

87



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA



GRADO EN INGENIERIA QUIMICA
FRONTERA 2010

Análisis de Factibilidad Técnica - Económica
de Sustitución de un Sistema de Calentamiento
a Fuego Directo por Otro a Base de Resistencias
Eléctricas en una Instalación Costa Afuera.

T E S I S
Que para obtener el Título de
INGENIERA QUIMICA
p r e s e n t a
Liliana Linares Hernández



México, D. F.

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

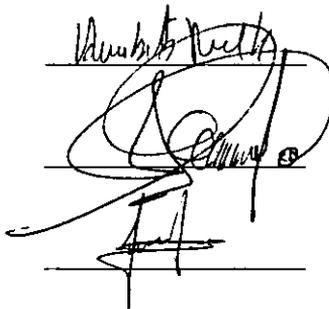
Presidente	Prof. JOSÉ FRANCISCO GUERRA RECASENS.
Vocal	Prof. HUMBERTO RANGEL DÁVALOS.
Secretario	Prof. FERNANDO DE JESÚS RODRÍGUEZ RIVERA.
1er. Suplente	Prof. JOSÉ SABINO SÁMANO CASTILLO.
2do. Suplente	Prof. MARTÍN RIVERA TOLEDO.

Sitio donde se desarrolló el tema: Instituto Mexicano del Petróleo.

Asesor: Ing. Humberto Rangel Dávalos.

Supervisor técnico: Ing. Federico López García.

Sustentante: Liliana Linares Hernández.



The image shows two handwritten signatures in black ink. The top signature is for Humberto Rangel Dávalos, and the bottom signature is for Federico López García. Each signature is written over a horizontal line.

Dedicado a Laura, Carlos, Mercedes y Carlos por su amor por todo lo que significan en mi vida y que aquí, no puedo escribir pero estoy segura de que lo saben.

Agradecimientos:

A la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que aprendí y que hoy día ya no recuerdo, por lo que me divertí y por los kilos que perdí.

Al Instituto Mexicano del Petróleo, y particularmente al moribundo Departamento de Diseño de Equipo de Proceso por todo el apoyo para la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Humberto Rangel Dávalos y al Ingeniero Federico López García por todo lo que tenga que agradecerles.

Y en especial a todos los que no están, pero que en alguna forma compartieron conmigo espacio y tiempo de vida.

Gracias mil.

Zorra mía pon tu cabeza sobre mis rodillas
Estoy bien, sin embargo no soy feliz
No estas ahí
Eres presa del tiempo en que nunca te tuve
Si es eterno este amor
Como vino a sufrir este desliz
No era este verso de él
Que antes de ser nosotros te sedujo
No eran esas manos las tuyas
Porque ya no era yo
Y no eras tu tampoco quien besaba
Y se tendía mustia
Era él
Que antes de ser nosotros te sedujo
Zorra mía tu también sufres
Tu también estas enferma como todos
Ven a beber de mis manos
Esta soledad que no merece nombrarse
Este amor sangra
Este amor duele
Este amor que no sabe de agradecimientos
Quisiera salvarte
Y esconder tu esperanza en un tronco derruido
Esta historia empieza donde sopla el viento
Y esta ciudad arranca en cada esquina
En los juegos extraños de miles como tu
Que ya no son tú
Que ahora son de él
Que antes de ser nosotros te sedujo
Quiero acariciar tu piel salvaje
Llena de la voluptuosidad de tu huida
Quiero que escapemos juntos, aunque me juegue el albur
De encontrar contigo una muerte triste
Zorra aristocrática
Quiero tocar tu frenético cuerpo desnudo en un otoño inhóspito
Tengo celos del mar vacío
Del cielo artero que te engaña
Porque tu no existes
No existe Dios
Tampoco existe él
Que antes de ser nosotros te sedujo
No existe el sol
Ni tu tibio sexo
Porque no existo yo
Porque tu no me existes.

Rubén E. Castro.

INDICE.

	Página
1. Introducción	1
2. Objetivos	5
3. Generalidades	6
3.1 Transferencia de Calor.	6
3.1.1 Mecanismos de transferencia de calor.	6
3.1.2 Coeficientes de transferencia de calor.	9
3.1.3 Coeficiente global de transferencia de calor.	10
3.1.4 Fenómenos que involucra la transferencia de calor.	11
3.2 Calentamiento	12
3.2.1 Procesos de calentamiento	12
3.2.2 Fluidos de transporte de calor.	13
3.3 Calentamiento eléctrico.	14
3.3.1 Calentamiento indirecto con resistencias.	15
3.3.2 Calentamiento directo con resistencias	16
3.3.3 Especificación de calentadores con resistencias eléctricas	18
3.4 Tipos de calentadores eléctricos.	20
3.4.1 Calentadores de banda	22
3.4.2 Cables de calentamiento	23
3.4.3 Calentadores de cartucho	24
3.4.4 Calentadores de tira	25
3.4.5 Calentadores tubulares	27

3.4.6	Calentadores de inmersión	28
3.4.7	Calentadores de circulación	28
3.5	Especificación de Calentadores Eléctricos de Proceso.	30
4.	Plataforma Marina de Compresión	34
4.1	Gas Natural.	34
4.2	Generalidades sobre Plataformas Marinas de Compresión	36
4.3	Antecedentes.	37
4.4	Descripción del proceso	39
4.4.1	Planta de compresión de gas amargo	39
4.4.2	Planta endulzadora de gas amargo	41
4.4.3	Planta deshidratadora de gas amargo	44
4.4.4	Planta potabilizadora de agua de mar	47
4.4.5	Planta de secado de gas dulce	50
4.4.6	Sistema de distribución de gas combustible	50
5.	Sistema de calentamiento	52
5.1	Elementos que componen el sistema de calentamiento	53
5.2	Descripción de los fluidos térmicos	58
5.3	Tipos de fluidos térmicos	64
5.4	Descripción del proceso del circuito de calentamiento en la Plataforma	70
6.	Comparación técnica económica de los sistemas de calentamiento.	74
6.1	Comparación técnica	75
6.1.1	Seguridad	75
6.1.2	Mantenimiento	76

6.1.3	Espacio y peso	78
6.1.4	Disponibilidad de energía	79
6.1.5	Operabilidad	80
6.1.6	Estabilidad	81
6.1.7	Aspectos ambientales y toxicidad	82
6.2	Comparación económica	84
6.2.1	Sistema de calentamiento a fuego directo	86
6.2.1.1	Costos fijos	86
6.2.1.2	Costos de operación	87
6.2.1.3	Costo anual uniforme equivalente	88
6.2.1.4	Valor presente	89
6.2.2	Sistema de calentamiento eléctrico	90
6.2.2.1	Costos fijos	90
6.2.2.2	Costos de operación	90
6.2.2.3	Costo anual uniforme equivalente	91
6.2.2.4	Valor presente	91
7.	Conclusiones	92
8.	Referencias y anexos	96

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, la preocupación mundial por la conservación de las fuentes de energía y del ambiente, englobados en el concepto de desarrollo sustentable, ha sido la fuerza motriz de grandes avances tecnológicos, dado que ha generado una política energética que contempla la investigación y la aplicación de tecnología de vanguardia en los campos de la producción, transformación, distribución y uso racional de la energía, con estricto apego a las normas ambientales nacionales y/o internacionales vigentes. Es por ello que la política energética nacional considera la sustitución de combustibles como petróleo, combustóleo y gas LP por uno como el gas natural, que ofrece numerosas ventajas. Entre las cuales se encuentran su facilidad de combustión (menor emisión de monóxido de carbono e hidrocarburos reactivos), muy bajas emisiones de bióxido de azufre (precursor de la lluvia ácida y sustancias carcinogénicas y carcinocinéticas), mayor seguridad en su manejo (debido a que se disipa rápidamente en la atmósfera, a su elevada temperatura de ignición y a su rango de inflamabilidad limitado, que reducen la posibilidad de un incendio o explosión accidental). Por otra parte, resulta ser un combustible más barato que muchos de los que se emplean actualmente.

Es importante mencionar que México es uno de los países con mayores reservas probadas de gas natural, suficientes para satisfacer su demanda durante los próximos 60 años^[1], esto hace factible la iniciativa de sustitución de algunos combustibles por gas natural en los cuatro sectores consumidores, que son, el eléctrico integrado por el consumo en plantas de generación eléctrica propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de Luz y Fuerza del Centro (LFC); el petrolero representado por el consumo de Pemex y sus organismos subsidiarios; el industrial integrado principalmente por empresas manufactureras y extractivas como la minería, siderurgia, química, etc. y finalmente el residencial y comercial.

En el sector eléctrico se contempla un notable incremento en el consumo de gas natural con una tasa de crecimiento promedio anual de 19.3%^[2], originado por la combinación de una demanda de energía eléctrica (que crece aceleradamente) y una mayor utilización de este

combustible en su generación. Así se estima que para el año 2007 este sector será el principal consumidor de gas natural, aumentando su participación en la demanda nacional de 14.8% en 1998, a 33.8%^[2]. El sector petrolero presentará un crecimiento promedio en la demanda del gas natural de 4.5% anual, debido a su utilización como combustible y para inyección a yacimientos. El gas natural ya es el combustible más importante en el sector industrial. Por ello, se espera que el proceso de sustitución de combustóleo por gas natural siga adelante para incrementar su demanda entre 8.0 y 5.8 % al año.

El sector residencial y comercial, impulsado por un programa de licitaciones de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), tendrá un importante desarrollo. Así se prevé un crecimiento promedio anual de 16.5% para el periodo 1998-2007.

En 1998 se inician en la Zona Metropolitana del Valle de México las acciones concretas encaminadas al fomento del uso de gas natural comprimido en vehículos de uso intensivo.

Con todo lo anterior se prevé una tasa de crecimiento promedio anual de la demanda nacional de gas de 8.9% en el periodo 1998-2007, lo cual implica que tomando como base un consumo de 113.820 millones de metros cúbicos por día en el año 1998, éste llegaría a 245.365 millones de metros cúbicos por día en el año 2007. Dicho incremento representa importantes esfuerzos por parte de PEMEX Corporativo a través de sus subsidiarias PEMEX Exploración y Producción (PEP) y PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB). PGPB, responsable del transporte y distribución del gas natural pasará de una entrega neta de 102.345 millones de m³/d, en 1998 a 163,815.5 millones de m³/d, en el año 2007. En consecuencia, esta filial deberá ampliar su capacidad de endulzamiento de gas, de recuperación de líquidos y de fraccionamiento de productos.

La explotación y el procesamiento del gas natural proveniente de yacimientos marinos se realizan en Plataformas Marinas de Compresión. En ellas se efectúan diversos procesos tales como: endulzamiento y deshidratación de gas amargo, acondicionamiento de gas combustible (plantas de secado) etc., y se proporcionan servicios auxiliares (sistemas de calentamiento, aire de planta e instrumentos, etc.). Como en cualquier otra planta de proceso,

en las Plataformas Marinas la importancia de los servicios auxiliares es sustantiva, ya que su adecuado manejo traerá como consecuencia un funcionamiento eficiente de la planta en general y un mejor aprovechamiento de la energía.

Actualmente los sistemas de calentamiento para plataformas están basados en aceites térmicos, sin embargo, el empleo de estos fluidos presenta diversos problemas originados principalmente por su degradación térmica, proceso que favorece la formación de compuestos ligeros, compuestos pesados y depósitos carbonosos, que ensucian el sistema de intercambio térmico reduciendo la eficiencia de transferencia de calor, ocasionando daños a los componentes del sistema propiciando condiciones de operación peligrosas. Las medidas que en muchas ocasiones se toman para evitar estos daños y aminorar los riesgos, frecuentemente acarrear otros efectos desfavorables como la emisión de contaminantes a la atmósfera y la exposición de los operarios a vapores nocivos para la salud debido a la descarga de ciertos compuestos. Debido a sus propiedades carcinógenas y a los compuestos derivados de su descomposición los fluidos térmicos están reportados como tóxicos y contaminantes ante la Environmental Protection Agency (EPA).

Ante estos inconvenientes y considerando la posibilidad de contar con una elevada disponibilidad de energía eléctrica en la plataforma, el empleo de un sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas se presenta como alternativa viable para proporcionar la energía térmica necesaria en una planta de compresión de gas, ya que el calentamiento eléctrico puede ser aplicado con alta efectividad prácticamente en todas partes en donde se requiera energía térmica sin verse limitado o restringido por consideraciones ambientales y frecuentemente resulta ser la solución a este tipo de problemas. De manera que resulta interesante el análisis de estos sistemas de calentamiento comparándolos de manera objetiva con el fin de contar con una herramienta para la toma de decisiones en el diseño y construcción de nuevas plataformas que serán proyectadas en un futuro o incluso las que ya están en proyecto.

Bajo esta perspectiva surge la necesidad de analizar una vía alterna al sistema de calentamiento en una Plataforma de Compresión. Este sistema tiene como finalidad

proporcionar energía térmica a los servicios de Endulzamiento, Deshidratación, Calentamiento de Gas Combustible y Calentamiento de agua para Potabilizadoras.

El presente trabajo pretende aportar elementos para la realización de este tipo de análisis. El primer capítulo es una breve introducción que da al lector una idea del propósito y la importancia de este estudio. Los objetivos fundamentales se abordan en el segundo capítulo. En el tercer capítulo se muestra un panorama general de los aspectos teóricos que involucran los diferentes medios de calentamiento, concretamente los fluidos térmicos y las resistencias eléctricas, así como los que involucran los procesos de transferencia de calor. El cuarto capítulo hace una descripción de la *Plataforma Marina de Compresión*, siendo esta el objeto de estudio para el análisis de sistemas de calentamiento. El capítulo quinto describe detalladamente el funcionamiento, componentes y condiciones de operación del sistema de calentamiento existente en la *Plataforma Marina de Compresión*. En el capítulo 6 se presenta el estudio técnico-económico para el nuevo sistema de calentamiento. Dicho estudio muestra un análisis comparativo entre ambos sistemas, considerando aspectos operativos, de seguridad, espacio, disponibilidad de energía, mantenimiento, emisión de contaminantes, etc. Además se realiza un análisis de costos que contempla los costos de inversión (costos fijos) y los costos de operación de cada uno de los sistemas. Finalmente, en el capítulo siete se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo.

2. OBJETIVOS.

El objetivo principal de este trabajo es determinar la factibilidad técnica-económica de la sustitución de sistemas convencionales de calentamiento que utilizan aceite térmico por otro a través de sistemas basados en resistencias eléctricas en Plataformas Marinas de Compresión de Pemex.

Presentar una alternativa en sistemas de calentamiento que proponga el ahorro de energía y la conservación del ambiente por la sustitución del medio de calentamiento de un sistema a fuego directo por un sistema de calentadores eléctricos.

3. GENERALIDADES.

El éxito económico de cualquier proceso competitivo requiere considerar el uso eficiente de la energía y el impacto ambiental. Bajo esta consideración se basa la propuesta de este trabajo que consiste en el análisis de alternativas de sistemas de calentamiento en Plataformas Marinas de Compresión, para lograr el objetivo, será necesario hacer una revisión de los conceptos teóricos involucrados en los procesos de calentamiento, los cuales se detallan a continuación.

3.1 *Transferencia de calor*

3.1.1 *Mecanismos de transferencia de calor.*

La transferencia de calor es una operación sumamente importante en los procesos de la industria de la transformación es por ello que se han desarrollado una gran diversidad de estos equipos con la finalidad de utilizar el equipo más adecuado, eficiente y económico para cada necesidad en particular.

Hay tres mecanismos fundamentales de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Los tres tipos de transferencia de calor se pueden producir al mismo tiempo y es aconsejable tomar en consideración la transferencia de calor por cada uno de esos tipos en cada caso particular.

El mecanismo por Conducción es la transferencia de calor que se da en un cuerpo cuando existe un gradiente de temperatura desde la región de alta temperatura hacia la región de baja temperatura, la velocidad de transferencia de calor por unidad de área es proporcional al gradiente de temperatura normal a la superficie a través de la cual el calor se transfiere.

$$Q = A \alpha \frac{\partial T}{\partial x}$$

insertando la constante de proporcionalidad tenemos

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde Q es la velocidad de transferencia de calor y $\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor. La constante k se denomina conductividad térmica del material, y el signo menos se inserta de modo que se satisfaga la segunda ley de la termodinámica (el calor debe fluir en forma descendente en la escala de temperatura). Esta ecuación es la llamada Ley de Fourier de conducción de calor.

Convección es la transferencia de calor desde un punto a otro, dentro de un fluido, un gas o un líquido, mediante la mezcla de una porción del fluido con otra. En la convección natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura; en la convección forzada, el movimiento se produce por medios mecánicos. Cuando la velocidad forzada es relativamente baja, se debe entender que los factores de convección libre como las diferencias de temperatura y densidad, pueden tener una influencia importante. Para expresar el efecto total de la convección se usa una ecuación que involucra no solo el efecto del gradiente de temperatura, sino también el efecto de la velocidad del fluido, sin olvidar que el mecanismo de transferencia de calor en la pared es un proceso de conducción. La ley de enfriamiento de Newton:

$$Q = hA(T_p - T_\infty)$$

Aquí la velocidad de transferencia de calor se relaciona con la diferencia total de temperatura entre la pared y el fluido y con el área superficial A . La cantidad h es denominada coeficiente de transferencia de calor por convección y puede calcularse analíticamente para algunos sistemas, pero para situaciones complejas debe determinarse experimentalmente.

El mecanismo de transferencia de calor por Radiación se lleva a cabo entre dos puntos distantes de diferente nivel energético, sin necesidad de un medio físico de transporte y sin que se eleve necesariamente la temperatura del espacio entre los dos puntos. Este mecanismo opera en virtud de un movimiento ondulatorio en forma semejante a la radiación luminosa, la

radiación térmica puede realizarse a través del vacío y de algunos fluidos, siendo en estos últimos un efecto combinado de la radiación y la convección de los mismos. La frecuencia de la radiación depende completamente de la naturaleza de su fuente.

Según la teoría ondulatoria, cuando un cuerpo emite energía convierte parte de su energía interna en ondas electromagnéticas de vibración transversal a la dirección de propagación de dichas ondas, las cuales se propagan a través del espacio hasta que chocan o inciden en otro cuerpo donde una parte de la energía se absorbe y convierte en energía interna.

En términos de teoría cuántica, la radiación es el fenómeno de transporte de energía térmica en forma discontinua como pequeños corpúsculos de energía llamados "cuantos". Dicha energía se origina por el suministro de otros tipos de energía tales como: la eléctrica, la química, y la lumínica.

