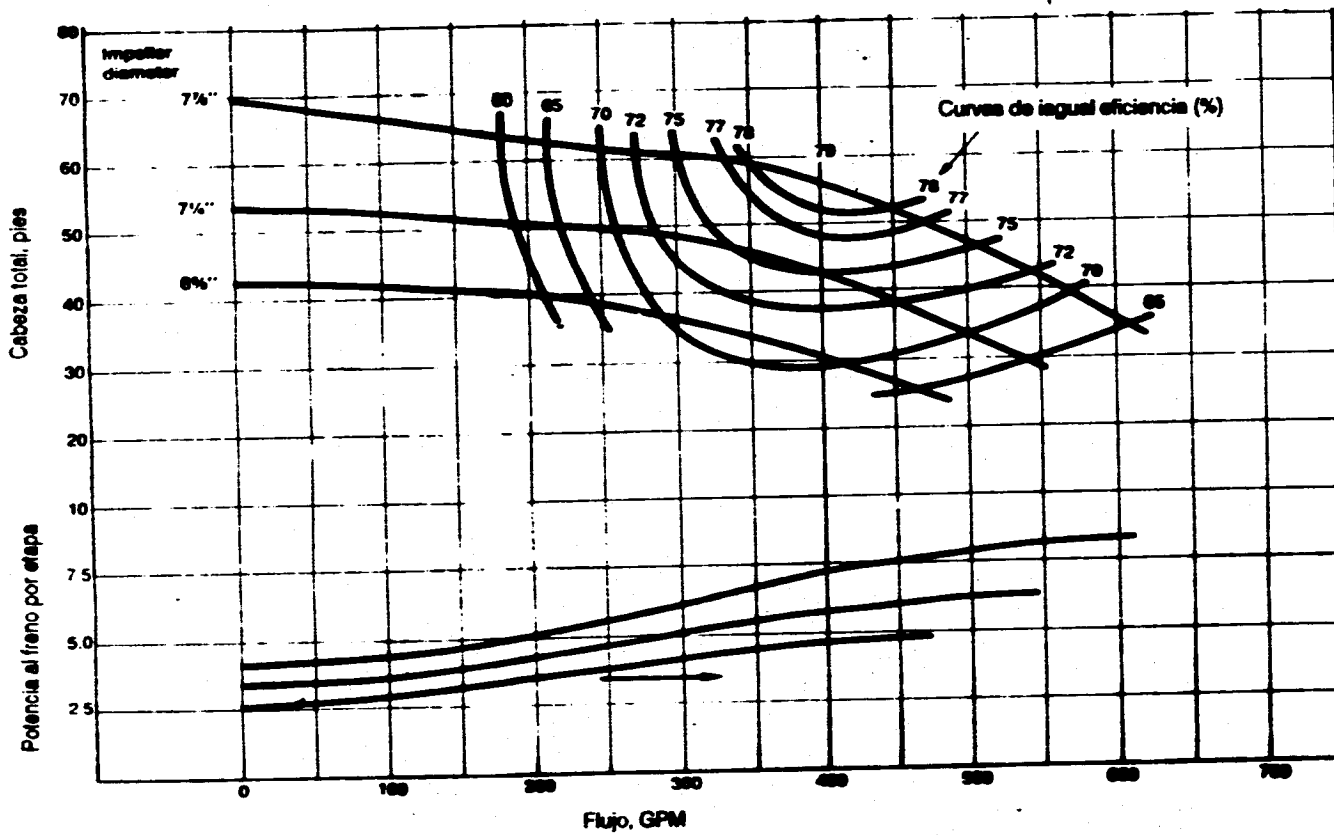


Fig. VIII.1 Curva de operación para un impulsor centrífugo específico a 1760 r.p.m.

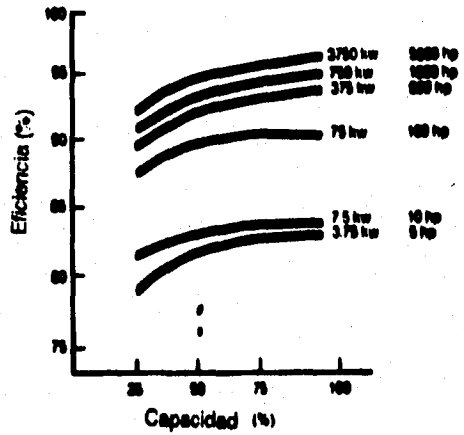
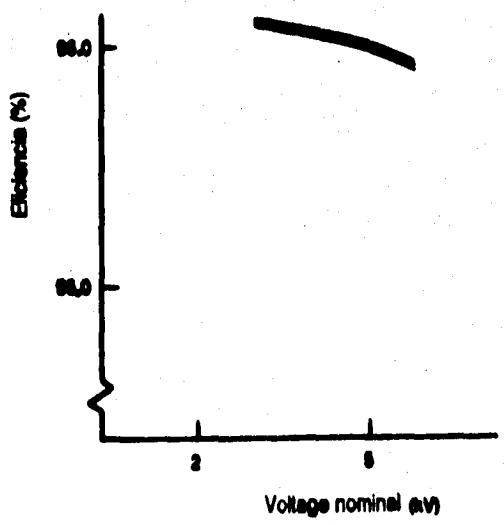


Fig. VIII.3 Eficiencias para un motor de inducción.

Fig. VIII.4 Eficiencias de motores eléctricos.



**CAPÍTULO IX.**  
**AHORRO DE ENERGÍA EN COMPRESORES.**

## **IX. AHORRO DE ENERGÍA EN COMPRESORES.**

### **IX.1 Clasificación.**

Los compresores se clasifican en dos grupos: centrífugos y de desplazamiento positivo.

En un compresor centrífugo se produce la presión al aumentar la velocidad del gas que pasa por el impulsor y, luego, al recuperarla en forma controlada para producir el flujo y presión deseados.

**Compresor de desplazamiento positivo:** Estos se pueden subdividir en rotatorios y reciprocantes. A diferencia de los centrífugos, son de capacidad constante y tienen presiones de descarga variables.

Los compresores reciprocantes funcionan con el principio adiabático mediante el cual se introduce el gas en el cilindro, se retiene y comprime y sale. Estos compresores rara vez se emplean como unidades individuales salvo que se requiera un funcionamiento intermitente.

**Compresores rotatorios de desplazamiento positivo:** entre ellos está el de tipo soplador con lóbulos, el tipo de espiral rotatorio, entre otros. Todos tienen el mismo tipo de curva de rendimiento que el compresor reciprocante; es decir, son de capacidad fija con contrapresión variable. Estos compresores se prestan más para las unidades motrices de velocidad variable, como las turbinas de vapor, que los compresores reciprocantes.

### **IX.2 Selección de Compresores.**

Con el objeto de seleccionar un compresor es necesario tener en cuenta algunos puntos importantes de los diferentes tipos de compresores disponibles en el mercado.

Los compresores centrífugos son el tipo que más se emplea en la industria de procesos porque su construcción sencilla, y el poco mantenimiento que requiere, permite un funcionamiento continuo durante largos periodos.

EL compresor más sencillo es el de una etapa, los hay disponibles para flujos desde alrededor de 3000 hasta 150000 PCSM. Cuando la carga requerida es muy grande para un solo impulsor, la solución es dos o más impulsores en serie, que forman los compresores de etapas múltiples. Hay disponibles algunos para flujos desde 1000 hasta 100000 PCSM.

Antes de seleccionar un compresor de etapas múltiples, hay que tener muy en cuenta el aumento de temperatura durante la compresión. Si las temperaturas de descarga son superiores a 350°F, se debe incluir algún sistema para enfriar el gas, con el fin de evitar problemas con los materiales de construcción a altas temperaturas. Por lo general, se necesitan interenfriadores para los gases después de cada etapa, antes de que haya compresión adicional o después de cada cierto número de etapas.