La ley que rige este mecanismo de transferencia de calor es la de Stefan-Boltzmann:

$$Q = F_E F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

En donde Q es el calor transferido, F_E es un factor que esta en función de la emisividad del cuerpo con respecto a la del "cuerpo negro", F_G es un factor geométrico que toma en consideración el hecho de que no toda la radiación emitida por un cuerpo es recibida por el otro, σ es la constante de proporcionalidad, llamada constante de Stefan Boltzmann, A es la superficie de transferencia y T_1 y T_2 son las temperaturas de los cuerpos.

La transferencia de calor por convección forzada es el modo que se utiliza con mayor frecuencia en las industrias de proceso. Se bombean fluidos calientes y fríos, separados por una frontera sólida, a través del equipo de transferencia de calor, con una velocidad de transferencia de calor que es función de las propiedades físicas de los fluidos, las velocidades de flujo y la forma geométrica del sistema. En general, el flujo es turbulento y el conducto de flujo varía en su complejidad de tubos circulares a intercambiadores de calor con desviadores y superficies extendidas. Los intercambiadores de doble tubo se utilizan de manera preferencial para flujos bajos y altas temperaturas, las secciones de doble tubo permiten un flujo verdadero a contracorriente, especialmente ventajoso para grandes intervalos de temperaturas del fluido y cuando se requiere un acercamiento estrecho en las temperaturas de

los fluidos. Los intercambiadores del tipo de coraza y tubo, como los rehervidores de caldera, los evaporadores, etc. constituyen la parte más importante de los equipos de transferencia de calor sin combustión en las plantas de procesos químicos. Entre sus aplicaciones están la de reducir la viscosidad de combustóleos pesados, alquitrán, melazas y fluidos similares para que puedan bombearse adecuadamente. En el intercambiador de placa en espiral los sólidos pueden mantenerse en suspensión, y se produce una turbulencia con un número de Reynolds más bajo que en el caso de los tubos rectos.

3.1.2 Coeficientes de transferencia de calor

Uno de los principales problemas que se encuentra en el diseño de equipo de transferencia de calor es el que representa la correcta evaluación de los coeficientes de transferencia de calor por convección, llamados comúnmente coeficientes de película. La tendencia general ha sido el desarrollo de correlaciones del tipo de Nusselt.

Se puede obtener tal tipo de correlación, aplicando la técnica de análisis dimensional. Para un fluido newtoniano se tiene:

$$\frac{h^* De}{k} \propto \left(\frac{De^* v^* \rho}{\mu} \right)^b \left(\frac{cp^* \mu}{k} \right)^c$$

$$Nusselt = Nu = \frac{h^* De}{k}$$

$$No. Reynolds = Re = \frac{De^* v^* \rho}{\mu}$$

$$No. Prandtl = Pr = \frac{Cp^* \mu}{k}$$

Para tomar en cuenta el efecto del gradiente de viscosidad a través del canal de flujo, puede emplearse el factor de corrección adimensional de Sieder y Tate, $(\mu/\mu_w)^p$

Finalmente, considerando una constante de proporcionalidad A . La ecuación resultante es:

$$Nu = A Re^B Pr^C (\mu / \mu_w)^D$$

Los valores de A , B , C y D , deben ser hallados experimentalmente, para cada uno de los diferentes fenómenos y configuraciones geométricas que se encuentran en la práctica.

Debido a la dependencia que los coeficientes de transferencia de calor tienen de las propiedades físicas del fluido, estas deben evaluarse a su temperatura media, excepto μ_w que se evalúa a la temperatura de pared.

3.1.3 Coeficiente global de transferencia de calor

La transferencia de calor global combinada por conducción y convección se expresa frecuentemente en términos de un coeficiente global de transferencia de calor U , definido por la relación.

$$Q = U * A * \Delta T$$

donde A es el área de transferencia de calor y ΔT es la diferencia global de temperatura, frecuentemente evaluada como la media logarítmica de las diferencias de temperaturas de los fluidos.

El coeficiente global de transferencia de calor será entonces:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_r}}$$

si se considera la resistencia proporcionada por el ensuciamiento del equipo, se tiene:

$$Us = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_r} + Rd}$$

en donde R_d es el factor de ensuciamiento y U_s es llamado coeficiente sucio, de servicio o de diseño.

3.1.4 Fenómenos que involucra la transferencia de calor

De acuerdo con el fenómeno físico que se presenta durante el intercambio de calor se tiene la siguiente clasificación:

- Sin cambio de fase.
- Condensación.
- Ebullición.

La clasificación de los equipos de intercambio térmico se efectúa bajo las siguientes consideraciones:

- De acuerdo al proceso de transferencia.
- De acuerdo al tipo de servicio.
- De acuerdo a su función en el proceso.
- De acuerdo al tipo de construcción

Son muchos los tipos de intercambiadores de calor que han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de los diferentes servicios de intercambio térmico en la industria de proceso, la clasificación de estos que se presenta a continuación es de acuerdo al tipo de construcción:

- Intercambiadores de multitubo.
- Intercambiadores de un solo tubo.
- Intercambiadores de calentamiento externo.
- Intercambiadores de placas.

- Intercambiadores con superficies extendidas.
- Intercambiadores de contacto directo.
- Intercambiadores de fuego directo.
- Servicios especiales.

3.2 Calentamiento.

3.2.1 Procesos de calentamiento

En la industria existen diferentes medios de calentamiento y la elección del medio más adecuado depende de las características del proceso, costos de sistema (incluidos los costos fijos y los costos de operación), seguridad de operación, legislación ambiental, y de muchos otros factores. Estos procesos industriales de calentamiento básicamente son: el calentamiento a fuego directo, a fuego indirecto y calentamiento eléctrico.

El calentamiento a fuego directo se da cuando la flama o los productos de la combustión están en contacto directo con el material de proceso a diferencia del calentamiento a fuego indirecto que emplea una superficie de transferencia de calor entre la fuente de calor y el material de proceso. El calentamiento a fuego directo se utiliza en pocas situaciones como manufactura de cemento, mientras que el calentamiento a fuego indirecto es más usado en las industrias de procesos químicos.

El calentamiento a fuego indirecto a su vez incluye dos versiones: calentamiento directo, como calentadores con solo una superficie de intercambio térmico entre la fuente primaria de calor y el material de proceso; y el calentamiento indirecto en donde un fluido térmico circula continuamente entre la fuente de calor y el material.

El calentamiento directo ofrece la más alta eficiencia térmica, pues no se tiene la necesidad de un medio secundario de transferencia de calor con su equipo asociado y costos de operación, además de que se pueden obtener muy altas temperaturas de proceso (cerca de

1800 °F). Desafortunadamente, si el material de proceso calentado es sensible a las altas temperaturas de superficie asociadas con la transferencia de calor directo, pueden presentarse serios problemas de ensuciamiento del lado por el que este fluido circula y deterioro del mismo, particularmente en ciertas zonas de la superficie que están más calientes que el resto. Además de que procesos en los cuales existen múltiples calentadores directos individuales implican un riesgo de incendio comparativamente alto. De ahí que los procesos de calentamiento de materiales estables como gases y fluidos térmicos son el uso más prominente del calentamiento directo.

Prácticamente existen dos formas de transferencia de calor indirecto: en fase vapor donde la transferencia es por el calor latente de vaporización y condensación; y en fase líquida donde la transferencia es por calor sensible a través de un cambio de temperatura.

3.2.2 Fluidos de transporte de calor

Los líquidos y los vapores utilizados para transportar calor y llevarlo hasta los lugares de procesamiento, requieren una combinación única de propiedades. Los elevados puntos de ebullición y las bajas presiones reducen los riesgos y permiten diseños económicos, mientras que la alta capacidad calorífica mejora la capacidad de transporte de calor y su difusión uniforme en el sistema de procesamiento. Por otra parte cabe hacer notar que los fluidos térmicos deben poderse conseguir comercialmente y ser de uso económico. En la tabla 3.1 aparecen los fluidos de transporte de calor que se utilizan más comúnmente junto con sus rangos útiles de temperatura y presión.

Fluido	Temperatura (°F)	Presión (psig)
Vapor	200-1100	0-4500
Agua	300-400	90-230
Dowtherm A	450-750	0-145
Aceite	30-600	-----
Sales fundidas	290-1100	-----
Compuestos de silicio	100-700	-----
Bifenilos clorados	0-600	-----
NaK	100-1400	-----
Mercurio	600-1000	0-180
Gases de combustión o aire	30-2000	0-180

Tabla 3.1 Fluidos de transporte de calor más usados.

3.3 Calentamiento eléctrico.

En la actualidad, el calentamiento eléctrico surge como una alternativa al calentamiento directo o indirecto, debido principalmente a cuestiones de tipo ambiental y de seguridad al personal e instalaciones.

Una de las mayores ventajas del calentamiento eléctrico es su alta eficiencia, esto es cierto para la eficiencia eléctrica, que es el porcentaje de energía eléctrica convertida en calor útil, lo que significa que hay menos calor desperdiciado en la planta. Sin embargo, la generación de energía eléctrica a partir de un combustible fósil sólo proporciona una eficiencia del 30%; por ello las eficiencias globales del calentamiento eléctrico varían desde el 15% en una aplicación de calentamiento dieléctrico hasta el 30% para aplicaciones de calentamiento directo con resistencias.

El calentamiento eléctrico industrial puede dividirse en tres categorías básicas: calentamiento con resistencias, indirecto y directo; calentamiento por inducción y calentamiento dieléctrico. El calentamiento con resistencias se refiere a la generación de calor de acuerdo con la ley de Joule, es decir, a las pérdidas I^2R (I = corriente en amperes y R = resistencia en ohms) en materiales conductores de electricidad cuando pasa una corriente a través de ellos por contacto directo. El calentamiento por inducción se rige también por I^2R , pero la corriente es inducida en el conductor mediante un campo magnético alternativo. El calentamiento dieléctrico es la generación de calor en un material no conductor colocándolo en el campo eléctrico alternativo con los mecanismos de calentamiento basados en las pérdidas ocasionadas por la rotación de un dipolo.

En general, el calentamiento directo con resistencias es el que se emplea más a menudo para el calentamiento de barras y lingotes antes de rolar o forjar el material, para la fundición de vidrio en combinación con otra fuente de calor, en hervidores para agua caliente, y en baños salinos para el tratamiento térmico de metales. El calentamiento indirecto con resistencias en estufas y hornos tiene muchas aplicaciones, desde el secado hasta la fundición. El calentamiento por inducción se utiliza para calentar metales que serán sometidos a fundición o forjado, soldadura y endurecimiento, así como en diversas aplicaciones menos frecuentes. El calentamiento dieléctrico y por microondas se aplica en el secado de muchos materiales, desde madera hasta alimentos, para el procesamiento de materiales plásticos y para gran cantidad de aplicaciones en el calentamiento de alimentos a nivel residencial y comercial, donde las microondas son muy adecuadas.

3.3.1 Calentamiento indirecto con resistencias

Este tipo de calentadores incluye calentadores de resistencia superficial, calentadores por inmersión, elementos de calentamiento no aislados en hornos y estufas y calentadores infrarrojos. Entre los factores que afectan la selección de calentamiento indirecto con resistencias se incluyen el coeficiente de resistencia a la temperatura, resistencia a la deformación, condiciones atmosféricas, resistencia al choque térmico y necesidad de alta resistividad.

El calentamiento infrarrojo (IR) o calentamiento radiante, tiene muchas ventajas, ya que el material que se está trabajando no necesita estar en contacto con los elementos de calentamiento o con el aire circulante. Aunque la generación de calor y liberación hacia el material es más eficiente que en otros métodos que emplean hornos y estufas, el calentamiento infrarrojo tiene una menor eficiencia global ya que la parte de energía útil depende de la capacidad de absorción del material que se calienta.

Las ventajas del calentamiento IR son las siguientes:

1. Puede calentar sólo partes de un proceso o producto.
2. Se requiere menor espacio que con otro tipo de estufas o calentadores.
3. La producción puede incrementarse fácilmente añadiendo otras unidades de calor a las unidades ya disponibles, con objeto de tener más áreas locales de calentamiento o un calentamiento total incrementado.
4. Los sistemas de agotamiento de flujo alto pueden reemplazarse con sistemas de flujo menor, ya que el aire no se calienta excesivamente.
5. Son prácticas para este sistema, las temperaturas de productos hasta 1202°F.

3.3.2 *Calentamiento directo con resistencias*

Los calentadores eléctricos consisten de alambres de resistencia embebidos en un material refractario que luego se protege por una cubierta metálica. Las leyes que gobiernan al calentamiento de las resistencias eléctricas, despreciando el efecto de la resistencia en el circuito son:

la ley de Ohm $I = V/R$

y la ley de Joule $P = V \times I$

donde

I = Corriente, amperes

V = Voltaje, volts

R = Resistencia, ohms

P = Potencia, watts.

En el calentamiento por resistencia eléctrica el elemento es capaz de alcanzar muy altas temperaturas, la temperatura más alta alcanzada por este tipo de calentador es aquella que causa que la energía en forma de calor se disipe a la misma velocidad que se produce. Para evitar que el elemento se queme, el fluido frío o sólido debe ser capaz de recibir calor a una velocidad tal que mantenga a la envoltura metálica por debajo de la máxima temperatura permisible, es decir, el diseño de elementos eléctricos está condicionado por el flujo térmico que puede disiparse en el material frío.

El flujo térmico es la energía cedida en BTU por hora por pie cuadrado de superficie, y en unidades eléctricas se expresa en watts por pulgada cuadrada de la superficie del elemento. La razón a la que la energía eléctrica se convierte en calor está dada por I^2R , estas pérdidas por resistencia en conductores son por lo general indeseables, aunque pueden llegar a ser convenientes cuando el conductor debe someterse a calentamiento. La energía suministrada para el calentamiento directo por resistencias puede ser trifásica o monofásica, proviene básicamente de transformadores de reducción y contactores con capacitores para corrección del factor de potencia.

Los contactos a través de los que se transfiere la corriente son los que presentan más problemas para su diseño, las grandes áreas de contacto y por consiguiente de baja resistencia, son buenas liberadoras de calor y producen terminales frías. Las pequeñas áreas de contacto con poco escape de calor tienen una resistencia alta y ocasionan pérdidas de potencia y sobrecalentamiento local, los contactos deben soportar con frecuencia esta carga. Hay innumerables aplicaciones en las que el calentamiento por resistencia eléctrica puede hacerse operar más efectivamente que la transferencia de calor por un fluido, particularmente en operaciones por lotes. Existen otras ventajas que pueden derivarse del tamaño compacto de los tipos estándar de elementos eléctricos calefactores: la facilidad con la que se generan altas temperaturas, eliminación de riesgos de combustión, y su fácil aplicación y adaptación para control y regulación automática.

3.3.3 Especificación de calentadores con resistencias eléctricas.

La mayor parte de los materiales sean gas, líquido o sólido pueden ser calentados fácilmente con calentadores de resistencia eléctrica por conducción, convección o radiación. Existen tres requerimientos básicos, que cuando se conocen, dejan solamente la selección del tipo y número de los calentadores eléctricos óptimos para la aplicación.

1. Temperatura final deseada: Los calentadores eléctricos con resistencia del tipo envolvente encerrada, normalmente operan desde -300°F o menos hasta aproximadamente 1500°F .
2. Material requerido para la envolvente: La envolvente de cobre es comúnmente usada para aplicaciones de agua, la envolvente de acero para aceites, las aleaciones de acero o el acero inoxidable, para soluciones corrosivas y para las altas temperaturas en el calentamiento de aire.
3. Flujo térmico permitido: Algunos materiales como el agua pueden tomar un alto flujo térmico, mientras que otros, como los aceites del petróleo deben usar un flujo térmico bajo.

Después de resolver los puntos anteriores, se debe escoger el tipo de calentador más apropiado para la aplicación. Por ejemplo, un tanque de agua puede ser calentado por calentadores de inmersión directa, o bien, puede ser calentado desde afuera por calentadores de tiras abrazaderas, o de anillos o tubulares. Casi todos los problemas de calentamiento involucran los tres siguientes pasos:

1. Determinar la capacidad requerida de kw para llegar a la temperatura de operación en el tiempo deseado.
2. Calcular la capacidad de kw requerida para mantener la temperatura de operación.
3. Seleccionar el número y tipo de calentadores requeridos para suplir los kw que se necesitan tomando como parámetro la demanda térmica en kw, que resulte más grande entre los puntos 1 y 2.

Existe un procedimiento general para calcular la capacidad de los calentadores eléctricos que tienen aplicaciones industriales. Este procedimiento está basado en el cálculo de la cantidad de BTU utilizada para calentar o fundir los productos especificados. Esta cantidad es proporcional a la cantidad de producto calentado, su calor específico, su punto de fusión, y la diferencia en las temperaturas inicial y final.

El cálculo del calor perdido, el cual depende de las dimensiones del recipiente de calentamiento y de la diferencia de temperaturas entre el medio de calentamiento y de la atmósfera circundante, es también muy importante. Ciertos márgenes de seguridad deben ser agregados, y la cantidad de BTU calculada debe ser convertida a kilowatts. Estos cálculos son largos y consumen mucho tiempo, sin embargo, si no se busca una exactitud absoluta y estamos de acuerdo con algunas simplificaciones, los cálculos se vuelven más simples. Estas simplificaciones pueden ser las siguientes:

- El calor específico de cada producto calentado es constante a lo largo de todo el intervalo de temperatura aplicado.
- El calor específico del material sólido y fundido es igual.
- El calentamiento y la fundición son realizados en recipientes estándar (definidos como redondos, propiamente aislados, y con una profundidad aproximadamente igual al 50 o 70% de su diámetro).

Para cada recipiente estándar existen datos tabulados y gráficas en fuentes técnicas que permiten un rápido cálculo del calor perdido, el cual depende del diámetro del recipiente y de la temperatura de la sustancia calentada. Los cálculos finales de la capacidad del calentador eléctrico, después de insertar los valores para las simplificaciones, se pueden realizar con la siguiente ecuación

$$Q = \left[(C_p \times \Delta t \times M) + (C_m \times M) + (H_{fusión}) \right] \times f_1 \times f_2$$

Donde:

Q = Capacidad requerida para el calentador eléctrico en kW

C_p = Calor específico del material calentado o fundido en Btu/lb/°F

Δt = Diferencia entre la temperatura inicial y final en °F

M = Cantidad de material calentado o fundido en lb/h

C_m = Calor latente de fusión, Btu/lb

H_L = Calor perdido del recipiente de calentamiento como una función del diámetro del recipiente (D) y la temperatura final (t_1)

f_1 = Factor de conversión para convertir Btu-h a kW-h/h

f_2 = Factor de seguridad, inicialmente 1.1 ó 1.2

3.4 Tipos de calentadores eléctricos

Los calentadores eléctricos en la industria se pueden clasificar de diferentes formas, por ejemplo, se pueden clasificar de una manera muy general por su aplicación en: calentadores de gases, calentadores de líquidos, calentadores de tuberías y calentadores de sólidos o superficies. La Tabla 3.2 nos presenta una variedad de calentadores eléctricos que pueden ser utilizados cuando se conoce el estado de agregación del material que será sometido a calentamiento.

Aplicación	Método	Tipo de calentador
Calentamiento de gases	Directo	Tubular
		Tubular aletado
		Tira aletado
		Aletado
		Conducto
Calentamiento de líquidos	Directo	Inmersión con bridas
	Indirecto	Inmersión con conexión roscada
Calentamiento de tuberías		Indirecto
	Circulación	
	Cable de autorregulación	
	Cable de aislante mineral	
Sólidos y superficies	Directo	Cable de vatiaje constante
		Tubular
		Tira con abrazaderas
	Indirecto	Banda tipo boquilla
		Cartucho
		Circulación

Tabla 3.2 Calentadores Eléctricos utilizados dependiendo de la aplicación respecto al estado del material.

3.4.1 Calentadores de banda

Los calentadores de banda caen en dos clasificaciones; cilíndricos y de boquilla. Estos calentadores están diseñados específicamente para aplicar calor por convección a superficies cilíndricas. Las aplicaciones típicas para los calentadores de banda tipo cilindro incluyen el calentamiento de kettles y lechos fluidizados, extrusión de plásticos, máquinas de moldeo por inyección y soplado, cilindros, troqueles y tambores. Los calentadores de boquilla son más pequeños en diámetro que los calentadores cilíndricos, y son usados en máquinas de moldeo de plásticos por inyección y en cualquier objeto cilíndrico como tuberías, autoclaves, etc.

Tipos de calentadores de banda

- Calentador de banda tipo cilindro de una pieza
- Calentador de banda tipo cilindro de dos piezas
- Calentador de banda tipo boquilla de una pieza

El calentador de banda con aislante mineral es un calentador de alta eficiencia, el aislante mineral es un material que tiene una conductividad térmica mucho más alta que los aislantes de mica, material que se usa en calentadores convencionales.



Fig. 3.1 Calentadores de banda.

3.4.2 Cables de calentamiento.

Los cables de calentamiento son usados para contrarrestar las pérdidas de calor de los equipos de proceso y de las tuberías a través del aislante. Un sistema de líneas de calentamiento es un grupo de equipos de proceso y tuberías, los cuales son calentados con cables y controlados de una manera lógica y económica. Hay muchas razones para recuperar el calor perdido de un sistema; con cualquier pérdida de calor, hay una correspondiente caída de temperatura, que en muchos casos trae consecuencias inaceptables como por ejemplo, el congelamiento del agua en líneas de agua de enfriamiento.

Cables de calentamiento de autorregulación: Están diseñados y contruidos para regular su propia producción, si la temperatura del proceso disminuye, la producción del cable se incrementa y viceversa. Sus aplicaciones en la industria son:

- Protección contra el congelamiento en líneas de agua
- Procesos de baja temperatura
- Protección mecánica
- Aplicaciones para trabajo pesado
- Ambientes corrosivos

Cables de calentamiento de vatiaje constante: Combinan características de cables de calentamiento con resistencias en serie y en paralelo. Estos cables utilizan materiales de alta calidad a un precio modesto. Algunas de sus aplicaciones en la industria son:

- Mantiene la temperatura del proceso
- Protección contra el congelamiento

Cables de calentamiento con aislante mineral: Entre los cables de calentamiento, son los más durables. Debido a su construcción, pueden tener un alto rendimiento de vatios, los cuales pueden ser usados en algunas aplicaciones de calentamiento de procesos.

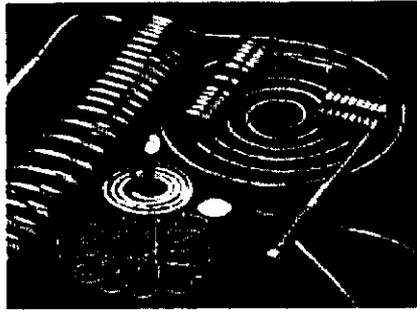


Fig 3.2 Cables de calentamiento

3.4.3 Calentadores de cartucho

Los calentadores de cartucho se utilizan principalmente para calentar troqueles y moldes. Cuando se están utilizando estos tipos de calentadores, es esencial que se verifiquen los siguientes factores para asegurar que el tiempo de vida del calentador sea el más largo posible y, que proporcione el calor suficiente al trabajo que se esté llevando a cabo.

1. Flujo térmico en la envolvente
2. El conveniente empalme del calentador de cartucho en las perforaciones
3. Las medidas tomadas para proteger el calentador de la contaminación de aceite, de los vapores del aceite, etc.
4. Si están instalados los suficientes kW para llevar a cabo el trabajo y recuperar el calor perdido de la superficie plana.

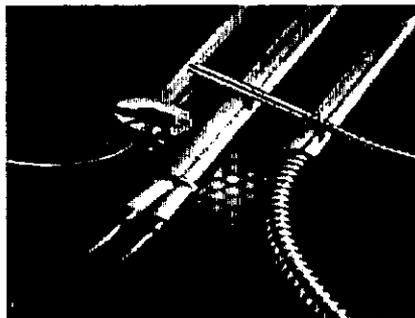


Fig.3.3 Calentadores de cartucho

Tipos de calentadores de cartucho

- Calentadores de cartucho de alto flujo térmico
- Calentadores eléctricos pernados
- Calentadores de cartucho con envoltente de acero inoxidable

3.4.4 *Calentadores de tira.*

Los calentadores de tira son usados principalmente para calentamiento de aire por convección y para instalaciones tipo abrazaderas. Cuando seleccionamos los calentadores de tira para cualquiera de las dos aplicaciones, debemos tomar en cuenta dos importantes factores:

1. El material de la envoltente debe ser el apropiado para resistir cualquier oxidación inherente al proceso o provocada por el ambiente, y la temperatura de la envoltente requerida.
2. El flujo térmico del elemento, o los watts por pulgada cuadrada de área calentada. Este debe ser bajo para el calentamiento de asfalto, melaza y otras sustancias densas con baja transferibilidad de calor; puede ser más alto para el calentamiento de aire, metales u otros materiales conductores de calor.

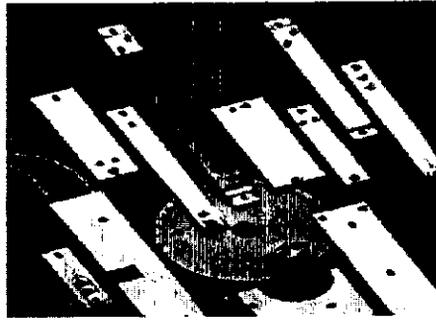


Fig. 3.4 Calentadores de tira

En general, el material viscoso con conductividad térmica baja requiere un flujo térmico bajo, y el flujo térmico alto, puede ser usado con líquidos ligeros y con materiales de alta conductividad térmica.

Tipos de calentadores de tira:

- Calentadores de tira de una terminal en cada extremo
- Calentadores de tira con dos terminales en uno de sus extremos
- Calentadores de tira con dos terminales centradas
- Calentadores de tira con tres terminales
- Calentadores de tira con envoltente de incoloy sin costura
- Calentadores de tira de alta temperatura
- Calentadores de tira sin costura y sin asas montadas
- Calentadores de tira aletados
- Calentadores de tira tipo anillo

3.4.5 Calentadores tubulares

Los elementos de calentamiento tubulares han tenido un enorme incremento en la escala de aplicaciones del calentamiento eléctrico, estos proporcionan la cantidad exacta de calor requerido a un área determinada. El material de la envolvente debe ser el apropiado para resistir cualquier oxidación inherente al proceso o provocada por el ambiente, y la temperatura de la envolvente requerida.

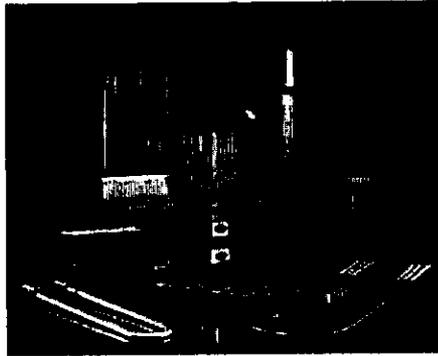


Fig. 3.5 Calentadores tubulares

El agua y las soluciones acuosas generalmente pueden ser calentadas a cualquier temperatura deseada, si el líquido está a bajas presiones, la temperatura no debe exceder la temperatura máxima de la envolvente del elemento menos 100°F.

Tipos de calentadores tubulares

- Calentador tubular con un corte transversal en forma de corazón (triangular)
- Calentadores tubulares aletados
- Calentadores tubulares con un corte transversal redondo
- Calentadores tubulares con un corte transversal plana prensada

3.4.6 *Calentadores de inmersión*

Los calentadores de inmersión de conexión roscada consisten de elementos tubulares doblados como horquillas que están soldados en una conexión roscada y provistos con cajas de instalación eléctrica para conexiones eléctricas.

Los calentadores de inmersión de conexión roscada son utilizados para el calentamiento de líquidos y gases en una variedad de procesos. Estos calentadores son los ideales para procesos de calentamiento de agua y para protección contra el congelamiento, pero también se pueden ocupar para calentar todos los tipos de aceites.

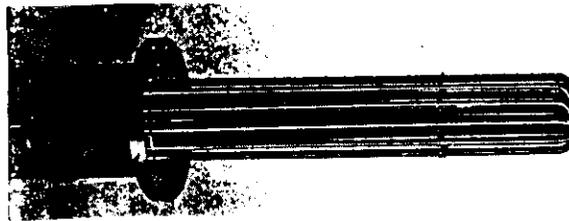


Fig. 3.6 Calentadores de inmersión

3.4.7 *Calentadores de circulación*

Los calentadores de circulación son unidades empacadas diseñadas para calentar un flujo medio para operaciones en línea o ramificadas. Estos calentadores consisten de elementos de calentamiento integrados, cuerpo de calentamiento, termostato, aislante, soportes montados y conexiones externas e internas.

Un calentador de circulación es un tipo de calentador de inmersión en el que un fluido de proceso o una combinación de gases, líquidos y sólidos, pasan a través de un elemento de calentamiento. Por ejemplo, un calentador eléctrico de circulación puede ser usado para

calentar 10 millones de pies cúbicos por día de gas combustible de 70 a 100°F a una presión de operación de 300 psig.

El uso de este tipo de calentadores también conocidos como Calentadores Eléctricos de Proceso está en aumento, no solo en los procesos de la industria química, sino en áreas como la producción de petróleo costa fuera y generación de electricidad. Los cuerpos de estos calentadores son más pequeños y el peso es menor que en los equipos tradicionales de transferencia de calor como los calentadores a fuego directo, indirecto e intercambiadores de calor de haz y envolvente. En muchos casos estos equipos ofrecen mejores resistencias al ensuciamiento y corrosión, y mayor seguridad y control de temperatura.

Los calentadores de circulación convierten energía eléctrica en calor y un diseño adecuado de este usará convección forzada para transferir todo el calor generado dentro de la corriente de proceso. Para aplicaciones en gases a altas temperaturas, el calor también puede ser transferido por radiación, en este caso, el calor es radiado directamente sobre el gas, pero también al recipiente del calentador. El recipiente se calienta más que el gas y transfiere calor al gas vía convección forzada. Los calentadores eléctricos de proceso generalmente son diseñados asumiendo flujo turbulento. Si el flujo es laminar entonces la transferencia de calor disminuye mucho.

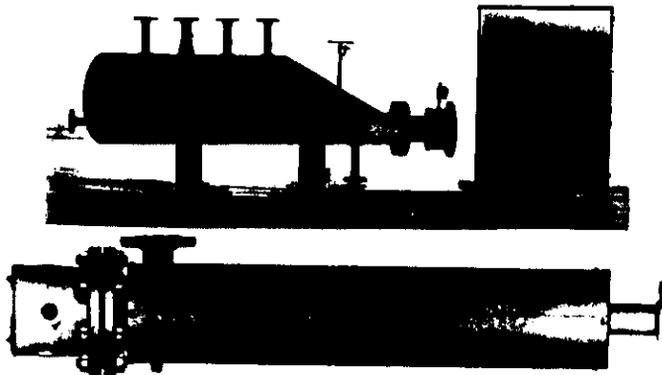


Fig. 3.7 Calentadores de circulación

3.5 Especificación de calentadores eléctricos de proceso.

La especificación de los calentadores eléctricos combina problemas de ingeniería eléctrica, química y mecánica ya que se debe entender el funcionamiento del panel de control para saber como calentará el equipo. Se debe conocer el proceso para comprender correctamente como será removido el calor del calentador eléctrico. Y finalmente se deben entender los esfuerzos mecánicos del recipiente del calentador especialmente en aplicaciones a altas temperaturas donde el calor es transferido por radiación del elemento de calentamiento al recipiente del calentador. El conocimiento en las tres áreas es esencial para resolver problemas de aplicación de estos equipos.

Los calentadores se dimensionan usando los datos de densidad de los watts publicados por los fabricantes. En este sentido la rutina de diseño comercial no ha sido desarrollada todavía para simuladores de proceso que automaticen el diseño y especificación de calentadores eléctricos en procesos de circulación. Para conseguir una especificación optima y prevenir problemas con los calentadores se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones básicas de diseño:

Un calentador eléctrico de proceso es muy similar a un intercambiador de tubos y coraza de tipo BEU, como se define en el Tubular Exchangers Manufacturers Association (TEMA). Los cálculos son muy similares para ambos tipos de unidades. Aunque muchas veces los calentadores eléctricos pueden ser más difíciles de dimensionar y especificar, debido a que ello requiere de la combinación de aspectos como diseño de recipientes a presión, cambiadores de calor y equipo rotatorio.

La temperatura del calentador eléctrico de proceso se incrementa exponencialmente cuando el flujo disminuye. Si se detiene el flujo en el proceso esto parará también el enfriamiento y la unidad sobrecalienta, a pesar de la densidad de watts que se le especifique. De modo que se debe estar seguro de proporcionar el rango completo de flujo al fabricante

El tipo de controladores determinará si la temperatura se incrementa exponencialmente o permanece igual con el decremento del flujo. De manera que es importante seleccionar adecuadamente el tipo de controlador y el panel de control de los equipos.

Dimensionar un calentador eléctrico de proceso no sigue un proceso lineal, pero si es un proceso iterativo. Las propiedades físicas (densidad, conductividad térmica, calor específico y viscosidad) para calcular el coeficiente de transferencia de calor (h_c) son función de la temperatura. La temperatura del calentador eléctrico al principio es desconocida. Entonces, suponiendo un coeficiente de transferencia de calor h_c obtendremos una temperatura en el calentador que provee las propiedades físicas que se necesitan para calcular h_c , la nueva h_c nos da una nueva temperatura en el calentador que da nuevas propiedades físicas para calcular una nueva h_c , y este proceso se repite hasta que converge. En la figura 3.6 se muestra un diagrama de flujo para dimensionar un calentador eléctrico de proceso.

Para hacer el diseño de estos equipos, los fabricantes requieren alguna información básica como temperatura de entrada, temperatura de salida, presión de entrada, presión de diseño, materiales de construcción, requerimientos de pintura y limpieza. El comprador debe estar seguro de especificar:

- Los flujos mínimo, normal y máximo.
- Composición del fluido.
- Caída de presión máxima permisible.
- Voltajes mínimo, normal y máximo.
- Tolerancia de watts de diseño
- Localización y clasificación del área del panel de control.
- Tipo de controlador que se requiere.
- Panel de control adicional.
- Efectos de radiación.

Existen muchos mas detalles de diseño. Estos diseños pueden ser tan variados como que puede hacerse un nuevo diseño por cada proceso. En el diseño participan ingenieros de diferentes especialidades y cada uno de ellos requerirá diferentes datos. Un ingeniero

electricista puede requerir curvas de operación en los componentes del circuito eléctrico. Un ingeniero químico estará más interesado en reducir ensuciamiento de los elementos de calentamiento. Y un ingeniero mecánico requerirá la carga de las boquillas debido la tensión por expansión térmica.

Los calentadores eléctricos de circulación son relativamente nuevos comparados con las bombas y cambiadores de calor. Pero próximamente estos equipos tendrán sus propias especificaciones API, y el dimensionamiento de ellos estará dentro de los simuladores de proceso comerciales, pero hasta entonces los fabricantes son los responsables de hacer buenos diseños.