Por su parte, los compresores de flujo axial en donde el flujo de gas es paralelo al eje o árbol del compresor y no cambia de sentido como en los centrífugos de flujo radial, se emplean para flujos más grandes que los centrífugos. La carga por etapa del axial es menos de la mitad que la de una del tipo centrífugo; por ello la mayor parte de los axiales son de cierto número de etapas en serie, estos compresores están disponibles desde unos 20000 PCSM hasta más de 400000 PCSM.

En cuanto a los compresores recíprocos de desplazamiento positivo, éstos abarcan desde una capacidad muy pequeña hasta unos 3000 PCSM. Si hay alta presión y un gasto bajo se emplean estos compresores.

En cuanto a los compresores rotatorios, los cuales son de desplazamiento positivo en los que un elemento rotatorio desplaza un volumen fijo con cada revolución, sólo son para aplicaciones especiales en las que se requiere poco aumento de presión y baja capacidad.

Así, con objeto de adquirir el compresor más adecuado para el servicio requerido se debe hacer la mejor selección posible del mismo aunado a una apropiada instalación, mantenimiento preventivo y correctivo de las partes que lo constituyen lo que finalmente asegurará un mejor empleo de la energía requerida para su funcionamiento.

### **X.3 Aspectos Importantes para el Ahorro de Energía en Compresores.**

A continuación se presentan algunos puntos importantes a tomar en cuenta para el ahorro de energía en compresores:

- \*Se debe seleccionar el compresor más eficiente para el servicio requerido.
- \*En compresión de varias etapas, siempre que sea posible se debe dividir de manera homogénea la potencia entre las etapas, estableciendo relaciones de compresión iguales para todas las etapas.



- \*La presión del gas en el sistema se debe reducir, para disminuir de manera efectiva la relación de compresión.
- \*La sobrecompresión del fluido se debe evitar para no desperdiciar energía.
- \*La temperatura de succión y de interetapas se debe reducir, mejorando o proporcionando interenfriamiento de la corriente a comprimir en las etapas intermedias, lo cual reduce el volumen real del gas que fluye a los cilindros a alta presión, los requerimientos de potencia y mantienen la temperatura dentro de límites de operación seguros.
- \*Se debe seleccionar el motor primario de acuerdo al tipo de compresor seleccionado.
- \*El compresor debe operar fuera del punto de "SURGE", ya que si esto sucede el compresor se dañará al absorber parte de la potencia en forma de calor lo que fusionará los sellos del laberinto que controlan las fugas.
- \*Se debe proporcionar enfriamiento de la alimentación e interetapas para reducir los requerimientos de combustible.
- \*Se deben identificar las composiciones anormales que se puedan presentar del gas a comprimir que pudieran conducir al SURGE.
- \*Se debe tener la capacidad de aumentar o disminuir el diámetro del impulsor, para compresores centrífugos.
- \*Se debe evitar el uso de válvula de control en la descarga y succión del compresor.
- \*Se debe dimensionar la tubería del sistema para una caída de presión mínima para disminuir las pérdidas por fricción.
- \*Se debe evitar la operación de recirculación.

**CAPÍTULO X.**  
**AHORRO DE ENERGÍA EN CALDERAS.**

## **X. AHORRO DE ENERGÍA EN CALDERAS.**

Una caldera es un equipo para generar vapor a presiones arriba de la atmosférica. El vapor se produce debido a la transferencia de calor de un proceso de combustión o de una fuente caliente que tiene lugar dentro de la caldera, o de calentadores de resistencia en el caso de calderas eléctricas.

En seguida se describen estrategias con las que se puede mejorar la eficiencia en calderas.

### **X.1 Reducción del Exceso de Aire.**

El hablar de exceso de aire significa que existe más aire para la combustión del teóricamente requerido, en muchos casos el uso de aire en exceso da como resultado una pérdida de eficiencia ya que se está empleando parte de la energía para calentar aire extra que después se elimina con los gases de combustión.

La Figura X.1 es una gráfica de eficiencia contra exceso de aire que muestra las curvas para dos diferentes temperaturas del gas de combustión. El parámetro más importante que afecta la eficiencia de combustión es la relación aire-combustible como se ve en la figura, que muestra lo que sucede tanto para los casos de deficiencia como para el de exceso de aire de combustión, para dos temperaturas del gas de combustión. Para aire de combustión en exceso la causa más importante del decremento de la eficiencia al incrementar la relación aire-combustible es el incremento en masa y la energía que se transmite por convección en la caldera por el gas de combustión. Las curvas indican que un 100% de aire en exceso produce aproximadamente de 4 a 6% de disminución en la eficiencia dependiendo de la temperatura del gas de combustión.

El decremento en eficiencia al aumentar la temperatura del gas de combustión para un porcentaje fijo de aire teórico es debida al incremento en el contenido de energía sensible del gas de combustión.

Para una deficiencia de aire, la Figura X.1 muestra que la disminución en la eficiencia es mayor que para la operación con exceso de aire. La combustión incompleta, que limita la energía química liberada del combustible, es el contribuyente más importante para este decremento de eficiencia. La Figura X.1 también muestra que la eficiencia es casi independiente de la temperatura del gas de combustión en la región de deficiencia de aire ya que la pérdida de energía de

la combustión incompleta es dominante comparada con la pérdida de energía sensible en el gas de combustión. Por lo que, se debe evitar tener una deficiencia de aire. El operar con deficiencia de aire no es conveniente ya que evita una buena operación de la caldera, se genera hollín y los gases de combustión son potencialmente explosivos. Por lo que, se debe emplear un exceso conveniente de aire para evitar una operación con deficiencia de oxígeno y que al mismo tiempo no sea excesiva con objeto de no malgastar energía.

### **X.2 Instalación de un Economizador.**

La temperatura en el gas de combustión representa calor, el cual se puede recuperar en algunos casos con un intercambiador de calor (economizador) que precaliente el agua de alimentación a la caldera tal como se muestra en la Figura X.2.

Un economizador es apropiado sólo si existe insuficiente superficie de transferencia de calor en la caldera para remover el calor liberado en la flama. La Figura X.3 muestra el mejoramiento en la eficiencia de la caldera comparada con el incremento de temperatura del agua de alimentación a la caldera. La temperatura del gas de combustión es el indicador que determina si se requiere un economizador. Sin embargo se debe tener cuidado al tomar esta decisión ya que muchos factores pueden ocasionar una alta temperatura en el gas de combustión tales como: agua sucia, superficies sucias en tubos, aire en exceso, sobrecalentamiento o insuficiente transferencia de calor. Siendo este último factor el que puede justificar que se instale un economizador.

### **X.3 Reducción de Incrustaciones y Depósitos.**

Las incrustaciones y depósitos sirven como aislantes; esto se ilustra en la Figura X.4 que muestra como, debido a estos depósitos, más calor de la flama se va hacia la chimenea en lugar de aprovecharse en el calentamiento del agua. El mejor indicador de la acumulación de incrustaciones y depósitos es la temperatura del gas de combustión, ya que al incrementar el espesor de las incrustaciones se produce un aumento en la temperatura del gas de combustión manteniendo constante todas las otras condiciones de operación.

Si con la misma carga y aire de exceso la temperatura del gas de combustión aumenta con el tiempo, este efecto se debe probablemente a depósitos o incrustaciones.

El hollín es causado primeramente por una combustión incompleta la que se puede deber a deficiencia en aire, a un quemador defectuoso o a un quemador sucio, entre otras causas. Por lo que se debe ajustar el exceso de aire así como hacer las reparaciones necesarias para eliminar el humo y el monóxido de carbono.