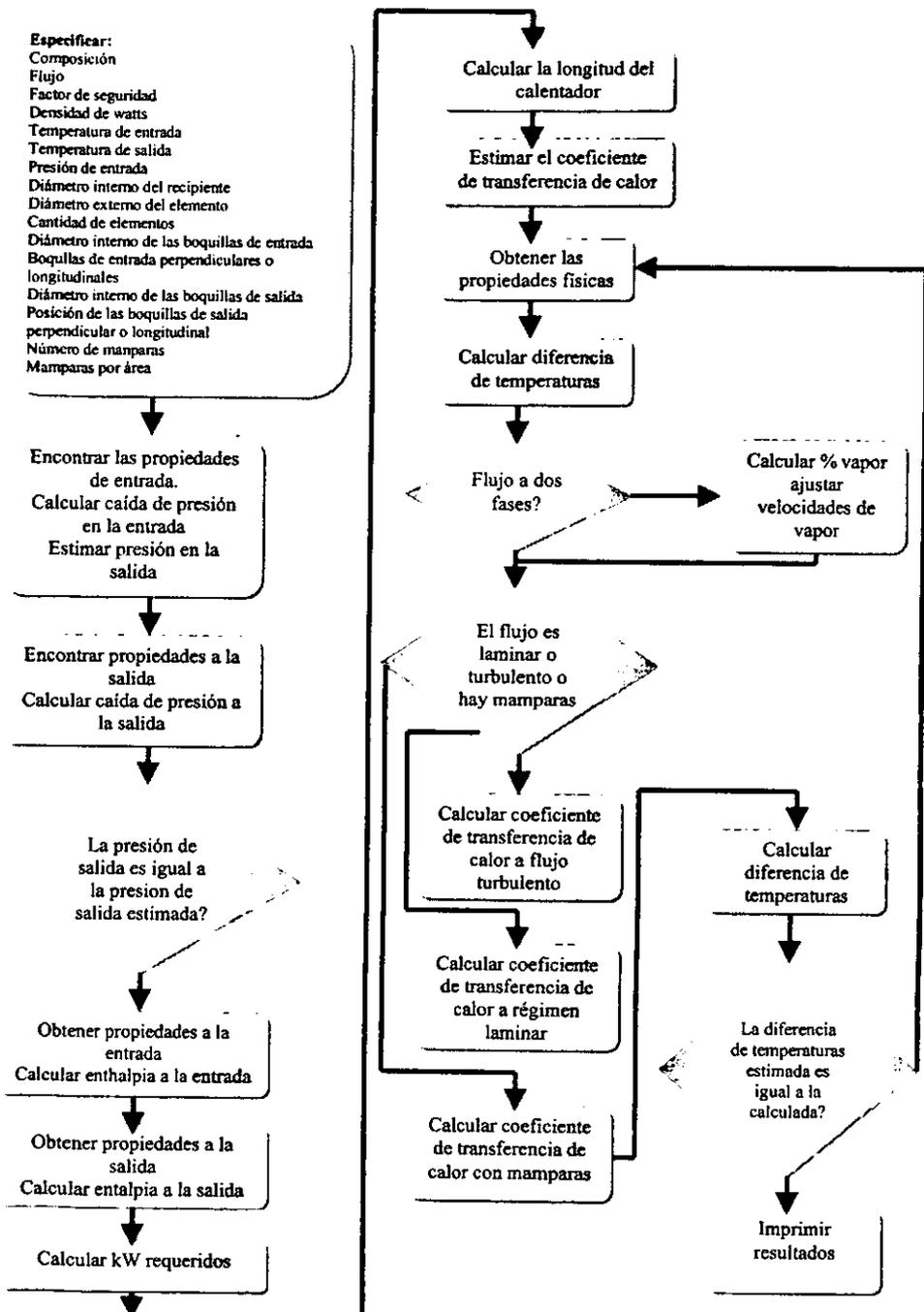


Fig. 3.8 Diagrama de flujo para dimensionamiento de un Calentador Eléctrico de Proceso

4. PLATAFORMA MARINA DE COMPRESIÓN.

4.1 Gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente por metano (CH_4), que se encuentra en depósitos subterráneos profundos formados por roca porosa o en los domos de los depósitos naturales de petróleo crudo. Dependiendo de su origen, el gas natural se clasifica en dos tipos:

Gas asociado: Es el gas que se extrae junto con el petróleo crudo y contiene grandes cantidades de hidrocarburos que son susceptibles de licuarse como etano, propano, butano y naftas.

Gas no asociado: es el que se encuentra en depósitos que contienen únicamente este combustible. También se le conoce como gas seco de campos.

Una de las primeras aplicaciones del gas natural ha sido en la producción de vapor, sustituyendo o complementando, en instalaciones mixtas, la acción de los combustibles sólidos y líquidos.

México es uno de los países con mayores reservas probadas de gas natural: se ubica en el 14° lugar en el mundo con 1.8 billones de metros cúbicos de acuerdo con datos al 1° de enero de 1998. Al nivel actual de producción, dichas reservas son suficientes para satisfacer la demanda de este combustible durante los próximos 60 años^[1].

La tendencia a sustituir otros combustibles con gas natural debido a sus múltiples ventajas, es cada vez mayor no solo en México, sino en el resto de los países del mundo que cuentan con este recurso y aún aquellos que tienen que incurrir en un costo elevado para importarlo, están incrementando cada día su demanda por este energético, como es el caso de Japón.

En la actualidad la demanda de combustibles limpios como el gas natural está en aumento, y para el caso particular de México, la política energética contempla el desarrollo de diversos sectores basándose en el empleo del gas natural, en este sentido PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB) estima que el crecimiento en la demanda del gas natural será aproximadamente de 8.9%^[2] entre 1998 y el año 2007, partiendo de la base de que en 1998 el consumo fue de 113,820.9 miles de metros cúbicos por día y considerando que para el año de 2007 ésta ascenderá a 245,365.5 miles de metros cúbicos diarios, por lo que será necesario incrementar la capacidad de producción del gas natural, para así satisfacer la demanda nacional.

PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB) tiene a su cargo el procesamiento para la obtención de gas seco. El proceso inicia con la extracción de gas amargo por PEMEX Exploración y Producción (PEP) y entregado a PGPB. Al gas amargo primero se le extraen los gases ácidos compuestos principalmente por ácido sulfhídrico para obtener gas dulce. Posteriormente, se le incorpora la carga de gas dulce de campos, mismo que contiene residuos húmedos y licuables, que al ser extraídos, finalmente libera gas seco. La recuperación del etano e hidrocarburos licuables se lleva a cabo mediante procesos criogénicos (uso de bajas temperaturas para la generación de un líquido separable por destilación fraccionada) previo proceso de deshidratación para evitar la formación de sólidos. También se recupera el azufre de los gases ácidos que se generan durante el proceso de endulzamiento. Y finalmente se realiza el fraccionamiento de los hidrocarburos líquidos recuperados, obteniendo corrientes ricas en etano, propano, butanos y gasolina; en ocasiones también resulta conveniente separar el isobutano del n-butano para usos muy específicos.

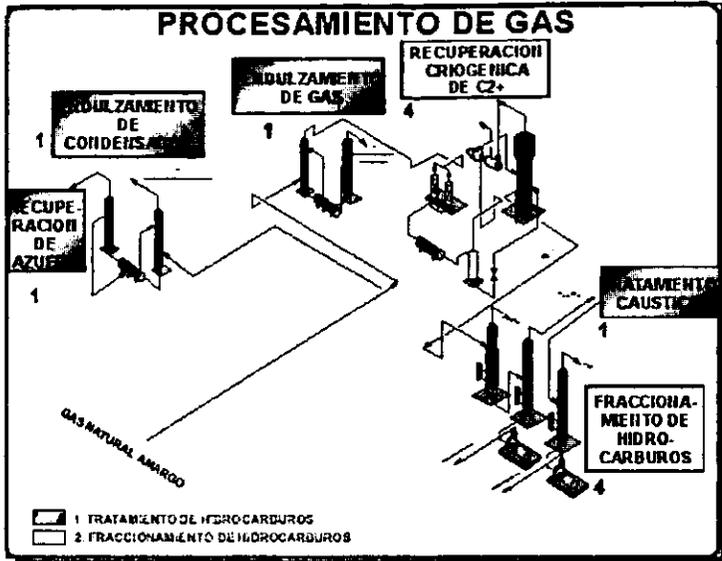


Fig. 4.1 Procesamiento de gas natural

En esta cadena productiva, el proceso de endulzamiento y acondicionamiento del gas natural asociado extraído de yacimientos marinos se lleva a cabo en Plataformas Marinas de Compresión, de donde se obtiene el gas seco que finalmente se alimenta a la red nacional.

4.2 Generalidades sobre Plataformas Marinas de Compresión

Proveniente de la plataforma marina de producción el gas natural separado es enviado a la plataforma de compresión con el fin de prepararlo para su envío a tierra. Para lograr su objetivo, considerando su localización geográfica y la necesidad de operación continua evitando el desaprovechamiento del gas, la Plataforma de Compresión, además de las plantas necesarias para el proceso en sí, cuenta con plantas y equipo auxiliar para servicios indispensables tales como: endulzamiento de gas amargo, deshidratación de gas amargo, generación de agua potable, acondicionamiento de gas combustible (Planta de Secado), sistema de calentamiento, suministro de agua de servicios y contraincendio, distribución de energía eléctrica, aire de planta e instrumentos, etc.

La Planta endulzadora de gas amargo tiene como objetivo reducir el contenido de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono a un mínimo adecuado para utilizarlo como gas combustible en turbinas y servicios generales que requiere la plataforma, además de evitar problemas de corrosión en los equipos que lo utilicen. La planta de deshidratación tiene como finalidad reducir el contenido de agua de la corriente de gas que se envía a tierra para evitar problemas de corrosión en el transporte y manejo. La planta de secado de gas dulce tiene como función acondicionar el gas dulce eliminando las fracciones de hidrocarburos y agua contenidos en el mismo, que puedan condensar y dañar las turbinas de los compresores, generadores de energía eléctrica y equipos en general en los que será suministrado. Una Plataforma de compresión también requiere de un sistema de distribución de gas combustible libre de condensados para satisfacer ciertos requerimientos de la Plataforma. Y por último, para cubrir las necesidades energéticas, la Plataforma de Compresión cuenta con un sistema de calentamiento que consiste en un circuito cerrado de intercambio de calor en el que se utiliza aceite térmico del tipo Dowtherm G-40 como medio de calentamiento para las plantas endulzadora, deshidratadora, para el sistema de distribución de gas amargo y para la planta potabilizadora de agua. A grandes rasgos este es el funcionamiento de una plataforma de Compresión.

Dada la importancia que ha tomado en los últimos años el ahorro de energía y la conservación del ambiente, resulta atractivo el análisis del sistema de calentamiento en una plataforma marina de compresión, de ahí que el objetivo de este trabajo sea la realización de un estudio técnico y económico comparativo entre dos sistemas de calentamiento, uno el convencional por medio de aceite térmico y el otro, un sistema de calentamiento basado en resistencias eléctricas.

4.3 Antecedentes

La planta nacional encargada de procesar gas natural pertenece a PEMEX Gas y Petroquímica Básica y está constituida por nueve centros de procesamiento de gas (CPG), ocho localizados en el sur y uno en el norte del país. Dichos centros son Cactus, Ciudad Pemex, Nuevo Pemex, La Venta, Matipianche, Pajaritos, Cangrejera, Posa Rica y Reynosa.

El desarrollo de la ingeniería del Complejo de Producción de Litoral de Tabasco, que comprende una Plataforma de Producción, una Plataforma de Compresión y una Plataforma Habitacional surge dado los excelentes resultados que se han tenido en los pozos perforados en dicha área, en la cual actualmente se tienen descubiertos nueve campos en el área marina: Sinán, Bolontiku, May, Yum, Kab, Mison, Kix, Yaxche, Hayabil, y uno en el área terrestre, el campo Costero. Adicionalmente se contempla procesar en dicho complejo la producción de los campos productores Och-Uech-Kax.

El Complejo de Producción de Litoral de Tabasco estará ubicado a 8 km al sur de la actual Plataforma de Rebombeo.

En la Plataforma de Compresión se recibirá el gas separado de la Plataforma de Producción y se le elevará su presión hasta un nivel adecuado, de forma tal que previa deshidratación y algún procesamiento adicional en la Terminal Marítima de Dos Bocas, el gas llegue a 70 kg/cm² man. al Centro Petroquímico (CPQ) Cactus.

Con el fin de realizar el estudio que integra la parte medular de este trabajo se ha considerado para el análisis a la Plataforma Marina de Compresión, que forma parte del Complejo de Producción de Litoral Tabasco.

En este capítulo se presenta la descripción de los procesos que se llevan a cabo en las plantas de Compresión, Endulzamiento y Deshidratación de Gas Amargo, Potabilizadora de Agua de Mar, Secado de Gas Dulce y Sistema de Distribución de Gas Combustible. El sistema de aceite de calentamiento se describe en el siguiente capítulo.

4.4 Descripción del proceso

4.4.1 Planta de Compresión de Gas Amargo

Ver dibujo 01 "Diagrama de flujo de proceso de la Planta de Compresión de Gas Amargo" en el anexo.

La planta de Compresión de Gas Amargo recibe la alimentación de la Plataforma de Producción PB-LT-A y tiene como objetivo elevar la presión del gas hasta la necesaria para su envío a tierra.

La planta esta formada por cuatro Módulos de Compresión (tres en operación y uno en relevo), a fin de cubrir el amplio rango de producción de gas contemplado en los pronósticos de producción. Cada Módulo está constituido por un compresor de alta presión con capacidad máxima (nominal) de 160 MMPCSD (@ 60°F y 1 ATM).

Los compresores son de tipo centrífugo y están conectados en paralelo. Una misma turbina acciona todos los compresores de cada módulo.

El gas proveniente del separador de baja presión de la Plataforma de Producción se une con el gas resultante (gas ácido y gas motriz) proveniente del eyector de la planta endulzadora y la mezcla de ambos se envía al tanque receptor de líquidos FA-5203 (4.5 kg/cm² man. y 50°C) con el fin de eliminar la presencia de líquido que pueda arrastrarse o generarse en el trayecto, antes de alimentarse al compresor de primera etapa de baja presión.

El líquido que posiblemente se obtuviera en este tanque se envía a drenaje presurizado. La corriente de gas se alimenta a los tanques de succión del compresor de 1era. etapa, baja presión FA-5204 AC/D, los cuales cuentan con filtros de cartucho que permiten una limpieza más fina de la corriente gaseosa, atrapando pequeñas partículas que pudieran arrastrarse, facilitando así la operación de los compresores.

El gas es enviado posteriormente a los compresores de baja presión, 1era. etapa GB-5201 AC/D, a control de presión con la turbina de los mismos, para elevar su presión hasta

13.0 kg/cm² man. El gas comprimido pasa por los enfriadores EC-5201 AC/D donde se disminuye su temperatura a 52 °C (y a una presión de 12.3 kg/cm² man.), alimentándose enseguida a los separadores FA-5205 AC/D, donde se eliminan los condensados generados por el enfriamiento, que posteriormente se alimentan al tanque trifásico FA-5207 (@ 34.5 kg/cm² man.) previo incremento de su presión a través de las bombas GA-5200 AC/D.

El gas obtenido en los separadores FA-5205 AC/D se envía a la succión de los compresores de segunda etapa, baja presión GB-5201 AC/D donde se eleva su presión desde 12.3 hasta 35.0 kg/cm² man. , bajando su temperatura en los enfriadores EC-5202 AC/D hasta 52 °C. La mezcla resultante de estos últimos equipos, se envía a los separadores FA-5206 AC/D (@ 35.0 kg/cm² man. y 52 °C).

Los líquidos generados en estos separadores se envían junto con los obtenidos en los separadores FA-5205 AC/D al separador trifásico FA-5207 donde el condensado separado se une, previo bombeo por medio de las GA-5201 A/B, a los condensados obtenidos en la compresión de alta presión para inyectarse al gasoducto que va a tierra.

El agua separada en el FA-5207 se une con la obtenida en los separadores FA-5202 AC/D y se envían (@ 12.0 kg/cm² man. y 52 °C) a la Planta de Tratamiento de Agua que se encuentra en la Plataforma de Producción.

El gas obtenido del separador FA-5207 se mezcla con la corriente de gas de alta presión proveniente del separador de primera etapa de la Plataforma de Producción y con el gas separado en el FA-5206 AC/D, la corriente resultante se alimenta a los Slug-Catcher FA-5200 AC (@ 33.0 kg/cm² man. y 52 °C) para eliminar los líquidos que pudieran arrastrarse. Los Slug-Catcher FA-5200 AC cuentan con internos de alta eficiencia.

El gas obtenido de los tanques FA-5200 AC se alimenta a los tanques de succión de los compresores de alta presión FA-5201 AC/D (@ 33.0 kg/cm² man. y 52 °C) donde se eliminan las partículas que pudieran estar presentes en la corriente; posteriormente el gas pasa a los compresores GB-5200 AC/D donde se eleva su presión hasta 80.0 kg/cm² man. para finalmente enfriarlo en los EC-5200 AC/D donde se abate su temperatura hasta 52 °C.

El líquido acumulado en los FA-5200 AC se integra con los posibles condensados separados en los FA-5201 AC/D y se envían (@ 7.6 kg/cm² man. y 46 °C) al separador de segunda etapa de la Plataforma de Producción para su recuperación.

A la salida de los enfriadores EC-5200 AC/D se generan una mezcla gas-líquido que se alimenta a los separadores trifásicos de alta presión FA-5202 AC/D. Los condensados obtenidos en estos separadores se envían a control de nivel al gasoducto que transportara el gas deshidratado de Litoral de Tabasco a tierra (@ 79.6 kg/cm² man. y 52 °C). El agua se envía a la Planta de Tratamiento de agua junto con la corriente de agua generada en el separador trifásico FA-5207. El gas obtenido es dividido en tres corrientes, una se envía a tratamiento a la Planta Endulzadora (20 MMPCSD) para consumo propio de la plataforma como gas combustible, previo secado; la segunda corriente (2.4 MMPCSD) se envía como gas motriz para el eyector utilizado en la recuperación de gases ácidos de la Planta Endulzadora, y el resto se envía a tratamiento a la Planta Deshidratadora.

4.4.2 Planta Endulzadora de Gas Amargo

Ver dibujo 02 "Diagrama de flujo de proceso de la Planta Endulzadora de Gas Amargo" en el anexo.

La Plataforma de Compresión CA-LT-A cuenta con dos Plantas Endulzadoras de Gas Amargo (una en operación y otra de relevo), que tienen como objetivo reducir el contenido de ácido sulfhídrico y bióxido de carbono a un mínimo adecuado para utilizarlo como gas combustible en turbinas y servicios generales que requiere la plataforma, para evitar problemas de corrosión en los equipos que lo utilicen.

Cada Planta de Endulzamiento tiene una capacidad de 20 MMPCSD de gas amargo a endulzar (capacidad máx / nor).

El endulzamiento del gas se lleva a cabo utilizando una solución de Metildietanolamina (MDEA) al 50% en peso como agente absorbente.

La especificación de H₂S que debe tener el gas combustible a la salida de las plantas endulzadoras es de 4 ppm como máximo.

Contenido de H₂S: 4 ppm máximo

Las Plantas Endulzadoras de gas amargo, están constituidas, cada una, por tres secciones que son la de Endulzamiento, Regeneración y Recuperación de Gases Ácidos.

Sección de Endulzamiento.

En esta sección se alimentan dos corrientes: una de gas amargo, proveniente del Sistema de Compresión de Gas Amargo, y otra de solución con base en Metildietanolamina (MDEA), proveniente de la Sección de Regeneración del mismo paquete.

El gas amargo proveniente del Sistema de Compresión entra al Separador de Gas de Alimentación FA-5400, provisto con internos de alta eficiencia, a fin de eliminar los hidrocarburos líquidos que pudieran arrastrarse o generarse en el trayecto hacia las plantas paquete y evitar con ello la formación de espuma en la Torre Absorbedora.

Una vez que el gas amargo sale del FA-5400 (@ 80.0 kg/cm² man. y 52 °C) se alimenta a la parte inferior de la Torre Absorbedora de Gas Ácido, DA-5400, para ponerse en contacto a contracorriente, con la solución de MDEA pobre (la cual entra a una temperatura de 10°F mayor que el gas amargo alimentado a la torre), procedente de las Bombas de MDEA de Alta Presión GA-5401/R, previo enfriamiento en el EC-5400 y Acumulación en el Tanque de Balance de MDEA FA-5404. La MDEA es alimentada por la parte superior de la torre DA-5400 que cuenta con empaque estructurado en donde la MDEA absorbe la mayor parte del H₂S, de modo que cuando el gas sale del domo de la misma torre (79.5 kg/cm² man. y 54 °C), su contenido de H₂S no excede la especificación requerida. Esta torre cuenta también con una malla separadora que evita que el gas arrastre cantidades significativas de MDEA. La MDEA rica sale del fondo de la torre y pasa por la válvula de control de nivel, en la que se reduce la presión de la corriente hasta la mínima requerida considerando la hidráulica del sistema y la mayor desorción de los hidrocarburos en el Separador FA-5402. El gas ya endulzado, pasa al Separador de Gas Dulce FA-5401 (con internos de alta eficiencia) a fin de eliminar posibles

arrastres de MDEA. El gas obtenido se envía a Sistema de Secado. Los posibles líquidos se unen con la corriente de MDEA rica procedente de la Torre Absorbadora para enviarse hacia el Tanque de Desorción de Hidrocarburos FA-5402.

Sección de Regeneración

La MDEA rica proveniente de la Sección de Endulzamiento se recibe en el Tanque de Desorción de Hidrocarburos FA-5402; la fase gaseosa sale a control de presión, por la parte superior del tanque para enviarse a quemador. En caso de arrastre de hidrocarburos en este equipo saldrán por toma de nivel a drenaje presurizado. La MDEA rica, se envía por diferencia de presión a través del Filtro de MDEA rica FD-5400, de tipo cartucho, para remover y eliminar las partículas sólidas de un tamaño de 10 micrones y mayores que pudieran estar presentes, productos de corrosión y/o erosión de los equipos que integran el sistema, degradación de la MDEA, o hidrocarburos remanentes.

La MDEA rica libre de contaminantes sale por la parte inferior del filtro y se precalienta en el Intercambiador de Calor MDEA rica - MDEA pobre EA-5400, por medio de la corriente de MDEA pobre procedente del Rehervidor EA-5401.

La MDEA rica a control de nivel del FA-5402, se alimenta a la Torre Regeneradora de MDEA DA-5401 por la parte superior, en la que se eliminan los gases ácidos absorbidos en la Sección de Endulzamiento, calentando la MDEA en el Rehervidor EA-5401, el cual utiliza aceite como medio de calentamiento. Los gases ácidos y vapores generados salen del domo de la torre al Enfriador de Gas Ácido EC-5401 y al Acumulador de Reflujo de la Regeneradora de MDEA FA-5403. El agua condensada se alimenta como reflujo a la torre por medio de la Bomba GA-5402/R, mientras que los gases ácidos se envían al sistema de recuperación de gases ácidos

La MDEA pobre del fondo del rehervidor es enfriada en el Intercambiador MDEA rica- MDEA pobre EA-5400, y enviada a la Bomba de MDEA Pobre GA-5400/R donde se incrementa su presión; del 10 al 20% de la solución de MDEA pobre, pasa a través del Filtro de MDEA Pobre FD-5401, cargado con carbón activado (para remover cualquier compuesto producto de la descomposición de la MDEA que se formará por efecto de la temperatura, o

bien materia orgánica que pudiera causar espuma en la torre) retornando a la succión de las Bombas GA-5400/R

Posteriormente la solución de MDEA pobre es enviada al Enfriador MDEA Pobre EC-5400 (Sección de Endulzamiento).

Sección de Recuperación de Gases Ácidos

Esta Sección considera un Eyector de Gas Ácido EE-5400 (por planta) que incrementa la presión de la corriente de gas ácido proveniente de la Planta de Endulzamiento a fin de poder incorporarse al gas de baja presión en el Sistema de Compresión de Gas Amargo de la plataforma de Litoral de Tabasco, evitando de esta manera la emisión de gases contaminantes al medio ambiente.

El incremento de presión de la corriente de gas ácido se logra por medio de un fluido motriz (Gas Amargo) alimentado a alta presión. El flujo motriz, pasa por una boquilla convergente-divergente en donde dicho fluido adquiere una gran velocidad, el gas ácido a comprimir entra por una cámara de succión y es arrastrado por el gas motriz, la mezcla de ambos es impulsada y comprimida a través del difusor hasta la presión de descarga requerida a expensas de la energía cinética

4.4.3 Planta Deshidratadora de Gas Amargo

Ver dibujo 03 "Diagrama de flujo de proceso de la Planta Deshidratadora de Gas Amargo" en el anexo.

Se contará con dos Plantas Deshidratadoras en operación que estarán localizadas en la Plataforma de Compresión, esta plataforma proporcionará los servicios auxiliares (gas combustible, aire de instrumentos, TEG, químicos, etc.) al complejo

Cada Planta de Deshidratación podrá manejar máximo 240 MMPCSD de gas amargo y tendrá la finalidad de reducir el contenido de agua de la corriente de gas que se envía a tierra hasta 7 lb/MMPCSD para evitar problemas de corrosión en el transporte y manejo.

Cada una de las plantas estará formada por dos secciones: Deshidratación y Regeneración de TEG.

Sección de Deshidratación.

La sección de deshidratación tiene la finalidad de absorber la humedad contenida en el gas amargo de compresión.

El gas amargo húmedo proveniente del Sistema de Compresión es alimentado al separador de gas de alimentación FA-5450 (@ 80 kg/cm² man. y 52 °C). Este separador cuenta con internos de alta eficiencia para eliminar los hidrocarburos líquidos generados o arrastrados durante el trayecto hacia la planta, y de esta forma evitar la formación de espuma en la torre deshidratadora.

El gas que sale del separador de gas de alimentación entra por la parte inferior en la Torre Deshidratadora de Gas Amargo DA-5450. Esta torre cuenta con empaque estructurado y una malla como dispositivo de separación.

El gas que sale por el domo de la torre deshidratadora (@ 79.5 kg/cm² man.) tiene un contenido de agua que no excede la especificación requerida. Al gas amargo deshidratado se le regula la presión y se manda a tierra vía gasoducto.

Del fondo de la torre deshidratadora sale el TEG húmedo con el agua removida del gas, y pasa por la válvula de control de nivel, donde se regula la presión de la corriente hasta la mínima requerida considerando la hidráulica del sistema; posteriormente el TEG es enviado a la sección de regeneración.

Sección de Regeneración

El TEG húmedo proveniente del fondo de la torre deshidratadora se divide en dos corrientes, una de las cuales se envía al serpentín del Calentador de TEG EA-5452, para precalentarse. Este calentador está localizado en la parte superior de la torre regeneradora y aprovecha el calor de condensación (a fin de rectificar el glicol que pueda arrastrarse a la salida de la torre regeneradora) del vapor y del gas de agotamiento que asciende por la torre.

Posteriormente se integran las dos corrientes de TEG húmedo y son alimentadas al Segundo Intercambiador TEG húmedo/TEG seco EA-5453, con el fin de elevar la temperatura de la corriente a un valor que favorezca la separación líquido-líquido, y no exceda de 65°C.

Con el propósito de realizar la separación de las fases líquidas de la corriente de TEG húmedo, ésta se alimenta al Separador de Hidrocarburos FA-5451, el cual contará con internos tipo baffle y mamparas para una adecuada separación. La fase gaseosa pasa a través de una malla que evita arrastres de líquidos y sale a control de presión para enviarse a quemador. Los hidrocarburos líquidos salen a control de nivel a drenaje. La presión de operación del separador será la mínima requerida considerando la hidráulica del sistema y la máxima desorción de hidrocarburos.

La corriente de TEG húmedo sale del separador FA-5451 y se envía al Filtro de TEG Húmedo FG-5450 para eliminar partículas de 5 micrones y mayores, productos de corrosión y/o erosión, o bien hidrocarburos remanentes. De esta corriente el 30-40% pasa por los Filtros de Carbón Activado FG-5451 AB con el fin de eliminar los productos de degradación del TEG e impurezas. Posteriormente las dos corrientes se unen y se envían a control de nivel al Primer Intercambiador TEG húmedo/TEG seco EA-5450.

El intercambiador EA-5450 tiene la finalidad de precalentar la corriente de TEG húmedo con el calor del TEG seco del Rehervidor de la torre regeneradora de TEG EA-5451.

El TEG húmedo precalentado se alimenta a la Torre Regeneradora de TEG DA-5451 (previo control de nivel del FA-5451) entre las dos secciones empacadas (con empaque estructurado); aquí se elimina el agua contenida en el TEG calentando la corriente en el rehervidor EA-5451, utilizando aceite como medio de calentamiento.

Para lograr una concentración adecuada (99.2% peso mínimo) de TEG seco, se utiliza la Columna Stahl DA-5452, la cual está formada por un empaque estructurado. La corriente que sale del rehervidor EA-5451 es alimentada por la parte superior de la columna y se pone en contacto a contra corriente con el gas de agotamiento que es alimentado por la parte inferior de la columna. El gas de agotamiento es precalentado previamente en el rehervidor de la torre regeneradora y después se envía a control de presión a la columna Stahl.

El vapor de agua que se desprende en la columna y en el rehervidor, junto con el gas de agotamiento, ascienden por la Torre Regeneradora de TEG DA-5451 y precalientan la corriente de TEG húmedo; parte del vapor de agua se condensa como reflujo y el resto sale con el gas de agotamiento hacia el Condensador de Agua Amarga EC-5451.

El gas y el agua condensada son enviados al tanque Acumulador de Agua Amarga FA-5453, el cual opera a la presión atmosférica y 52°C. El gas separado se envía a la atmósfera a una altura adecuada y el agua amarga se envía a la planta de tratamiento de agua por medio de la Bomba de Agua Amarga GA-5452/R.

El TEG seco proveniente de la columna Stahl se alimenta al intercambiador EA-5450 en donde se enfría con la corriente de TEG húmedo procedente de los filtros FG-5450 y FG-5451 AB y después se envía al Tanque de Balance de TEG FA-5452.

El TEG seco se envía al intercambiador EA-5453 por medio de la Bomba de TEG seco GA-5450/R para ser alimentado a la sección de deshidratación.

Con la finalidad de compensar el TEG que se pierde por arrastre y degradación se efectúa la reposición en la corriente de TEG húmedo, antes del Segundo Intercambiador TEG húmedo/TEG seco, por medio de la Bomba de Reposición de TEG GA-5451/R, que se encontrará en otro patín.

4.4.4 Planta Potabilizadora de Agua de Mar

Ver dibujo 04 "Diagrama de flujo de proceso de la Planta Potabilizadora de agua de mar" en el anexo.

Con el propósito de asegurar el suministro de agua potable en la Plataforma de Compresión CA-LT-A, es necesario contar con un relevo de la Planta Potabilizadora que se instalará en la Plataforma Habitacional, para lo cual se requiere adquirir dos Plantas Potabilizadoras de Agua de Mar por Evaporación Simple (una en operación y otra de relevo) aprovechando la energía que proporcionarán los gases de escape de las turbinas de los compresores.

Las Plantas de Potabilizadoras de Agua de Mar tendrán una capacidad de diseño, cada una de 30 m³/d (7926 gpd) de agua de mar alimentada y estarán constituidas por un Circuito de Agua de Calentamiento y dos cámaras al vacío, una de Evaporación y otra de Condensación. El paquete deberá considerar algún tipo de pretratamiento del agua de mar y postratamiento de la corriente de agua potable para cumplir con las especificaciones recomendadas para el consumo humano.

Circuito de agua de calentamiento.

Este circuito suministrará la energía requerida con agua caliente para efectuar la evaporación en el sistema, y evitar la contaminación del agua de mar (con aceite) que se desea potabilizar, Para esto es necesario que el agua de este circuito eleve su temperatura por medio de aceite de calentamiento.

De este circuito, se suministra agua caliente al Evaporador de Agua de Mar, en donde se tiene una disminución de temperatura por transferir energía al evaporador, así como una pérdida de presión al pasar a través del serpentín. El agua sale del evaporador para integrarse nuevamente al Circuito de Agua de Calentamiento, a la succión de la Bomba del Circuito de Agua de Calentamiento GA-5350/R. El agua se calienta nuevamente (hasta 85 °C) en el Intercambiador de Calor Agua-Aceite EA-5350 (que utiliza como medio de calentamiento aceite Dowtherm G-40 o similar a 243 °C) para alimentarse nuevamente al evaporador. Se recomienda la instalación en este circuito, de un Tanque de Expansión Térmica FA-5350, para evitar problemas de sobrepresión en las tuberías.

Evaporación a Vacío.

A esta cámara se alimenta el agua de mar necesaria para efectuar la evaporación, ésta proviene de una corriente derivada de la salida del Condensador EK-5350. La carga térmica requerida por el Evaporador de Agua de Mar EJ-5350, es suministrada por el Circuito de Agua de Calentamiento.

Con la carga térmica antes mencionada se evapora constantemente el agua de mar a una presión de vacío. El vacío se efectúa mediante un Eductor de Vacío EG-5350 (que utiliza

como fuerza motriz una corriente de agua de mar), el cual funciona extrayendo continuamente los gases incondensables de la parte superior del evaporador.

La salmuera generada es extraída continuamente del fondo del evaporador por medio del Eductor de Salmuera EG-5351.

El fluido motriz junto con los gases incondensables y salmuera salen con destino al cabezal de drenaje.

El vapor generado asciende y es obligado a pasar a través de una malla de monel donde son retenidos algunos sólidos y pequeñas gotas de agua de mar que pudieran arrastrarse durante la evaporación. La generación de vapor ocasiona un pequeño incremento de la presión de operación y en consecuencia la temperatura en el evaporador también se ve ligeramente incrementada.

Condensación al vacío.

En esta cámara se suministra agua de mar al Condensador EK-5350, con el propósito de condensar a la temperatura de ebullición los vapores generados en el evaporador. Dicha alimentación proviene de la red de distribución de agua de servicios. De esta corriente se derivan también, dos alimentaciones, la primera es la reposición de agua de mar hacia la cámara de Evaporación al Vacío y la segunda proporciona el fluido motriz a los eductores de vacío y salmuera.

Una vez condensados los vapores, el agua utilizada en el condensador es enviada al mar. El vapor condensado como agua potable se recolecta en una charola localizada en la parte inferior del condensador, esta agua es succionada por la Bomba de Agua Potable GA-5352/R para su envío al Tanque de Almacenamiento. Se deberá contar con una derivación por donde el agua potable fuera de especificación sea enviada a drenaje.

4.4.5 Planta de Secado de Gas Dulce

Ver dibujo 05 “Diagrama de flujo de proceso de la Planta de Secado de Gas Dulce” en el anexo.

La Planta de Secado de Gas Dulce con capacidad normal de 19.4 MMPCSD (@ 60 °F y 1 atm) se ubicará en la Plataforma de Compresión CA-LT-A, su función será acondicionar el gas dulce eliminando las fracciones de hidrocarburos y agua contenidos en el mismo, que puedan condensar y dañar las turbinas de los compresores, generadores de energía eléctrica y equipos en general en los que será suministrado.

El proceso consistirá básicamente en el enfriamiento de gas dulce por expansión y aprovechando las corrientes frías que se genera del mismo proceso, mediante el Intercambiador de Calor Gas-Gas EA-5402 y el Intercambiador de Calor Gas-Líquido EA-5403, previa separación de las fases en el FA-5405. El proceso no deberá incluir ningún tipo de equipo rotatorio para este fin.

El gas combustible seco deberá cumplir con una temperatura de rocío que deberá ser menor o igual a 23 °C a la presión de 41.1 kg/cm² man. garantizando que el gas seco no presente condensación a las condiciones de suministro a turbinas de gas, turbogeneradores eléctricos y otros servicios con una presión mínima de entrega de hasta 3.0 kg/cm² man.

4.4.6 Sistema de Distribución de Gas Combustible.

Ver dibujo 06 “Diagrama de flujo de proceso del Sistema de Distribución de Gas Combustible” en el anexo.

En el Sistema de Distribución de Gas Combustible, normalmente recibe la alimentación de la Planta de Secado (@ 40.0 kg/cm² man. y 47 °C), y tiene por objetivo suministrar gas combustible libre de condensados para los siguientes requerimientos

- Gas a Sellos (35.0 kg/cm² man., 45 °C)
- Gas a turbina de Módulos de Compresión (21.0 kg/cm² man., 37 °C)

- Gas a Turbogeneradores Eléctricos (12.0 kg/cm² man., 32 °C)
- Gas de presurizado (7.0 kg/cm² man., 29 °C)
- Gas de agotamiento a Planta de Tratamiento de Agua (3.0 kg/cm² man., 27 °C)
- Gas de agotamiento a Planta Deshidratadora (3.0 kg/cm² man., 27 °C)
- Gas de barrido y a pilotos de quemador (3.0 kg/cm² man., 27 °C)

El gas proveniente de la Planta de Secado será enviado al cabezal general de distribución de gas combustible (@ 40.0 kg/cm² man. y 47 °C), donde la presión de entrega del gas es regulada por medio de válvulas controladoras de presión distribuidas en las líneas que salen de este, para los siguientes requerimientos: Gas de sellos, Gas a turbina de Módulos de Compresión, Gas a Turbogeneradores Eléctricos, y Gas de presurizado.

Después de la entrega del gas para los requerimientos antes mencionados, el gas se expande hasta 3.0 kg/cm² man. y 27 °C con el fin de ser enviado como Gas de agotamiento a Planta de Tratamiento de Agua, Gas de agotamiento a Planta Deshidratadora y como Gas de barrido y a pilotos de quemador.