La formación de incrustaciones se debe a la baja calidad del agua, por lo que esta se debe elevar.

#### **X.4 Reducción de la Purga.**

La purga ocasiona que el agua caliente se pierda al drenaje a menos que se use equipo para recuperar la energía involucrada.

Hay dos tipos de purgas:

- (1).-Purga de lodos, la cual está diseñada para eliminar los lodos pesados que se acumulan en el fondo del agua.
- (2).-Purga continua, la cual se emplea para eliminar los sólidos ligeros que flotan cerca de la superficie del agua.

Hay dos factores que pueden contribuir a tener una purga excesiva.

- (1).-Muchas calderas se purgan empleando la purga de lodos ya que el sistema de purga continua nunca se ha puesto a funcionar. La eliminación de sólidos ligeros de la superficie líquida requiere remover la mayor parte del agua.
- (2).-Muchos sistemas de tratamiento de agua se han diseñado por simplicidad y costo inicial bajos dando como resultado un sistema con mucho más purga de la requerida.

Para disminuir la pérdida de energía en la purga, primero, hay que asegurar que la purga de lodos se está usando para el propósito deseado. Segundo, se debe observar la cercanía de los diferentes parámetros de calidad del agua con los

límite. Si la alcalinidad está cerca de su valor máximo mientras que los sólidos totales son mucho menores que su valor límite, el proceso de tratamiento se puede cambiar y la purga reducir. Tercero, se debe analizar la calidad del agua en la caldera usando pruebas químicas estándar. Estas pruebas deben incluir los residuales para sulfatos o quelantes y sulfuro. También se debe medir el nivel de sólidos totales disueltos(STD), la alcalinidad, los sólidos suspendidos y la sílica. Dependiendo del tipo de tratamiento, otras propiedades pueden también requerir su medición.

Ajustar la purga continua cambiará los STD, la alcalinidad, los sólidos totales y el sílice. El residuo de cualquier agente químico también se afecta por la purga pero se debe cambiar ajustando el flujo de alimentación de químico.

#### **X.5 Recuperación del Calor de Desecho de la Purga.**

La mayor parte de la energía en una purga se puede recuperar por medio del sistema mostrado en la Figura X.5. Primero, se puede instalar un tanque dentro del cual la purga se expande esto causará que parte del agua de la purga se expanda y se genere una corriente de vapor el que después se usa para calentar el agua de alimentación. La mayor parte de la energía restante se puede recuperar enviando el líquido efluente del tanque de expansión a través de un intercambiador a contracorriente que se usa para calentar el agua de alimentación.

#### **X.6 Reducción de la Presión de Operación de la Caldera.**

La presión de una caldera establece la temperatura del agua en una caldera que genere vapor saturado. El tener una presión de vapor y una temperatura inferiores genera ahorro de energía. Estos ahorros incluyen menor temperatura en la chimenea debido a la mejora en la transferencia de energía, menor pérdida de calor a través de la pared de la caldera, menor pérdida de calor a través de las tuberías de vapor y menores fugas de vapor causadas por una menor presión. Muchos sistemas tienen estaciones de reducción que bajan la presión de la caldera. Usualmente, es muy sencillo cambiar estos sistemas para operar a una presión inferior. Los requerimientos de proceso determinan generalmente la presión mínima de la caldera.

Pueden existir problemas con la caldera al reducirse la presión. La circulación de la caldera puede interrumpirse o las líneas pueden tener insuficiente capacidad para transportar el vapor de baja presión. Es muy importante programar las purgas de lodo a un punto determinado cuando la caldera este operando a carga parcial con objeto de evitar desorden en la circulación al operar a baja presión.

Cualquier caldera que este operando a una presión mayor de los requerimientos de proceso ofrece potencial para ahorrar energía al reducir la presión de la caldera.

#### **X.7 Precalentamiento del Aire de Combustión.**

La caldera y la chimenea liberan calor al cuarto de la caldera, y el aire caliente sube a la parte superior del mismo. Este aire se puede emplear para precalentar el aire de combustión.

FIG. X.1 EFECTO DEL PORCIENTO DE AIRE TEORICO EN LA EFICIENCIA DE UNA CALDERA.

COMBUSTIBLE

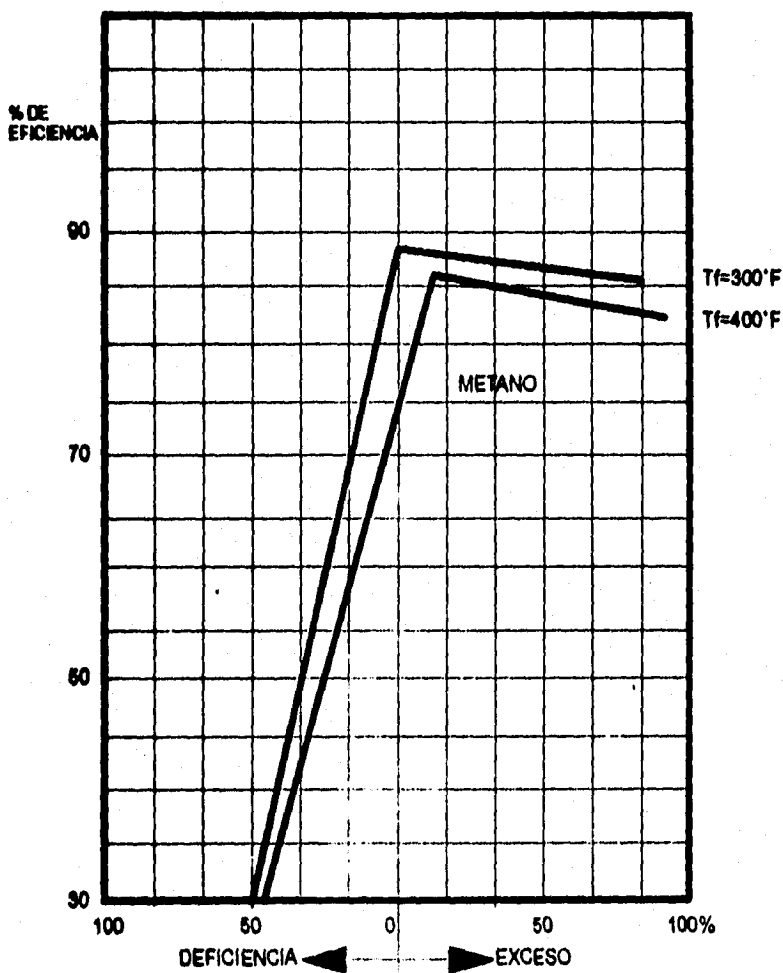
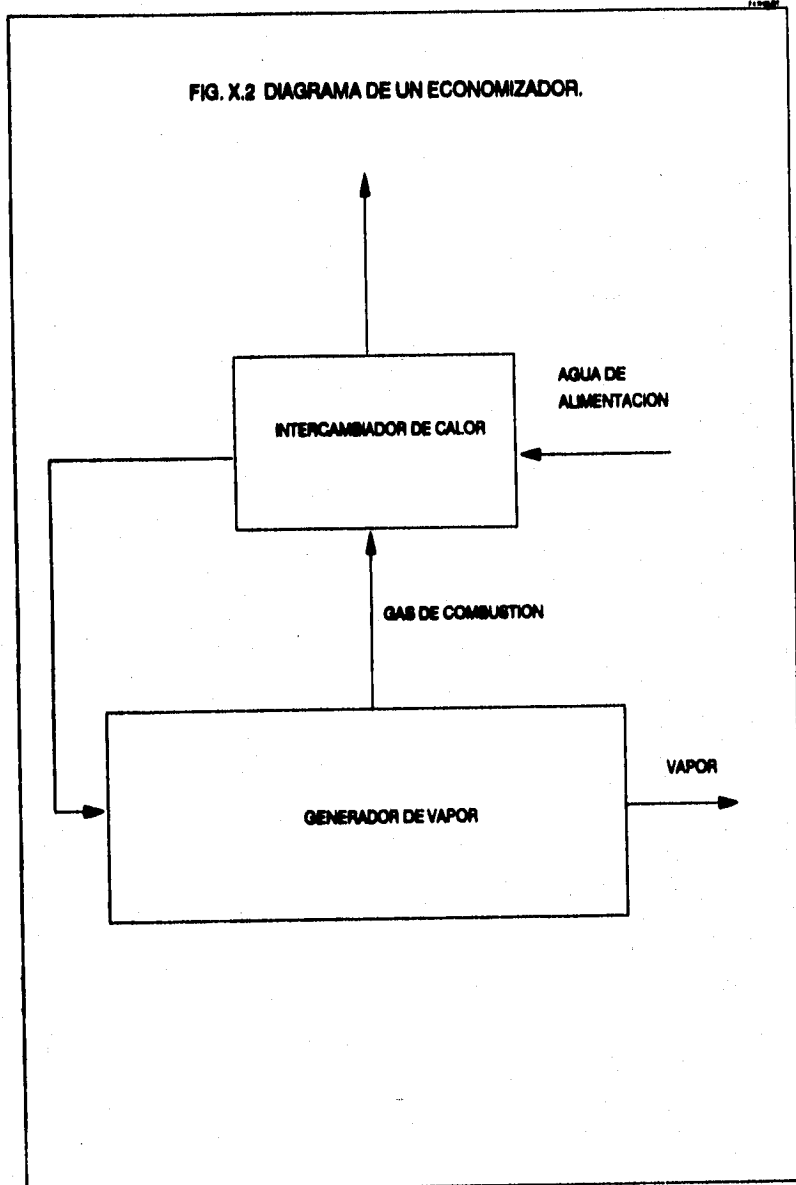




FIG. X.2 DIAGRAMA DE UN ECONOMIZADOR.



**FIGURA X.3 EFECTO DEL INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACION EN LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.**

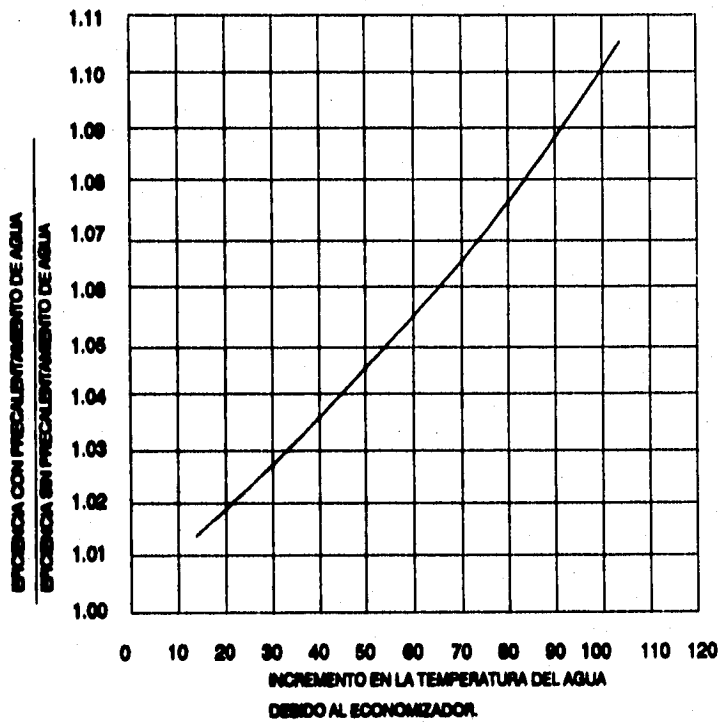
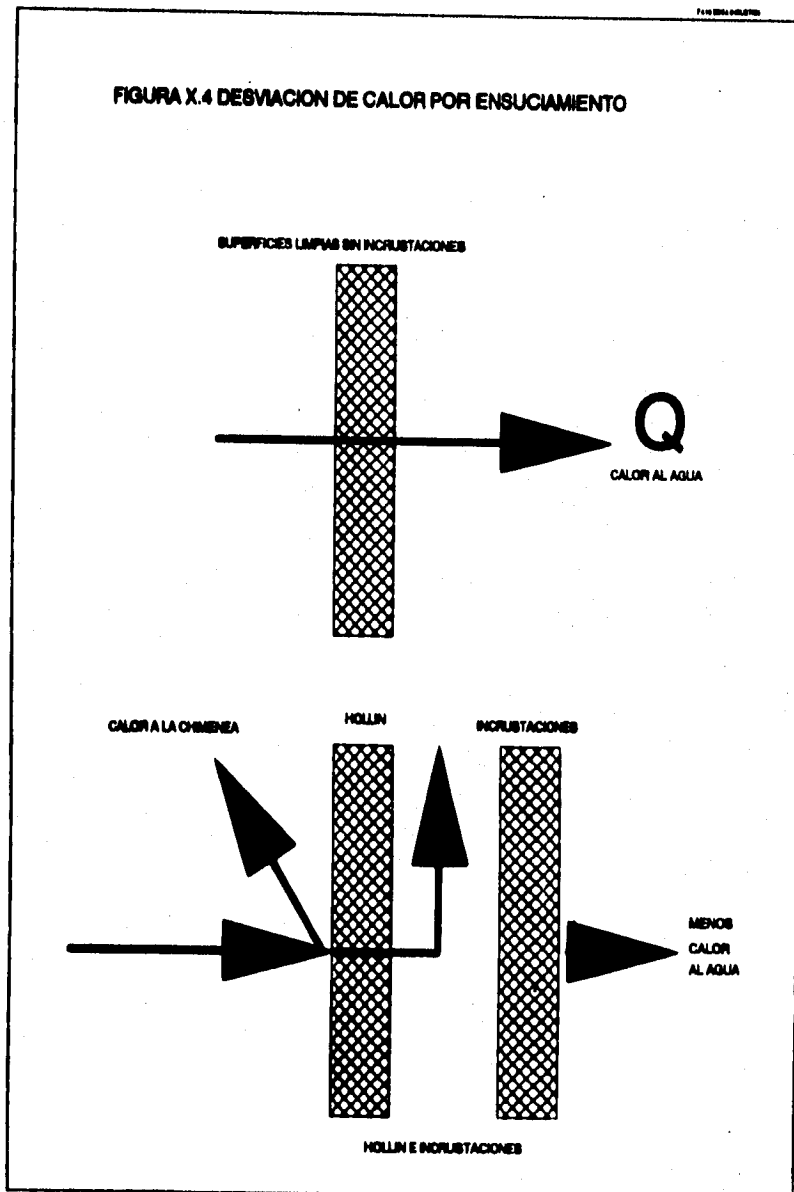
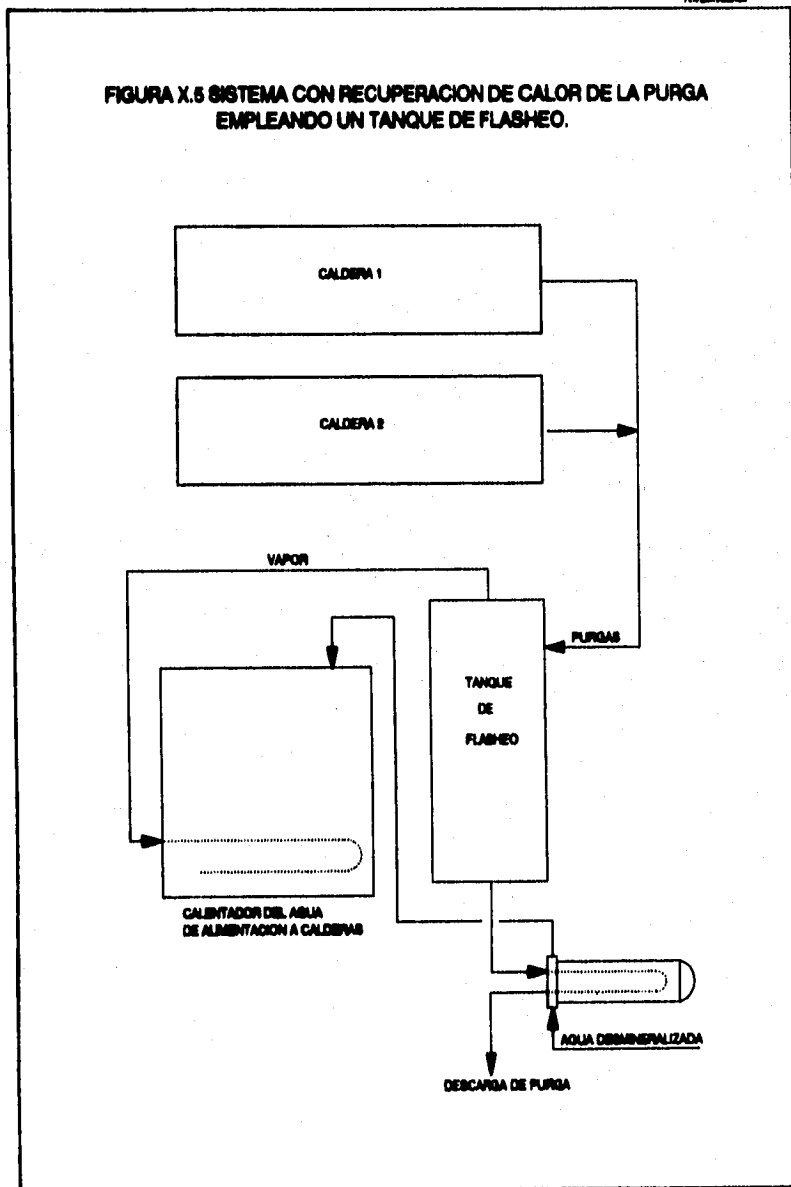