En caso de que no se cuente con el suministro de gas combustible proveniente de la Planta de Secado (por falla o mantenimiento), se utilizará gas de las Plantas Endulzadoras (79.5 kg/cm² man. y 57 °C) previo acondicionamiento del mismo. Para acondicionarlo, el gas dulce será alimentado al Separador de Gas Combustible FA-5406 a control de presión (41.0 kg/cm² man.) con el propósito de eliminar condensados que pudieran estar presentes en el gas, los cuales serían enviados a control de nivel a producción.

El gas obtenido en éste separador es alimentado al Calentador de Gas Combustible EA-5404 (el cual obtiene su carga térmica del circuito de aceite de calentamiento), para elevar su temperatura y expanderlo hasta obtener las condiciones requeridas en el cabezal (40.0 kg/cm² man. y 47 °C). Posteriormente es enviado a la red de distribución de gas combustible como se mencionó anteriormente, asegurando el suministro de un gas libre de condensados.

4. SISTEMA DE CALENTAMIENTO

En las Refinerías, en los centros de procesamiento de gas y en los complejos petroquímicos se cuenta con instalaciones para generar los servicios auxiliares que requieren los procesos, uno de estos servicios es el calentamiento. En este caso la *Plataforma de Compresión* cuenta con un sistema de calentamiento indirecto basado en uso de aceite térmico como medio de transporte de calor, que en los últimos años ha dado buenos resultados a la industria. Estos sistemas de calentamiento consisten básicamente de un calentador, bombas, tubería, un tanque de expansión, uno de almacenamiento y un sistema de control, como se muestra en la figura 5.1.

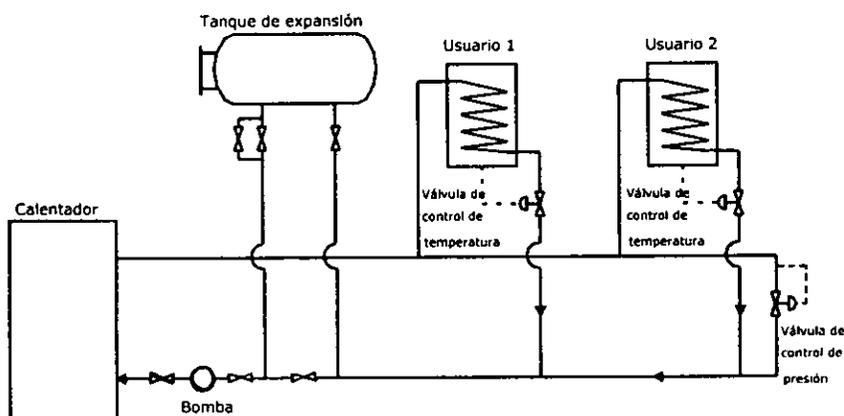


Figura 5.1 Esquema básico de un Sistema de calentamiento por medio de aceite térmico.

5.1 Elementos que componen el sistema de calentamiento

El calentador

El calentador es un componente crítico en el diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico, este se encarga de proporcionar la carga térmica requerida por el proceso. En la mayoría de los casos se emplea un calentador a fuego directo, pero en ocasiones la fuente de calor puede ser otra como calentadores eléctricos que normalmente se usan para cubrir demandas de calor menores de 200 000 btu/hr. Económicamente los calentadores eléctricos son atractivos para manejar cargas pequeñas donde el pequeño costo de inversión inicial supera sus altos costos de operación y generalmente los calentadores eléctricos tienen sistemas de control menos complejos que un calentador a fuego directo de la misma capacidad. Esta simplicidad es una ayuda para operadores y personal de mantenimiento.

En algunos casos un calentador puede ser sustituido por el uso de un excedente de calor de algún otro calentador involucrado en el proceso.

Otra alternativa como fuente de calor son las líneas exhaustas, si la temperatura de los gases está alrededor de 400°F, se puede obtener calor de estas líneas consiguiendo temperaturas hasta de 300 a 350°F. Una restricción es que la temperatura del gas que fluye no debe llegar abajo del punto de rocío. Se debe considerar el punto de rocío del gas mas un factor de seguridad el límite inferior de temperaturas en las chimeneas para prevenir condensación y problemas de corrosión.

Básicamente hay dos diseños disponibles de calentadores a fuego directo para fluidos térmicos: tipo tubos de líquido y tubos de fuego. En un calentador tipo tubos de líquido el fluido térmico es bombeado a través de los tubos para ser calentado mientras el fuego esta afuera de los tubos. En un calentador tipo tubos de fuego el líquido térmico fluye a través de la coraza del calentador alrededor de los tubos de fuego. Para cualquier temperatura es preferible un calentador tipo tubos de líquido, pero puede usarse un calentador tipo tubos de fuego para temperaturas abajo de 500°F (260°C) con un diseño de baffle especial para eliminar zonas de sobrecalentamiento.

Los calentadores a fuego directo cuentan con una sección de radiación y una sección de convección. La radiación es de la flama y los gases calientes. En esta sección los tubos están localizados a lo largo de las paredes y techo del horno en camas verticales u horizontales. Los quemadores normalmente se encuentran en el piso del horno, pero algunas veces se montan en las paredes.

Los tubos en esta sección están directamente expuestos a la flama, pero no están localizados en el contorno de la flama. Cuando la flama del quemador toca un tubo de proceso se conoce como choque de flama "*flame impingment*" que es una de las causas por la que los tubos se averían más rápidamente, por lo tanto el diseño debe evitar el choque de flama.

La sección de convección usualmente se localiza arriba de la sección de radiación, pero ocasionalmente se pone al lado de ésta. Los tubos no están directamente expuestos a la flama y el modo dominante de transferencia de calor es debido al calentamiento por convección debido al flujo de gas que pasa sobre los tubos en su camino a la chimenea. Estos tubos frecuentemente tienen superficies extendidas, como aletas o claros para incrementar la transferencia de calor.

El arco es el lugar donde las secciones de radiación y convección se encuentran. El primer par de camas de tubos de convección en el arco, son frecuentemente tubos escudo. Estos tubos tienen muy altas velocidades de flujo porque son calentados por convección y están expuestos a la flama lo que resulta en un calentamiento por radiación también, estos tubos no deben tener superficies extendidas y se les llama tubos escudo porque ellos protegen a los otros tubos de convección del calor por radiación de la flama. Algunas veces los diseñadores ponen un baffle entre la sección de radiación y la de convección que elimina la necesidad de tubos escudo. Este baffle protege a la sección de convección de calentamiento por radiación.

En muchos calentadores de gran tamaño, la sección radiante es típicamente donde ocurre la mayor parte de la transferencia de calor, y la sección de convección es donde se eleva la eficiencia total del calentador. En el pasado, la sección de convección era vista como

una adición costosa, fue incluida solo cuando los análisis económicos demostraron que era favorable.

Hoy en día, la mayoría de los calentadores tienen una sección de convección porque los incrementos en el costo de la energía demandan altas eficiencias. Este tipo de calentadores es el más común en la industria usados para cargas térmicas grandes incluso de varios cientos de millones de Btu/hr, instalándose en paralelo.

Los calentadores combinados (radiación mas convección) existen en una gran variedad de formas comercialmente. Algunas de las variaciones de diseño son el arreglo de tubos, e incluso el arreglo de las secciones del calentador. Estos calentadores vienen con dos, tres o más secciones de radiación en diferentes arreglos.

La sección de convección puede localizarse arriba o al lado de la sección de radiación y puede ser provista de numerosos arreglos de tubos. Grandes requerimientos térmicos obviamente requerirán grandes calentadores, con gran capital de inversión y requieren una buena cantidad de espacio.

Una importante desventaja de este tipo de calentadores es su complejidad. Desde el punto de vista de controles-ingeniería, estos equipos pueden ser difíciles de manejar. Además, la sección de radiación y especialmente los tubos escudo, tienen enormes velocidades de flujo que pueden dañar a los fluidos. Esta sección frecuentemente requiere del uso de materiales exóticos y caros que resistan el calor.

El tanque de expansión

La función principal de este tanque es como su nombre lo indica proporcionar cierta expansión al fluido térmico que después de intercambiar su calor con los fluidos de proceso pierde volumen por el cambio de temperatura. La expansión puede ser mas del 25% de su volumen original dependiendo del fluido y de la temperatura de operación. Un diseño apropiado del tanque de expansión puede eliminar muchos problemas que se presentan diariamente al arranque del sistema y una instalación y mantenimiento adecuado del tanque puede contribuir a incrementar la vida del fluido.

El tanque de expansión se instala en el punto mas alto del sistema, de esta manera se tiene el principal venteo del sistema que eliminará el exceso de compuestos de bajo peso molecular "low-boilers" (producto de la descomposición térmica) formados a través del sistema. La instalación en el punto mas alto proporciona la suficiente cabeza positiva para la succión de la bomba.

La dimensión del tanque de expansión debe hacerse tomando en cuenta un 25% lleno a la temperatura ambiente y 75% a la temperatura de operación normal. La expansión del fluido entre dos temperaturas se calcula dividiendo la densidad del fluido a la temperatura menor entre la densidad del fluido a la temperatura mayor. Si el único propósito del tanque es proveer expansión al fluido, es suficiente una línea de conexión, sin embargo, el tanque también provee el mejor punto de venteo del sistema para el sistema de modo que requiere un sistema de conexión más complejo.

Todos los fluidos orgánicos sufren oxidación al exponerse al aire. Esta oxidación del fluido causa la mayor formación de sólidos y ensuciamiento en el sistema lo que reduce la eficiencia y ocasiona problemas en el funcionamiento. La fuente más común de infiltración de aire es a través del tanque de expansión de manera que se hace necesario sellar el tanque con un gas inerte como nitrógeno o CO₂, con gas natural. El propósito de sellar con gas inerte es mantener una atmósfera no reactiva en el espacio vapor del tanque de expansión, prevenir la entrada de aire y humedad que puede afectar la vida del fluido. Para obtener esta protección es necesario contar con un suministro ininterrumpido de gas inerte, generalmente nitrógeno, controlado por reguladores de presión del flujo en la entrada y salida.

Sellar el tanque de expansión con gas inerte generalmente es el método más efectivo para minimizar la oxidación del fluido. Pero cuando esta opción no es posible existe otra menos conveniente en cuanto a arreglo que consiste en la instalación de una trampa de vapor.

Bombas

Las bombas en estos sistemas deben tener la suficiente capacidad y cabeza para circular el fluido a la velocidad requerida para cada instalación en particular. Para grandes velocidades se recomienda usar bombas centrífugas. Para servicios a temperaturas elevadas

normalmente es apropiado el uso de bombas de acuerdo con el ANSIB73.1 o el API Standard 610. Para extender la vida de la bomba es recomendable el uso de refrigerante, cojinetes y sellos.

En la mayoría de los sistemas es preferible el uso de bombas de acero. Los fabricantes de bombas especifican que cuando estas trabajan alrededor de 450°F (230°C) debe usarse un enfriador, una caja aislante o un enfriador de sello mecánico.

Filtros

Antes de arrancar un sistema nuevo se instala un filtro en la succión de la bomba, este tamiz tipo canasta se puede quitar una vez que todos los sólidos hayan sido removidos del sistema. Limpiar los fluidos por medio de filtros prolonga la vida de los componentes del sistema además de reducir el ensuciamiento y taponamiento.

Tubería

Es importante determinar las dimensiones de la tubería del sistema de manera que proporcione la velocidad de flujo requerida con una caída de presión económica. En muchos de los casos se recomienda el uso de tubería de acero al carbón cédula 40.

La tendencia a las fugas en las juntas y accesorios es característico de la mayoría de los fluidos térmicos cuando estos accesorios no están bien apretados. El control de las fugas en la tubería es esencialmente importante ya que el fluido absorbido por el aislante el más peligroso que la misma fuga. La mejor forma de prevenir fugas es soldar todas las conexiones.

Aislamiento

Normalmente estos sistemas requieren de un aislamiento como silicato de calcio o lana mineral. Sin embargo, el aislamiento de fluidos saturados representa un peligro potencial de incendio a las temperaturas en que normalmente se encuentra operando el sistema. El fluido térmico puede presentar una pequeña reacción de oxidación con el aire presente en los poros del material aislante.

Controles

Los controles para el sistema de calentamiento por medio de aceite térmico deben instalarse tanto en el calentador como en los equipos consumidores de la energía calorífica que proporciona el aceite térmico. El calentador requiere un controlador que regule el mecanismo de la intensidad de la flama en proporción directa a la temperatura requerida por el fluido térmico a la salida. Cada equipo consumidor de la energía debe contar con un control que regule el flujo del fluido térmico en proporción a la energía requerida.

5.2 Descripción de los Fluidos térmicos.

Los fluidos térmicos utilizados para el calentamiento y enfriamiento de procesos pueden tener la forma de líquidos, vapores o una combinación de ambas fases. Además del vapor los líquidos térmicos incluyen agua caliente, gases, líquidos orgánicos, sales inorgánicas y metales líquidos. Hoy en día los fluidos térmicos ofrecen una extensa combinación de propiedades, los rangos de puntos de ebullición, presión de vapor y capacidad calorífica de medios de calentamiento comercialmente disponibles están en constante crecimiento, de manera que el uso de esta clase de fluidos ha ido en aumento. La tabla 5.1 muestra de manera muy general la aplicación de fluidos térmicos en la industria.

Proceso	°F	Ejemplos
Cogeneración:	600-1000	
Destilación, otras separaciones:	550-700	Aceites naturales, aceites de crudo, recuperación de solventes
Recuperación de energía solar	400-1000	Generación de electricidad, procesos de calentamiento
Procesos textiles	400-630	
Procesos de plásticos	400-600	Moldeado, extrusión, laminado
Procesamiento de petróleo y gas natural	350-550	Secado de gas, calentamiento de crudo en los procesos de refinación
	350-500	Combustibles pesados
Control de temperatura durante síntesis	300-700	Acidos, bases, alcoholes, olefinas, esterres, otros.
Recuperación de calor de desecho	200-650	Para plantas generadoras de energía y para incineración,

Tabla 5.1 Aplicación de fluidos térmicos en la industria.

La elección de un fluido térmico en particular y la elección entre un sistema en fase líquida y uno en fase vapor se rige por las necesidades del proceso: nivel y rango de temperatura de proceso, presión de operación del sistema y velocidad de transferencia de calor requerida. El objetivo es no solo proveer una transferencia de calor efectiva, sino también evitar problemas ambientales, de seguridad, de corrosión y degradación del fluido.

El sistema de transferencia de calor puede constar de varios usuarios e involucrar un ciclo de calentamiento y enfriamiento que requerirá de un fluido térmico con un amplio rango de temperatura de operación. Generalmente se desea que el líquido térmico fluya fácilmente a bajas temperaturas para el momento del arranque y para proporcionar una efectiva transferencia de calor en las operaciones de enfriamiento.

Los fluidos térmicos en fase vapor pueden ser usados en el estado líquido siempre y cuando se imponga una presión estática para evitar la ebullición a la temperatura de operación. Las limitaciones de presión en tales usos hacen más probable la necesidad de un tanque de expansión y equipo de proceso con grandes corazas. De manera similar la relación entre temperatura y presión de vapor de un fluido térmico se vuelve importante en la determinación de las presiones de los equipos del sistema que van a contener el fluido. Los sistemas en fase líquida generalmente pueden operar con componentes ANSI B16.15 CLASE 250 (para presiones hasta 150 psia) a 500°F y con componentes de clase 300 (hasta 330 psia) a mayores temperaturas.

En sistemas tanto en fase líquida como en fase vapor que operan a temperaturas mayores de 750°F, se recomienda en uso de acero al carbón en el calentador, bombas, válvulas y tubería. El empleo de acero al carbón también es satisfactorio en las unidades de proceso, si las sustancias del proceso no requieren otra cosa. Para operaciones a mayores temperaturas se recomienda el uso de aceros con mejores aleaciones.

La transferencia de calor del sistema depende de la viscosidad, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica del fluido así como de la velocidad del fluido, geometría y gradientes de temperatura asociados con las superficies de transferencia de calor. Los fluidos térmicos en fase líquida deben tener densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica moderadamente altas y baja viscosidad a las temperaturas de operación, para conseguir un coeficiente de transferencia de calor alto. En estos sistemas en fase líquida generalmente se desea obtener un flujo turbulento a una velocidad moderada, para combinar un elevado coeficiente de transferencia de calor con una potencia de bombeo económica. Para el caso de sistemas en fase vapor un elevado coeficiente de transferencia de calor se ve favorecido por una densidad, conductividad térmica y calor de vaporización altos y por una

baja viscosidad. Estos sistemas operan mas eficientemente a condiciones que favorezcan la ebullición nucleada.

Los fluidos de transferencia de calor deben ofrecer buena estabilidad térmica a dentro del rango de temperatura de operación, especialmente para reducir la formación de depósitos en la superficie del metal y formación de desechos en el fluido. También deben ser capaces de tolerar pequeños niveles de contaminación por materiales de proceso, aire y agua. Y deben ser compatibles con el material de construcción del sistema lo que traerá una larga vida de servicio en el rango de temperatura de operación.

Dado que la mayoría de los fluidos térmicos se degradan lentamente con el uso, la elección de estos algunas veces depende de si el producto es reciclable o debe disponerse en lugares de confinamiento, también depende de que la limpieza del fluido sea por destilación o por simple filtración. Y finalmente si es más económica la disposición final por incineración si esta es factible o es necesario un lugar de confinamiento.

Todo el sistema de transferencia de calor debe ser diseñado no solamente para operar en condiciones seguras sino que el fluido también debe ser ambiental y toxicológicamente aceptable porque pueden presentarse fugas. Además de que este no debe reaccionar ni corroer los materiales del exterior o del proceso.

En cuanto a la seguridad de los fluidos térmicos, se debe tener en cuenta que la combustión puede ser causada tanto por una fuente de ignición directa como por autoignición debida a temperaturas elevadas. Los incendios debidos a la presencia de una fuente de ignición ocurren cuando una suficiente concentración de fluido en el aire está por encima de una temperatura mínima, esto se conoce como el punto flash. Una temperatura mayor a la cual sucede la ignición se le llama punto de ignición. Y la mínima temperatura a la cual el fluido puede incendiarse con el aire sin una fuente de ignición se llama temperatura de autoignición.

El fuego iniciado por autoignición o por llegar al punto flash puede ocurrir en calentadores a fuego directo, donde el fluido térmico se pueda fugar hacia la cámara de combustión. Las fugas de fluido al aislamiento del sistema puede causar un incendio por autoignición debido a la descomposición del fluido térmico por oxidación.