FIGURA X.4 DESVIACION DE CALOR POR ENSUCIAMIENTO



**FIGURA X.5 SISTEMA CON RECUPERACION DE CALOR DE LA PURGA EMPLEANDO UN TANQUE DE FLASHEO.**



**CAPÍTULO XI.**  
**AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE BOMBAS DE CALOR.**

## **XI. AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE BOMBAS DE CALOR.**

Los procesos de destilación son los consumidores de energía mayores en procesos petroquímicos y de refinación. Debido a su simplicidad, sin embargo, constituye la operación de separación más ampliamente usada. Los sistemas de destilación clásicos emplean fuentes independientes de calor tales como vapor o aceite de calentamiento para el rehervidor y agua de enfriamiento o refrigeración para los vapores del domo. Los vastos incrementos en el costo de la energía durante los pasados 15 años han ocasionado que se tienda hacia el uso de sistemas más eficientes en el uso de la energía, los cuales, aunque más complejos, minimizan la necesidad de fuentes externas de calor.

Un proceso de destilación energéticamente eficiente es el sistema de recompresión de vapor o bomba de calor.

### **XI.1 Esquemas**

Varios esquemas de flujo son posibles, pero en el arreglo más común, los vapores del domo primero se comprimen a una presión correspondiente a una temperatura de saturación más alta que la de los fondos de la torre. Los vapores comprimidos son entonces condensados en el rehervidor. El condensado resultante se usa para reflujo y una parte sale como producto.

La energía y los requerimientos de servicios auxiliares se reducen significativamente comparados con el sistema de destilación convencional que consume relativamente grandes cantidades de vapor y agua de enfriamiento. En el sistema de la bomba de calor, el agua de enfriamiento o aire se requiere en cantidades relativamente modestas, utilizándose energía externa (electricidad o vapor) para manejar el compresor. Los requerimientos de energía totales para la bomba de calor pueden ser menos de la mitad de los requeridos para un sistema de destilación convencional.

La destilación con bombas de calor es más económica que la destilación convencional cuando los ahorros de energía generados compensan el incremento de costo de capital mayor del sistema con bomba de calor. A la fecha, la bomba de calor se ha aplicado a un número limitado de separaciones difíciles que involucran compuestos con puntos de ebullición cercanos. Los mejores candidatos para ser separados por este medio son las mezclas con volatilidades relativas bajas, que conducen a diferencias de temperatura pequeñas entre el domo y el fondo de la columna. Dos de las separaciones más

importantes que se ajustan a este criterio son las de propano/propileno e iC4/nC4 o butenos mezclados.

Otra ventaja es que la columna puede operar a temperaturas y presiones abajo de las normalmente establecidas por el agua de enfriamiento y el aire ambiente, mejorando así las volatilidades relativas de los componentes y haciendo la separación más fácil. Por ejemplo una torre separadora de propano-propileno usando agua de enfriamiento a 32°C para condensar los domos tendría una presión en el domo de la torre de 17 kg/cm<sup>2</sup>man.

Con una bomba de calor de una etapa, la presión en el domo de la torre se podría reducir a alrededor de 11.5 kg/cm<sup>2</sup>man. dando como resultado un mejoramiento significativo en la volatilidad relativa y facilidad de separación.

Una reducción adicional en la presión del domo es posible con una bomba de calor que use un compresor de dos etapas. En el sistema de dos etapas, menos del 10% del flujo de la primera etapa necesita comprimirse a un nivel lo suficientemente alto para que el enfriamiento de ajuste transfiera el calor al aire o agua. El resultado es que la presión de descarga de la primera etapa es menor que el correspondiente a la temperatura ambiente, y la presión del domo de la torre es también proporcionalmente inferior. Para una bomba de calor de dos etapas, la presión del domo de la torre se puede reducir a alrededor de 8.5 kg/cm<sup>2</sup>man sin exceder un delta de temperatura del rehervidor de 8°C o una relación de compresión realística. Con una bomba de calor de una sola etapa, una delta de temperatura en el rehervidor de casi 23°C se requeriría para mantener una presión de 8.5 kg/cm<sup>2</sup>man (17°C).

Se pueden emplear tres métodos básicos de diseño para integrar la recompresión mecánica del vapor en una torre de destilación.

#### 1.-Recompresión de Vapor con un Fluido de Trabajo Intermediario.

La Figura XI.1 muestra un esquema que incluye un circuito auxiliar cuyo fluido se vaporiza por medio del intercambio de calor con los vapores del domo de la columna en el condensador. Después de la compresión, el calor del fluido intermediario se intercambia en el rehervidor, este fluido puede subenfriarse con intercambio de calor adicional con la alimentación, lo que mejora la operación global del sistema. El fluido de trabajo se selecciona considerando la temperatura y presión de operación; en muchos casos el agua es el fluido empleado. Esta configuración es para productos corrosivos o sensibles a la temperatura, o para aplicaciones en donde la presión del domo de la columna es

baja y que por lo tanto requeriría equipo grande para efectuar la recompresión del vapor.

### **2.-Recompresión Directa.**

El esquema se muestra en la Figura XI.2 . En este esquema el calor del domo se transfiere al fondo por medio del vapor. El vapor del domo se comprime mecánicamente a una temperatura superior a la del fondo para ceder su energía en el rehervidor por condensación.