Para la selección del fluido se emplean ciertos exámenes estándar que miden temperaturas de flash, ignición y autoignición. Pero a pesar de que las temperaturas de autoignición obtenidas por estos exámenes sean optimistas, investigaciones recientes indican que en sistemas metálicos grandes calentados el verdadero valor puede ser hasta 200°F abajo del valor obtenido por los estándares.

Otro riesgo consiste en la fuga de fluido térmico que forma una niebla estable que puede incendiarse, debido a los efectos de la energía superficial que hacen reactiva dicha niebla y permiten la rápida propagación de la flama desde la fuente de ignición. Pero la fuga de fluidos térmicos en los sistemas de transferencia de calor también concierne al área ambiental y de toxicidad. Estos compuestos pueden causar irritación por contacto directo con ojos y piel y mínimos efectos por inhalación o ingestión. En los Estados Unidos el grado de toxicidad de los fluidos de transferencia de calor puede ser juzgado por Material Safety Data Sheets (MSDS), en combinación con OSHA^[23].

Algunos fluidos especialmente los más volátiles, requieren ventilación para evitar olores molestos y mantener una concentración del fluido en el ambiente por debajo de sus "threshold limite values" (TLVs). El TLV es la máxima concentración aceptable en el aire que es considerada como segura por inhalación diaria.

A continuación aparece una lista de las propiedades deseables en un fluido térmico.

Propiedades térmicas:

- Facilidad de manejo del fluido "*bombeable*" en un amplio rango de temperatura que permita el fácil arranque y procesos de calentamiento y enfriamiento.
- Densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica elevadas además de baja viscosidad por encima del rango de temperatura de operación del proceso.

Propiedades de contención:

- Compatibilidad con materiales de construcción económicos como acero al carbono; que no ocasione corrosión o cualquier otra reacción química sobre los componentes del sistema o materiales externos.
- Presión de vapor baja que permita el diseño de un sistema de baja presión y con pocas fugas al exterior; pequeño rango de ebullición para prevenir pérdidas de fluido durante las operaciones de venteo.
- En sistemas en fase líquida, es mejor una baja presión de vapor para prevenir zonas de ebullición y problemas de volatilidad, que provoquen la cavitación de bombas y flujo a dos fases.

Propiedades de estabilidad:

- Estabilidad térmica que ofrezca larga vida del fluido a las temperaturas de operación.
- Los compuestos de alto peso molecular *High-boiling* producto de la descomposición térmica del fluido deben ser solubles en el mismo, no deben provocar sedimentos, y los compuestos de bajo peso molecular *Low-boiling* deben ser liberados por medio del tanque de expansión del sistema o por venteos en el sistema.
- Habilidad para tolerar pequeños niveles de contaminación por los materiales del proceso, aire y humedad.

Seguridad:

- Elevada temperatura de flasheo si se encuentra cerca alguna fuente de ignición; mínima formación de compuestos de bajo peso molecular "*low-boilers*" producto de la descomposición, que provoca una disminución del punto flash.
- Temperatura de autoignición mucho mayor que la máxima temperatura ambiente.

- No propenso a la formación de neblinas estables por fugas de líquido.

Propiedades tóxicas y ambientales:

- Bajos niveles de toxicidad.
- Baja reactividad con materiales involucrados en el proceso, en caso de fugas.
- Disposición final económica.

5.3 Tipos de Fluidos Térmicos

Agua, gases, líquidos orgánicos, sales inorgánicas y metales líquidos han sido empleados en procesos de transferencia de calor indirecto. Sin embargo, algunas de esas familias de materiales tienen importantes limitaciones:

Aunque los gases como aire y nitrógeno pueden ser usados en un amplio rango de temperaturas además de ser muy estables, estos requieren de presiones extremas para lograr una buena transferencia de calor, los metales líquidos como el sodio y el mercurio tienen una buena transferencia de calor, pero tienen muchos problemas de tipo ambiental y de seguridad y requieren sistemas de contención costosos. Las salmueras y soluciones glicol-agua presentan problemas de incompatibilidad con muchos materiales y de estabilidad a temperaturas arriba de 300°F. Los refrigerantes son muy eficientes a bajas temperaturas de proceso, pero requieren ser presurizados en procesos a temperaturas elevadas. De manera que los materiales más usados como medio de transferencia de calor son el agua, sales inorgánicas eutécticas y una variedad de materiales orgánicos e inorgánicos.

Una forma de clasificar a los fluidos térmicos es considerar sus rangos de temperatura recomendables. En la figura número 5.1 se muestran los rangos de temperatura de los fluidos térmicos comercialmente disponibles.

Los fluidos térmicos también se pueden clasificar por su estructura química:

Bencenos alquilados de relativamente bajo peso molecular (fluidos 1 y 2 de la figura 5.1) se usan en enfriamiento a bajas temperaturas y generalmente en procesos donde el fluido térmico está abajo de los 500°F. Pueden ser usados en fase vapor debido a su rango de ebullición reducido. Su bajo punto de flasheo requiere medidas contra incendio extra. A medida que aumenta su peso molecular (fluidos 3 y 4), los puntos de ebullición y flash llegan a niveles mucho mas altos pero la estabilidad disminuye.

Bifenilos alquilados (fluidos 5-7) y *naftalenos alquilados* (fluidos 8-11) tienen mayor estabilidad térmica que los bencenos alquilados de mayor peso molecular. Sus puntos flash son mayores y sus puntos de ebullición son más cercanos al limite de estabilidad que los bencenos alquilados de bajo peso molecular. Al mismo grado de alquilación, los bifenilos alquilados son más estables que los naftalenos alquilados. Los *polifenilos hidrogenados* de 3 y 4 anillos (fluidos 13-16), fluyen con menor facilidad pero operan a muy altas temperaturas con buena estabilidad térmica y punto de ebullición elevado. Su operación por abajo del punto de ebullición reduce sustancialmente los problemas de fugas debido a la volatilidad. *Polifenilos deshidrogenados* requieren de calentamiento previo al arranque del proceso para llegar a 160°F que es la temperatura a la que fluirá satisfactoriamente, pero ofrecen buena estabilidad térmica a 750°F, un poco arriba del punto de ebullición.

Aromáticos bencilados como los que contienen tres anillos (fluidos 17 y 19) y dos anillos (fluidos 18, 20 y 21), tienen la capacidad de empezar a circular a bajas temperaturas y en algunos casos tienen puntos de ebullición mayores que los bifenilos y naftalenos alquilados, pero menor estabilidad que los polifenilos hidrogenados.

Los otros fluidos orgánicos muy estables a 750°F son las mezclas *eutécticas de difenilo y oxido de difenilo*. Estos (fluidos 22-26) han sido usados por mas de 50 años tanto en fase vapor como en fase líquida, pero como operan bien por arriba del punto de ebullición es común que se presenten pérdidas del fluido por volatilidad. En muchos lugares se requiere de calentamiento previo al arranque de operaciones debido a que su punto de congelación es de 54°F. Tiene puntos flash bajos y presentan problemas de formación de neblinas causadas por fugas lo que hace necesario el uso de equipo especial de protección contra incendio. Los

fluidos que contienen óxidos de difenilos tienen un fuerte olor característico de éteres aromáticos, lo que puede provocar condiciones de trabajo desfavorables.

Otros fluidos con base en éteres aromáticos son una mezcla de *difenilo/óxido de difenilo y bifenilo alquilado* (fluido 27), *óxido de difenilo alquilado* (fluido 28), y una mezcla de *óxido de difenilo y éteres con tres y cuatro anillos aromáticos* (fluido 29). Estos aceites generalmente fluyen aceptablemente a bajas temperaturas y son estables, pero a expensas de alta volatilidad a temperaturas típicas de operación y puntos flash bajos. Los fluidos base éter generalmente forman compuestos de alto peso molecular "high boiling" requiriendo frecuentemente la limpieza del fluido mediante destilación al vacío.

Glicoles polialcalinos (fluidos 30 y 31) y *ésteres ácidos dicarboxílicos* (Fluido 32) tiene inicialmente alto punto flash pero relativamente baja estabilidad. Estos fluidos frecuentemente se descomponen térmicamente formando compuestos de bajo peso molecular "low boiling", lo que puede reducir el punto flash. Estos glicoles y ésteres son más rápidamente biodegradables que otros fluidos orgánicos, lo cual es un ventaja en áreas ambientalmente sensibles.

Siloxanos de polimetilo (fluidos 33 y 34) son extremadamente sensibles a la humedad y otros contaminantes, propiedad que acelera la descomposición y formación de sólidos. En sistemas muy limpios libres de contaminación puede ocurrir la formación de compuestos de bajo peso molecular "low boiling" únicamente. Algunos aditivos pueden reducir la sensibilidad a la contaminación (fluido 34). La experiencia industrial indica que la máxima estabilidad de los fluidos está en la región de los 500-600°F. La proximidad de los puntos flash y de ebullición del fluido 34 es un indicador de que su rango de ebullición es muy amplio. Estos fluidos también sufren una reducción en su punto flash de 350°F a 130°F o menos, debido a la degradación.

Aceites minerales (fluidos 35-44) son de estabilidad moderada, pero generalmente son mas sensibles a la contaminación por aire y humedad que los fluidos sintéticos. Su descomposición produce partículas sólidas causadas por corrosión en el sistema. Estos aceites generalmente tienen altos puntos flash y de ebullición.

Sales inorgánicas de nitrato (fluido 45) tienen una excelente estabilidad térmica, no tienen punto flash y su volatilidad es baja. Su punto de fusión de 300°F y sus grandes cambios de volumen en congelamiento requieren de sistemas especiales para evitar daños. Las sales de nitrato son agentes fuertemente oxidantes y pueden formar mezclas explosivas con materiales de proceso.

El agua (fluido 46) es barata, no es tóxica, no se degrada y no es inflamable. Sus propiedades térmicas proporcionan la mejor eficiencia de transferencia de calor dentro de su rango de operación. Desafortunadamente su rango de temperatura está limitado por su punto de congelamiento 32°F y por su presión de vapor. Además de que el agua debe ser tratada para prevenir ensuciamiento y corrosión.

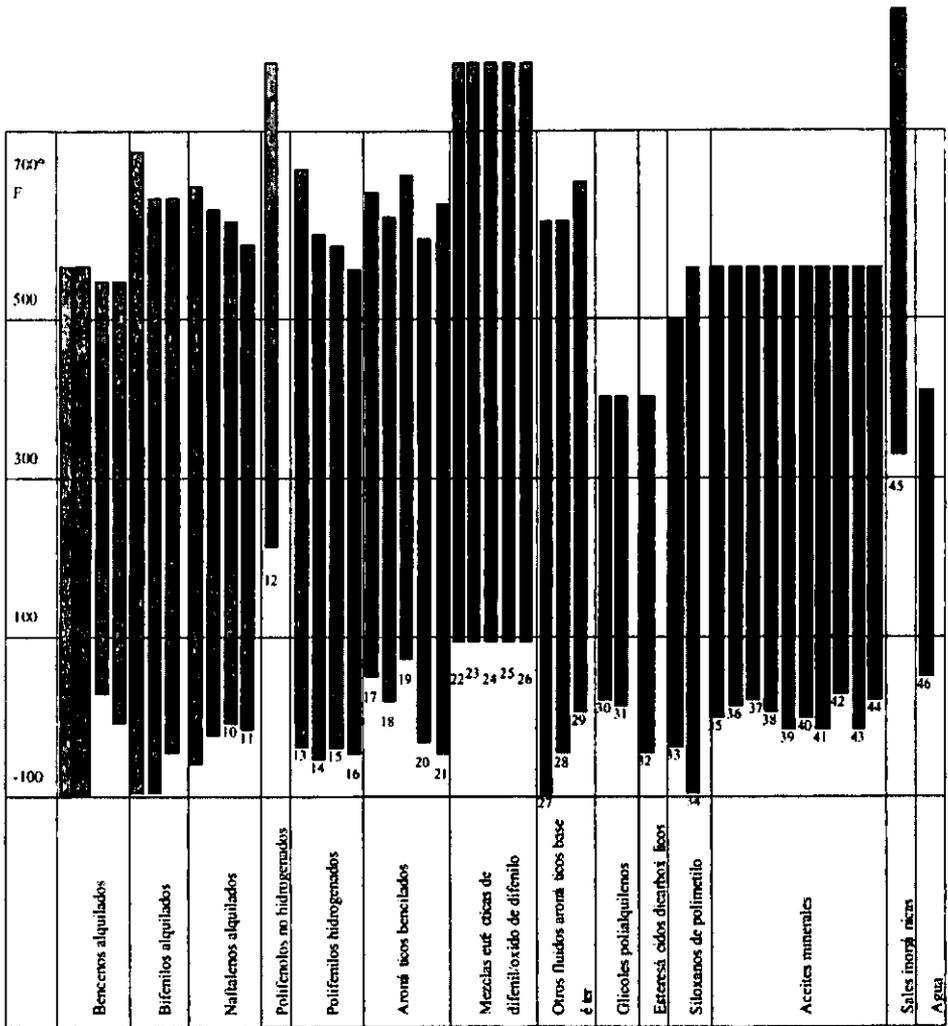


Figura 5.2. - Rangos de aplicación de fluidos térmicos.

Frecuentemente surgen problemas en la operación del sistema de calentamiento y estudios recientes reportan que esta clase de problemas frecuentemente son el resultado de la desintegración térmica del aceite de calentamiento. Este proceso de desintegración térmica

favorece la producción de compuestos ligeros "low boiling", compuestos pesados "high boiling" y depósitos carbonosos que pueden ensuciar el sistema de intercambio térmico, reduciendo así la transferencia de calor, ocasionando pérdidas, daños a los componentes del sistema y condiciones de operación peligrosas.

La degradación térmica se puede minimizar, si la temperatura de operación del fluido está dentro del rango que recomiendan los proveedores. Si la temperatura de operación del fluido es muy alta durante largos periodos de tiempo, resulta que las moléculas de hidrocarburos sufren un craqueo térmico dando lugar a la formación de los llamados "low boilers" lo que provoca un decremento en el peso molecular, reducción del punto flash y de la viscosidad del fluido, además de incrementar la presión de vapor.

Durante la degradación térmica también se producen compuestos que pueden polimerizar y formar así componentes de alto peso molecular conocidos como "compuestos pesados", dichos componentes ocasionan la depositación de resinas, coque y sedimentos que ensucian la superficie de transferencia de calor y reducen la capacidad del fluido para transferir calor al proceso.

La degradación térmica del aceite se puede detectar y monitorear fácilmente a través del análisis de los fluidos, con ello se asegura que la degradación térmica del fluido no progrese a un punto donde la eficiencia de la transferencia de calor se vea afectada. Este análisis del fluido involucra destilación cromatográfica de gas (GCD), la cual es una medida de la distribución del punto de ebullición de un fluido; medida del punto flash y de la viscosidad.

5.4 Descripción del proceso del circuito de calentamiento en la plataforma Marina de Compresión.

Para proporcionar la carga térmica necesaria y acondicionar las corrientes de las regeneradoras de MDEA y de TEG, gas combustible y agua de calentamiento requeridos en la Plataforma de Compresión CA-LT-A, se cuenta con un sistema de calentamiento que consiste en un circuito cerrado de intercambio de calor, en el que se utiliza aceite térmico del tipo Dowtherm G-40 (peso molecular promedio 215) como medio de calentamiento para los diferentes servicios que se requiere.

Dentro del Sistema de Calentamiento se contará con el siguiente equipo de proceso:

Clave	Servicio
EG-5700 AB/R	Calentador
FA-5700	Tanque de Expansión Térmica
FB-5700	Tanque de Almacenamiento de Aceite de Calentamiento
FG-5700	Filtro de Aceite de Calentamiento
GA-5700 AB/R	Bomba de Aceite de Calentamiento
GA-5701/R	Bomba de Reposición de Aceite de Calentamiento
GA-5702 AB/R	Bomba de Recirculación de Aceite de Calentamiento

Ver dibujo 07 "Diagrama de flujo de proceso del Sistema de Calentamiento" en el anexo.

El aceite frío proveniente del cabezal de retorno del sistema de Aceite de Calentamiento (@ 0.5 kg/cm² man. y 194 °C), se alimenta al calentador a fuego directo EG-5700 AB/R (5.6 kg/cm² man. y 194 °C), por medio de las Bombas GA-5700 AB/R, para

suministrarle la carga térmica necesaria y dar servicio a los equipos de intercambio de calor de la plataforma.

El flujo de aceite a condiciones máximas de diseño del calentador EG-5700 AB/R (3.5 kg/cm² man. y 243 °C) a control de temperatura, se distribuye a los siguientes equipos:

Clave	Servicio
EA-5401 AB	Rehervidor de la Torre Regeneradora de MDEA
EA-5451 AB	Rehervidor de la Torre Regeneradora de TEG
EA-5404	Calentador de Gas Combustible
EA-5350	Intercambiador Agua/Aceite

Una vez que el aceite de calentamiento ha transferido calor a través de los equipos antes mencionados se retorna al sistema de calentamiento a control de temperatura de la corriente de TEG (@ 210 °C), de gas combustible (@ 150 °C) y de agua de calentamiento (@ 150 °C), uniéndose a una corriente de recirculación en el cabezal de retorno, el cual se encuentra comunicado con el Tanque de Expansión Térmica FA-5700 (0.25 kg/cm² man. y 194 °C), en donde se absorben las variaciones de volumen del aceite de calentamiento, que se presentan por cambios de temperatura a través del circuito.

En el Tanque de Expansión térmica FA-5700, se inyecta gas combustible como sello para evitar la oxidación del aceite.

El aceite proveniente del cabezal de retorno, pasa por un Filtro de Aceite de Calentamiento FG-5700 y es enviado a la succión de las Bombas de Aceite de Calentamiento GA-5700 AB/R (@ 0.5 kg/cm² man. y 194 °C), descargando estas hacia el calentador EG-5700 AB/R (@ 5.6 kg/cm² man. y 194 °C) donde se calienta hasta 243 °C. La temperatura se controla regulando el flujo de entrada de combustible al calentador EG-5700 AB/R.

Cabe mencionar, que solo en el caso de los Rehervidores de la Regeneradora de MDEA EA-5401 AB, se utilizan dos Bombas de Recirculación de Aceite de Calentamiento

GA-5702 AB/R descargando a 3.5 kg/cm^2 man. y $160 \text{ }^\circ\text{C}$, previa mezcla con una recirculación de aceite frío (@ $140 \text{ }^\circ\text{C}$) del EA-5401 AB, que disminuye la temperatura de suministro a los paquetes de endulzamiento, evitando así la degradación de la MDEA.