### **3.-Compresión del Producto del Fondo.**

El esquema se muestra en la Figura XI.3. En este caso se usa el líquido del fondo como fluido de trabajo, el cual se expande a través de una válvula a una presión adecuada evaporándose parcialmente. El vapor del domo de la columna condensa en un intercambiador de calor en el que cede su calor latente al producto de fondos flasheado y que vaporiza totalmente para en seguida recomprimir los vapores e inyectarlos directamente a la columna. Este ciclo de bomba de calor es apropiado cuando el producto del domo no se puede comprimir, v.g. por estar cerca de su punto crítico.



FIG. XI.1 RECOMPRESIÓN DE VAPOR CON FLUIDO INTERMEDIARIO

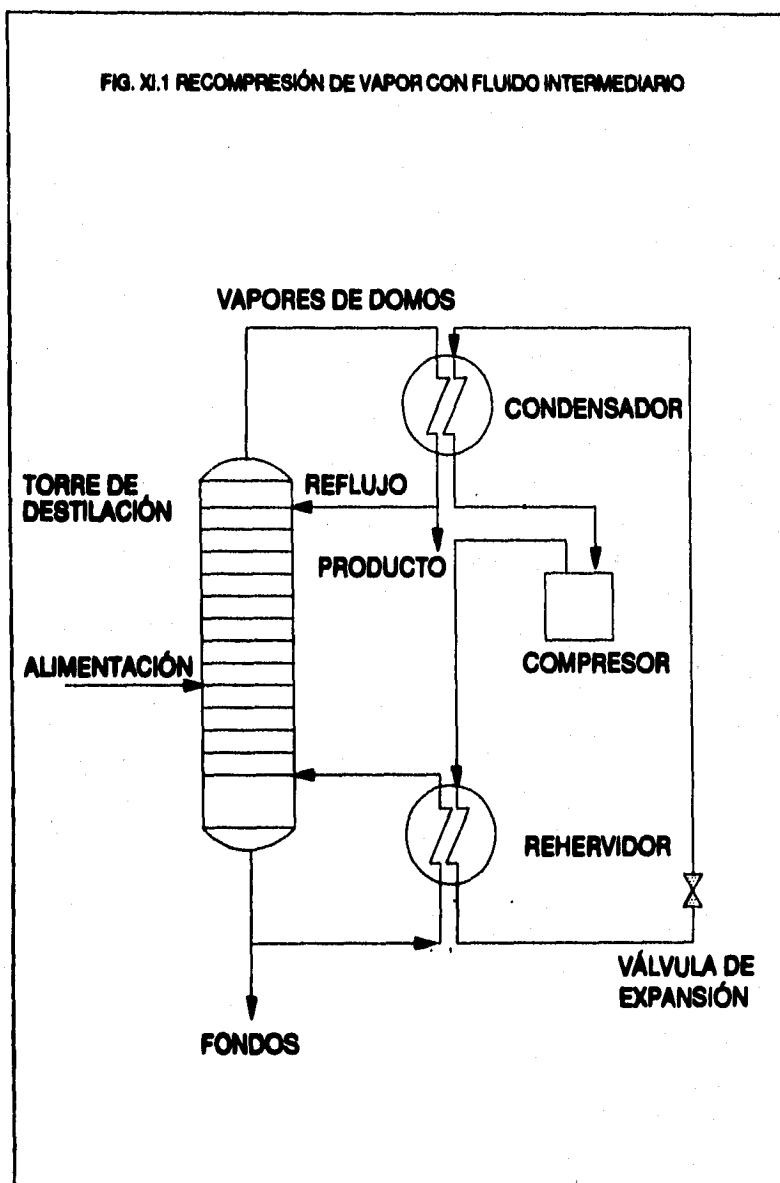


FIG. XI.2 RECOMPRESIÓN DE VAPOR CON LOS VAPORES DEL DOMO

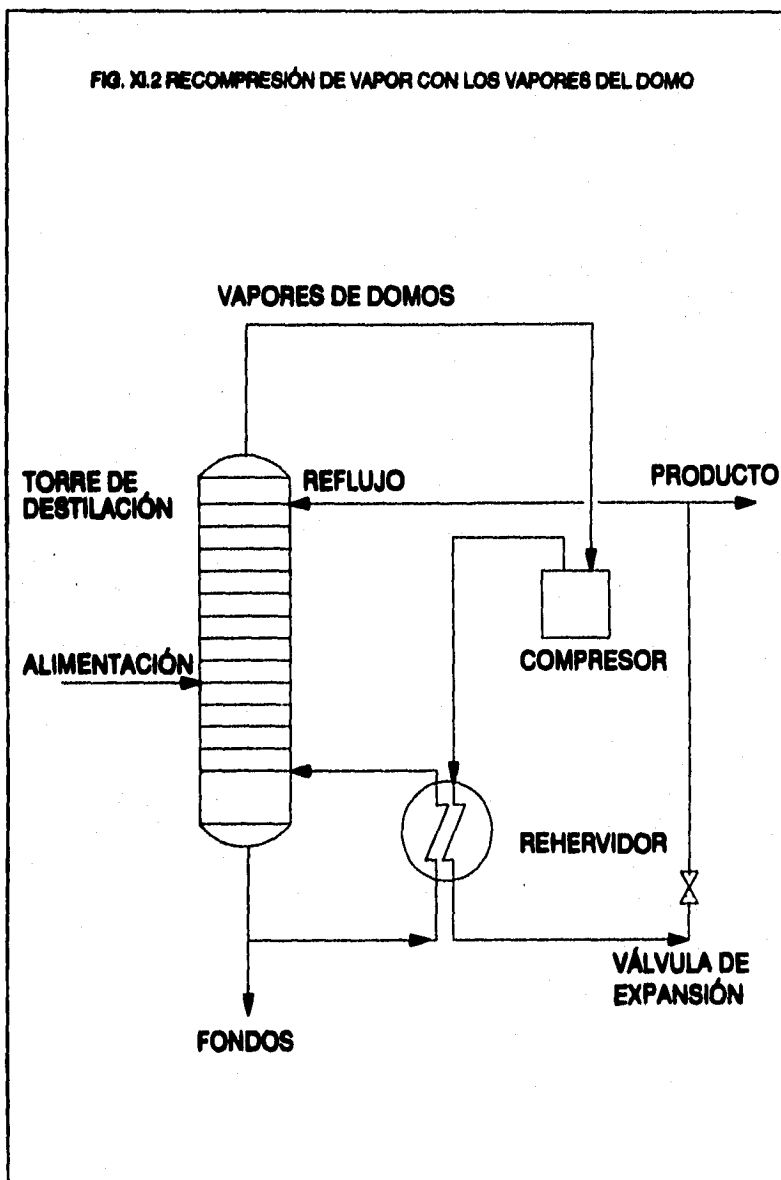
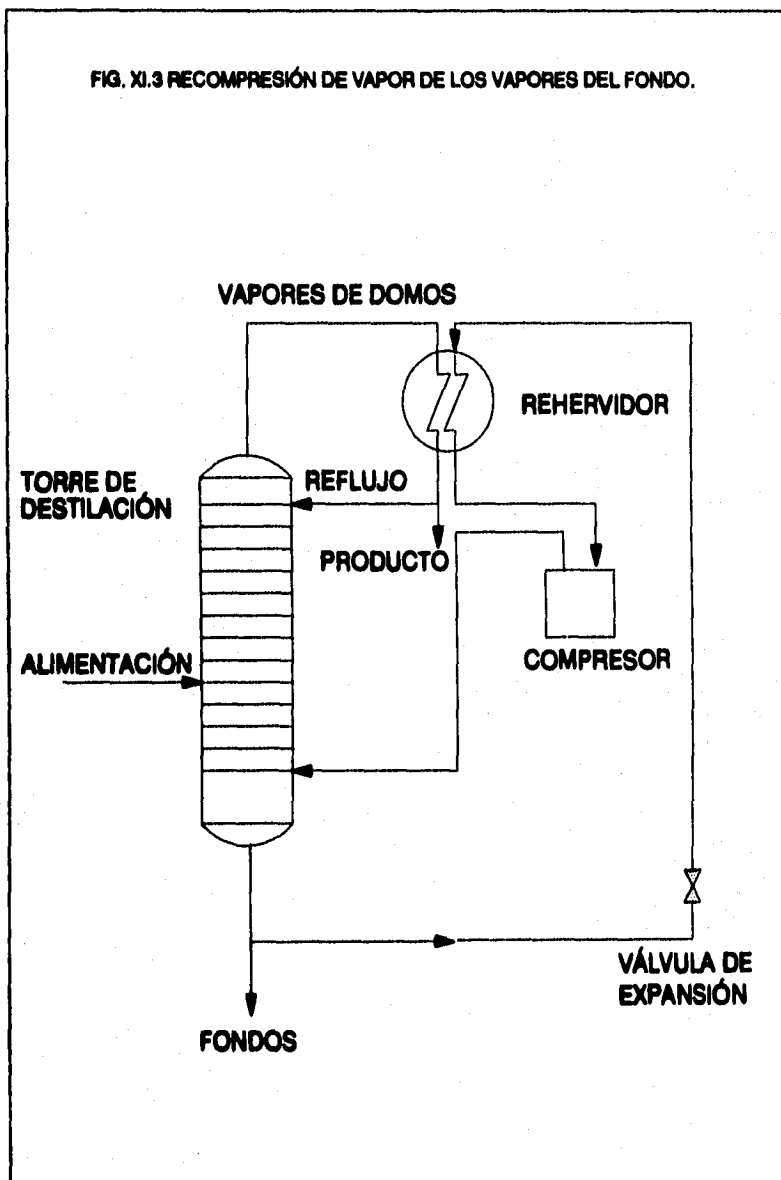


FIG. XI.3 RECOMPRESIÓN DE VAPOR DE LOS VAPORES DEL FONDO.



**CAPÍTULO XII.  
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **XII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En la planeación de un país en desarrollo, se requiere tomar en cuenta los factores que lleven a utilizar de manera óptima los recursos con que cuenta. De esta manera, la energía es un recurso que hay que emplear de manera óptima.

Las refinерías de petróleo no son solamente abastecedoras de energía, sino que también son grandes consumidoras de la misma.

Aunado a lo anterior, los escalamientos de costo en el precio del crudo y servicios auxiliares, demanda que se implementen programas de ahorro de energía para reducir de manera efectiva el consumo de energía.

En el presente trabajo, y de acuerdo con los objetivos iniciales, se han mostrado técnicas y estrategias para hacer un uso más eficiente de la energía en refinerías de petróleo.

Así, de acuerdo a los objetivos, se describieron, mostraron y analizaron técnicas y estrategias de ahorro de energía desde un punto de vista práctico, con las que se puede incrementar la eficiencia en el uso de la energía en una refinería de petróleo.

Complementariamente, se puede concluir que:

La auditoría energética es el primer paso en un programa de conservación de energía, cuyo propósito es el de identificar el consumo total de energía, los usuarios de esta y la eficiencia en su uso.

En general se pueden identificar tres tipos de auditorías: Auditoría de primer grado, auditoría de segundo grado, y auditoría de tercer grado.

En la primera se identifica históricamente la eficiencia en el uso de la energía de una planta, detectando visualmente situaciones obvias de derroche de energía. En la segunda se efectúa un análisis detallado localizando las oportunidades de ahorro de energía y los beneficios al llevar a cabo las modificaciones o cambios. Un análisis económico mostrará si las medidas de conservación son justificables o no.

En la auditoría de tercer grado la identificación de la oportunidades de ahorro de energía se hace en base a un estudio más profundo de las condiciones de operación y a una base de datos más precisa por lo que no se pueden admitir errores por falta de instrumentación. Las recomendaciones generadas de esta auditoría generalmente son de aplicación a mediano y a largo plazo.

Los tres niveles de auditoría forman una progresión natural y los resultados de cada una de ellas proporcionarán un mejor panorama del consumo de energía.

De manera conjunta el desarrollo del programa de ahorro de energía siempre estará relacionado a la capacidad de manejar recursos humanos técnicos y financieros hacia objetivos concretos de reducción y conservación de energía, mediante acciones que se encaminen a planear, organizar, integrar y controlar los diferentes recursos energéticos que se emplean dentro de los procesos y unidades que conforman una estructura productiva.

Dentro de los factores que hay que cuidar para aprovechar la energía empleada en una refinería se encuentra el uso eficiente del vapor lo que involucra su producción y utilización de la manera más económica posible, lo cual conserva energía y reduce gastos por combustible.

Tal aprovechamiento se puede lograr de diversas maneras tales como: Evitando las pérdidas de vapor en las tuberías que lo transporten, instalando controles de temperatura, empleando trampas de vapor a la salida de serpentines en tanques calentados, así como aprovechando el condensado de alta, media y baja presión generados para producir a su vez vapor de media y baja presión que se puede emplear en equipos que lo requieran.

Adicionalmente, se puede considerar el uso de técnicas de diseño para optimizar el uso de la energía como lo es el método del punto de pliegue mediante el cual se pueden generar diseños de redes de intercambio térmico en los que se lleve a cabo una recuperación de calor máxima en redes de intercambio nuevas o mejorar la recuperación de calor en redes de intercambio ya existentes.

Por otro lado, cuando existen grandes cantidades de gas que se deben reducir de una presión alta a una baja, o cuando existen corrientes de proceso a altas temperaturas, se pueden emplear turbinas de gas para manejar bombas, compresores o generadores eléctricos, recuperando así una gran porción de energía que de otra manera sería desperdiciada.

De manera similar, cuando se requiere suministrar calor a altas temperaturas a algunas corrientes de proceso para diversos fines, se utilizan los calentadores a fuego directo los cuales consumen grandes cantidades de combustible en forma de energía. Por lo que con el objeto de aumentar la eficiencia en el uso de la energía en estos equipos se pueden emplear varias estrategias tales como: La reducción del uso de combustible con el uso de controles, el precalentamiento del aire de combustión, el empleo de sopladores de tiro forzado y tiro inducido, la adición de tubos en la sección de convección o la optimización de la combustión, entre otros.

En cuanto a las bombas se refiere, cada bomba centrífuga se diseña para rendir su mejor eficiencia a un flujo, cabeza y velocidad de flecha particulares y cualquier desviación de esta mejor eficiencia ocasionará un desperdicio de energía, por lo que las bombas nuevas se deberán seleccionar de tal manera que la cabeza de operación y los requerimientos de flujo coincidan exactamente con el punto de óptima eficiencia de la bomba seleccionada.

Al igual que para las bombas los compresores se deben seleccionar de acuerdo al servicio requerido aunado a una apropiada instalación y mantenimiento de las partes de que consta lo que asegurará un mejor empleo de la energía requerida para su funcionamiento.

Adicionalmente, el ahorro de energía en una caldera se puede efectuar empleando varias estrategias como: La reducción de la cantidad de purga y la recuperación del calor de desecho en la purga, la instalación de precalentadores de aire, el precalentamiento del agua de alimentación, el empleo de economizadores, el aprovechamiento de la energía en el gas de combustión, la reducción de depósitos e incrustaciones mediante un programa de limpieza periódica y el cambio de vapor a aire de atomización.

Por otro lado, en cuanto a la operación de destilación se refiere, se puede analizar la posibilidad de emplear un sistema de destilación energéticamente eficiente como lo es el de recompresión de vapor o bomba de calor. La destilación con bomba de calor es más económica que la convencional cuando los ahorros de energía generados compensan el incremento del capital mayor del sistema con bomba de calor, la bomba de calor se ha aplicado a un número limitado de separaciones difíciles que involucran compuestos con puntos de ebullición cercanos tales como la mezcla de propano propileno.

Por último, se puede decir que los vastos incrementos en los costos de la energía han ocasionado que se tienda hacia el uso de sistemas más eficientes en el uso de la energía y que todas las formas de ahorro de energía mencionadas al ser aplicadas en forma conjunta pueden generar ahorros globales de energía importantes.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Ashutosh Garg y H. Gosh, "Make Every BTU Count", Engineers India Limited, Chemical Engineering, Octubre 1990, Pags. 217-225.
- 2.- Armer Albert, "The Right Steam Trap", Spirax Sarco, Inc., Chemical Engineering February 15, 1988.
- 3.- Barnwell and C.P. Morris, Bechtel Great Britain Limited, London, "Heat Pump Cuts Energy", Hydrocarbon Processing, Julio, 1982.
- 4.- Becker E. Frederick and Zakak I. Alexandra, "Recovering Energy by Mechanical Vapor Recompression", Thermo Electron Corporation, Chemical Engineering Progress, julio 1985, Pags. 45-49
- 5.- Bruce D. Mackay, P.E., "Your Steam Trap Can Do Better" Chemical Processing, Marzo 1991, Pags. 34-41
- 6.- Brown and Don Figenscher. "Preheat Process Combustion Air" The Air Preheater Company, Wellsville, Nueva York
- 7.- Colbert R. Wayne, "Industrial Heat Exchange Networks", Process Simulation International, Chemical Engineering Progress, Julio 1982, Pags. 47-54.
- 8.- Crincoli C. and Rosso P.G, "Energy Recovery in Fired Heaters", Symposium of Energy conservation, Baghdad Irak, Pags. 24-28.
- 9.- Don H. Pritchett, U.S. Electrical Motors, Prescott, "Energy-Efficient Pump Drives" Chemical Engineering Progress, Octubre 1981, Pags. 87-88.
- 10.- Douglas A. Attaway, "Turboexpander Technology", Randall Process Systems, Chemical Engineering Progress, Noviembre 1985, Pags. 11-17
- 11.- David Dyer, "Steam Efficiency Improvement", Boiler Efficiency Institute, Enero 1988, Pags. 2-40.
- 12.- Feit Edward, "Harness More Energy From Boiler Fluegases", Chemical Engineering, Agosto 1990, Pags. 157-158.

- 13.- Figenschel Don, Preheat Process Combustion Air' Chemical Engineering, Pags. 115-117
- 14.- Flores J., Castells F. and Ferré J. A., "Recompression Saves Energy", Universidad de Barcelona, Hydrocarbon Processing, Julio 1984, Pags. 59-62
- 15.- Gas Processors Association, "Check Lists For Energy Conservation in Gas Processing Plants", Tulsa, OK.
- 16.- Greene W. Richard, "Compresores, Selección Uso y Mantenimiento", The Chemical Engineering Guide to Compressors, Primera Edición, 1989.
- 17.- Gross P.G., "Prevent Exchanger Waterlogging", Spirax Sarco, Inc., Allentown, Pa., Hydrocarbon Processing, Octubre 1991, Pags. 73-75.
- 18.- Gutiérrez Leon Jorge, "Ahorro de Energía en Calentadores a Fuego Directo", Instituto Mexicano Del Petróleo, Pags. 60-67
- 19.- Gundersen T. and Naess L., "The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks", Chemical Engineering, 1988, Pags.503-530.
- 20.- Heat Research Corporation, "Furnace efficiency Improvements" , Agosto 1980, Pags 1-10.
- 21.- "Industrial Pipe Insulation Material", Plant Engineering, Pags. 30-35, October 1984
- 22.- Institut Français du Pétrole Publications, "Energy conservation in Refining and Petrochemistry", Editions TECHNIP, Paris, 1979, Pags. 165-178.
- 23.- Japan Cooperation Center for Petroleum Industry Development, "Energy Conservation in Oil Refineries" Septiembre, 1985.
- 24.- Krueger A.P., "Cat Cracker Power Recovery Techniques" UOP Process Div. ,Des Plaines, Ill., Chemical engineering Progress, Octubre 1975, Pags. 56-61.
- 25.- Kenneth McNaughton, "Bombas, Selección Uso y Mantenimiento", The Chemical Engineering Guide to Pumps, Primera Edición, 1989.
- 26.- Kenney W.F. , Exxon chemical Americas, "Strategies for Conserving Energy, Marzo 1988, Pags. 43-48.

- 27.- Leigh Atwood, "The Role of Turboexpanders in Low-Temperature Processing is Growing", *The Oil and Gas Journal*, Pags. 58-63
- 28.- Linnhoff Bodo, "Pinch Technology Has Come of Age", *University of Manchester Institute of Science and Technology*, Julio 1984, Pags. 33-54.
- 29.- Linnhoff Bodo, "A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy", *University of Manchester Institute of Science and Technology*, 1985, Pags 1-234.
- 30.- Linnhoff and Yurner John A., "Heat Recovery Networks: New Insights Yield Big Savings", *Imperial chemical Industries Ltd., Chemical Engineering*, Noviembre 1981, Pags. 56-70.
- 31.- Lee L. M., Morabito and Wood R. M., "Refinery Heat Integration Using Pinch Technology", *University of South Wales, Australia*, Pags. 49-53
- 32.- O'Neill P.S. and Antonelli R., "Vapor Recompression Systems With High Efficiency Components", *Union Carbide Corp., CEP*, Julio 1985, Pags. 57-62.
- 33.- Orr F. M., "Plan Plant energy Conservation", *Exxon Company U.S.A., Hydrocarbon Processing*, Julio 1973, Pags. 65-68.
- 34.- Panesar K.S., *Foster Wheeler Engineering Corp., "Select Pumps to Save Energy"*, Houston Tx., *Hydrocarbon Processing*, Octubre 1978, Pags. 127-128.
- 35.- PEMEX, *Auditorias Energeticas*, 1980, Pags.1-40.
- 36.- Robert Aegerter, *Northern Petrochemical Co., "Energy Conservation in Process Plants"*, *Chemical Engineering*, Septiembre 1981, Pags. 93-95.
- 37.- Rance Comes Luis, "El Proyecto Administrativo en Proyectos de Ahorro de Energia", *Rancom Ingenieros*, 1985, Pags. 193-197.
- 38.- Robertson J.C. , *Dow Chemical U.S.A., "Energy Conservation in Existing Plants"*, *Chemical Engineering*, Enero 1974, Pags.104-111.
- 39.- Stanton Stanton, *contintacal controls, Houston, "Better Process Heater Control"*, *Hydrocarbon Processing*, Julio 1987, Pags.24-28.

- 40.- Symons Edward, "Competing for Energy", American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., 1971.
- 41.- Sutton G.P., Johnston Pump Co., Glendora, Calif., "Save Energy With Pumps", Hydrocarbon Processing, Julio 1978, Pags 103-106.
- 42.- Swearingen J.S., "Turboexpanders and Processes that Use Them", Rotoflow Corporation, Los Angeles Calif., Chemical engineering Progress, Julio 1972, Pags. 95-102.
- 43.- Sulzer, Distillation Columns With Vapor Recompression", Pags. 1-30.
- 44.- Troop Gary L., "Increase Energy Efficiency via Condensate Reuse", Spirax Sarco, Inc., Chemical Engineering Progress, Julio 1991, Pags. 42-45.
- 45.- Walter T. Deacon, "Quality Steam, Not Steam Quality, Delivers Maximum Heat", Armstrong Machine Works, Inc., Chemical Engineering, Julio 1990, Pags. 141-144.