Lateralmente al circuito, el sistema de aceite de calentamiento cuenta con un Tanque de Almacenamiento de Aceite de Calentamiento FB-5700, de donde succiona la Bomba de Reposición de Aceite de Calentamiento GA-5701 a 0.05 kg/cm^2 man. y $20 \text{ }^\circ\text{C}$, para cargar el circuito con aceite de calentamiento desde el mismo tanque.

De la succión de las Bombas GA-5700 AB/R se tiene una línea de vaciado de aceite del sistema al Tanque de Almacenamiento de Aceite de Calentamiento el cual cuenta con un sello de gas combustible, para evitar la oxidación del aceite.

El sistema de calentamiento utiliza aceite tipo Dowtherm G-40, algunas de sus propiedades físicas se presentan en la siguiente tabla:

T (°F)	cp (BTU/lb°F)	k (BTU/h.ft°F)	μ (Cp)	δ (lb/ft ³)
20	0.363	0.074	146.81	70.34
50	0.372	0.0732	34.252	69.5
100	0.387	0.0717	8.957	68.1
150	0.402	0.071	4.209	66.7
200	0.418	0.0684	2.523	65.2
250	0.433	0.0665	1.7	63.8
300	0.448	0.0645	1.221	62.4
350	0.464	0.0624	0.913	61
400	0.479	0.0602	0.703	59.6
450	0.494	0.058	0.553	58.2
500	0.51	0.0557	0.444	56.8
550	0.525	0.0534	0.362	55.4
600	0.54	0.051	0.3	53.9
650	0.555	0.0487	0.251	52.5
680	0.564	0.0473	0.228	51.68
Temperatura de estabilización:	hasta 371 °C con solamente 2.1 Kg/cm ² man.			
Temperatura de cristalización:	4 °C			
Peso Molecular promedio:	215			
Temperatura de degradación	371°C (700°F)			
Punto flash	130°C (266°F)			
Punto de ebullición	551°F			

Tabla No. 5.2 Propiedades del aceite térmico Dowtherm G

6. COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA ENTRE SISTEMAS DE CALENTAMIENTO

La elección de sistemas de calentamiento en Plataformas Marinas de Compresión así como en cualquier proceso industrial es de gran relevancia debido a la demanda de procesos más limpios y seguros así como la tendencia al ahorro de energía que en los últimos años se ha desatado. Los sistemas de calentamiento no son algo inherente a los procesos que los requieren, es decir, cada proceso requiere un sistema de calentamiento en particular que se adapte a las necesidades y condiciones de la planta. De manera que resulta indispensable hacer un análisis de las alternativas energéticas tomando en cuenta ciertos parámetros que permiten una elección objetiva del medio o sistema de calentamiento más adecuado.

En otros tiempos y sobre todo en México como parte del tercer mundo con poco desarrollo tecnológico era común tomar decisiones que solo se basaban en criterios económicos de manera que lo óptimo siempre resultaba ser lo más barato, sin embargo, a pesar de que en la actualidad lo que finalmente determina la factibilidad de algún proyecto siguen siendo parámetros económicos ya no es lo único que se toma en consideración, es decir ahora se deben integrar varios factores al análisis tanto económicos como de seguridad y normatividad a propósito de la estandarización de los procesos a nivel mundial.

En este sentido, el análisis de los sistemas de calentamiento en la Plataforma Marina de Compresión contempla aspectos técnicos y económicos por separado que finalmente se integran para tomar la decisión final.

6.1 Comparación Técnica

6.1.1 Seguridad

Los procesos de extracción, separación, transporte y manejo de hidrocarburos son por naturaleza peligrosos, como lo muestra la frecuente ocurrencia de siniestros mayores en instalaciones petroleras de todo el mundo, a pesar de los grandes avances tecnológicos. En instalaciones costa fuera, los principales riesgos son los de explosión y fuego. Y las consecuencias pueden ser desde un breve paro en la producción, hasta la destrucción completa de las instalaciones con la consiguiente pérdida no solamente de daños materiales que pueden sumar millones de pesos sino también de vidas humanas, además de la contaminación ambiental que se provoca, y el desperdicio de valiosos recursos naturales.

En una plataforma marina, las áreas de riesgo no pueden localizarse a distancias "seguras" unas de otras por la limitación del espacio, de manera que un fuego en cualquier área puede tener un "efecto de dominó" sobre las áreas adyacentes, poniendo en peligro a todo el complejo. A diferencia de las instalaciones en tierra firme, el auxilio externo puede ser nulo o tardío y casi no existen vías de escape para el personal. De aquí la importancia del factor seguridad en el diseño de procesos y equipo de proceso así como de la elección de los sistemas de calentamiento y en general de los servicios auxiliares.

En este sentido, un sistema de calentamiento indirecto que emplea aceite térmico presenta mayor riesgo de explosión y fuego por varias razones, en primer lugar por el uso de calentadores a fuego directo que por su naturaleza son considerados como equipos peligrosos sumándole a esto la insuficiencia de espacio en plataforma marina que no permitirá su instalación a distancias seguras del resto de los equipos. Además del riesgo que trae el uso de fluidos térmicos ya que en caso de alguna fuga de aceite térmico este forma neblinas explosivas que pueden iniciar el fuego por autoignición o por la cercanía con una fuente de ignición como la cámara de combustión del calentador a fuego directo.

El fluido térmico Dowtherm G que emplea el sistema de calentamiento convencional analizado tiene un punto flash bajo 266°F (130°C), y la descomposición térmica disminuye lo

disminuye aun más incrementando el riesgo de incendio o explosión. La descomposición térmica del fluido generalmente ocurre por la operación continua a elevadas temperaturas, aunque este fluido tiene un amplio rango de operación 20 a 680°F (-6.6 a 360°C) se recomienda que durante el proceso de calentamiento la diferencia de temperatura del fluido sea 50°F(10°C), cosa que en el proceso no ocurre ya que la diferencia de temperaturas que experimenta el aceite térmico en dos de los intercambiadores de calor es de 302 a 469°F (243 a 150°C), es decir, 199 °F, lo que acelerará el proceso de descomposición del fluido. Por otra parte, este sistema también presenta riesgo de incendio por la fácil formación de neblinas reactivas debido a fugas del aceite térmico.

El calor generado por electricidad es seguro, ya que al no manifestarse flama se reduce el peligro de explosión.

6.1.2 *Mantenimiento*

En cuanto al mantenimiento, como en cualquier proceso se buscan sistemas con poco requerimiento de mantenimiento que pueda provocar un paro en la producción y que estas operaciones de mantenimiento sean sencillas, rápidas y poco costosas.

El mantenimiento de sistemas de calentamiento por medio de aceite térmico consiste en inspecciones periódicas del calentador a fuego directo y sus componentes, así como del fluido térmico, un procedimiento a seguir es el siguiente:

- Lubricar las partes móviles.
- Revisar la fidelidad y precisión de las lecturas de los controles de seguridad y de los controles de temperatura.
- Inspeccionar los tubos del calentador, el quemador y los recubrimientos.
- Dar servicio periódicamente al calentador, limpieza cada 3 meses a los electrodos de ignición y estar pendiente del filtro de aceite de la bomba recirculadora, checar

funcionamiento correcto del programador de control de falla de flama y lamparas piloto en buen estado.

- Dar servicio periódicamente a los equipos de transferencia de calor involucrados en el proceso.
- Inspeccionar el fluido refrigerante de la bomba de circulación.
- Recargar o reempacar las cajas de relleno de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- Inspeccionar todas las superficies selladas, como los empaques de las válvulas, por evidencias de fugas. Reparar las áreas con fugas para prevenir pérdidas de fluido más serias y para reducir riesgos.
- Tomar muestras de fluido térmico dentro de las primeras 24 horas del arranque de la planta y después el muestreo se hará cada año.

El mantenimiento del sistemas de calentamiento eléctrico consiste en:

- Revisar la fidelidad y precisión de las lecturas de los controles de seguridad y de los controles de temperatura.
- Revisar los paneles de control.
- Dar servicio a los elementos de calentamiento.
- Revisar las instalaciones eléctricas.

Cualquiera de los dos sistemas de calentamiento requiere mantenimiento periódico, pero el sistema convencional requerirá especial atención en el servicio del calentador a fuego directo, y la reparación de fugas.

Los trabajos de mantenimiento se simplifican en el caso de sistemas eléctricos por ser más compactos y ligeros, además de los elementos de calentamiento son fácilmente sustituibles.

6.1.3 Espacio y peso

Es evidente que en Plataformas marinas el espacio es limitado sobre todo por el costo de las estructuras que depende en forma directa de la profundidad de las aguas sobre las que se localiza la plataforma. De modo que se prefiere la instalación de equipos más compactos y de sistemas que brindan servicios auxiliares menos complejos (menos equipos adicionales como bombas, tanques de almacenamiento, etc.).

Sobre plataformas marinas el ahorro de espacio se convierte en ahorro en el costo de la estructura, este ahorro en el costo se incrementa con la profundidad del agua en la cual se localiza la estructura. Además de la comodidad que esto representa para el mantenimiento y limpieza de los equipos.

En cuanto al peso es algo similar a lo que pasa con el espacio, es decir, el ahorro en el peso significará también un ahorro en el costo de la estructura, así como facilidad de transporte, instalación y mantenimiento de los equipos.

Los sistemas de calentamiento eléctrico presentan una importante ventaja en cuanto al tamaño de los equipos, los calentadores eléctricos de circulación son más compactos que los intercambiadores de calor convencionales. Como ejemplo se compara el equipo EA-5401 rehervidor de la torre regeneradora de MDEA.

Equipo:	Convencional	Eléctrico
Area que ocupa el equipo	5 m ²	2.7 m ²
Peso del equipo	4929.5 kg	3628.7 kg

Además de que un sistema de calentamiento convencional involucra la instalación de un calentador a fuego directo de gran tamaño y peso, además del tanque de expansión, bombas, tubería etc., por lo que los sistemas de calentamiento eléctrico podrían representar ahorro en la inversión, sin embargo, no siempre resulta ser así ya que el área de la plataforma se determina considerando a todos los equipos involucrados en todos los procesos dentro de la plataforma, y no de los procesos por separado.

6.1.4 Disponibilidad de energía

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, existen varias formas de obtener energía térmica una de ellas es por combustión y otra es por medio de corriente eléctrica, además de fuentes energéticas no convencionales como la radiación solar. Es importante conocer las fuentes de energía disponibles en plataforma que puedan proporcionar la carga térmica requerida por el proceso, evaluar cada una de ellas y considerar esta evaluación en la decisión final.

En la plataforma marina de compresión se dispone de combustibles como gas combustible y diesel, en cantidades suficientes para cubrir la demanda energética que es de 16 millones de Btu/hora.

En cuanto a la disponibilidad de energía para el equipo a base de resistencias eléctricas debe tomarse en cuenta si debe montarse líneas de alto voltaje para traer la electricidad de otro lugar, lo que puede resultar muy costoso.

La plataforma marina de compresión es autosuficiente en electricidad ya que se cuenta con 3 turbogeneradores duales que suministran las cargas eléctricas necesarias para el proceso, sin embargo no se descarta la posibilidad de obtener este energético por otro sistema de generación, como lo es implantar un sistema de cogeneración, que proporcionaría la energía eléctrica que requiere un sistema de calentamiento a base de resistencias eléctricas a bajos costos y alta eficiencia energética en la plataforma.

En el caso de requerir energía eléctrica de emergencia esta se generará en la plataforma de producción a través de un generador accionado por motor diesel, en un tiempo de

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

restablecimiento de 3 segundos, de manera que no habría problemas de paros en el proceso debido a un corte en el suministro de electricidad.

6.1.5 Operabilidad

En este sentido la importancia de la selección del sistema de calentamiento se basa en la capacidad de los sistemas para responder a las condiciones de operación del proceso, la planta de compresión de gas deberá operar los 365 días del año, lo que requiere de un sistema confiable que no requiera de mucho tiempo para mantenimiento y que responda rápidamente a los cambios en la operación.

Los sistemas de calentamiento eléctrico con un adecuado sistema de control, que normalmente son instrumentos muy sencillos, responden rápidamente a las condiciones de operación necesarias en la plataforma. Estos sistemas son capaces de operar en un intervalo amplio de temperatura y presión (hasta 4500 psi y 1000°C), como se menciona en el Capítulo 5. este sistema proporcionara la energía necesaria para elevar la temperatura del agua para la potabilizadora de 167 a 185°F (75 a 85°C), y del gas combustible de 105.8 a 118°F (41 a 48°C) (40 kg/cm²) y para evaporar cierta cantidad de MDEA a 257°F (125°C) y TEG a 392°F (200°C), (Dibujo No. 07 del anexo).

El sistema de calentamiento a fuego directo también proporciona el calor necesario por medio del incremento de temperatura del aceite térmico de 383 a 469.4 °F (195 a 243°C), sin embargo la vida útil del aceite puede verse afectada por la continua diferencia de temperatura además de que en el calentador las temperaturas no son tan fácilmente controlables, lo que puede provocar que se alcance la temperatura de degradación del aceite térmico 699°F (371°C) para evitar este tipo de incidentes el sistema necesita sistemas de control muy complicados. Otro inconveniente del fluido térmico empleado es la presencia de olores molestos provocando condiciones de trabajo desfavorables.

Por otra parte con un adecuado mantenimiento ambos sistemas pueden alcanzar largos periodos de vida útil, pero en el caso del aceite térmico existe también el inconveniente que

son las pérdidas por fuga, la experiencia muestra que operando arriba del punto de ebullición normal del aceite térmico, las pérdidas serán de un 25-30% por año, pero si se opera por debajo del punto normal de ebullición se producirán pérdidas del 5 al 10% del fluido térmico.

Las condiciones de operación en el sistema eléctrico de calentamiento se mantienen estables puesto que las unidades calefactoras estando bien aisladas evitan la pérdida de calor, de tal forma que no habrá humo ni productos en combustión, cenizas o suciedad y por tanto el área se mantendrá limpia. Además el calor generado por energía eléctrica es eficiente, ya que puede llegar a obtener el total de los 862 Kilocalorías que es posible generar de 1 kilowatt-hora, aunque al aplicarlo solamente se aprovecha entre un 70 a 90%. En cambio al convertir un combustible en calor la eficiencia varía de 5 al 80% por la pérdida en el encendido y en su aplicación al objeto a calentarse.

6.1.6 Estabilidad

Los procesos industriales requieren operar de manera estable para no ver afectada la producción en cuanto a cantidad y calidad. En este sentido el control de la temperatura, es un factor muy importante a considerar en la selección del sistema o medio de calentamiento.

La estabilidad del proceso en la plataforma marina de compresión es de gran importancia, concretamente la estabilidad de la temperatura de operación de ciertos equipos es un factor crítico en la operación de la planta como lo es el caso del rehervidor de TEG (agente de deshidratación) EA-5451 en la sección de deshidratación de gas (ver dibujo No. 03 del anexo) ya que un ligero incremento en la temperatura de este compuesto puede originar su descomposición dada la cercanía entre la temperatura de operación (400°F) con su temperatura de degradación (404°F) lo que implicara un aumento en los costos de operación pues se tendría que reponer el TEG degradado lo que en una instalación costa fuera es particularmente difícil además de acarrear problemas de corrosión e incrustamiento excesivo, lo mismo sucede con la temperatura de operación en el equipo EA-5401 rehervidor de la torre regeneradora de

MDEA (ver dibujo No. 02 del anexo) que no deberá exceder de 258°F (126°C) ya que un valor más alto provocaría la degradación de la amina.

En los sistemas eléctricos el calor es fácilmente controlable y puede ser regulado a las necesidades de trabajo, dando una flexibilidad y estabilidad que no puede ser obtenida por ningún otro medio.

6.1.7 Aspectos ambientales

En este ámbito se debe poner mucha atención por la necesidad de cumplir las exigencias de normas tanto nacionales como internacionales, las normas que se aplicarán serán las vigentes por parte de la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) evitando el uso de compuestos tóxicos y la emisión de contaminantes al ambiente.

El calentamiento eléctrico no presenta problemas de emisión de contaminantes ni manejo de sustancias peligrosas o tóxicas, siendo muchas veces esta la única alternativa para evitar este tipo de problemas.

En el caso de sistemas de calentamiento a fuego directo se presentan emisiones de productos de la combustión de gas, diesel, o cualquier otro combustible utilizado, productos como monóxido de carbono, bióxido de carbono, hidrocarburos reactivos y bióxido de azufre que afectan la calidad del aire, las cuales están reguladas bajo la normatividad de la SEMARNAP^[24].

Un sistema de calentamiento convencional como el que se presenta en el capítulo 5 acarrea problemas de generación de residuos tóxicos, ya que el fluido que se utiliza como medio de transporte de calor (Dowtherm G) es considerado como "químico peligroso" según la OSHA^[23]. El contacto de este fluido causa irritación moderada en ojos al igual que la exposición a sus vapores. La exposición por tiempo prolongado puede causar irritación en la piel y la exposición rutinaria puede causar severas irritaciones. Posee baja toxicidad por

ingestión. La inhalación de los vapores que se producen cuando es calentado o cuando hay formación de neblinas puede causar irritación en las vías respiratorias y otros efectos. Algunos signos y síntomas de exposición excesiva pueden ser los efectos sobre el sistema nervioso central como jaquecas, mareos, somnolencia y falta de coordinación.

Este fluido puede descomponerse formando sustancias peligrosas como benceno y fenol. De modo que cuando el fluido ya no pueda ser recuperado por destilación o simple filtración una opción es enviarlo a incineradores permitidos por las leyes locales (su combustión produce carbón, monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua). La otra opción es el confinamiento, por ningún motivo debe tirarse al drenaje, al suelo o a ningún depósito de agua, este fluido debe almacenarse en lugares especiales establecidos por las leyes locales en este caso el Reglamento de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de residuos peligrosos^{[25][26]}.

6.2 Comparación económica

La ingeniería económica aborda los conceptos y las técnicas de análisis útiles para la evaluación del valor de sistemas, productos y servicios en relación con su costo, pues es un hecho que el requisito esencial para un uso exitoso de la ingeniería es la factibilidad económica. De ahí la importancia del análisis económico de alternativas de inversión que tiene como fin la selección de una de las propuestas que satisfacen la misma necesidad.

Los criterios para la toma de decisión implican la existencia de algún índice, medida de equivalencia o base de comparación que resuma las diferencias significativas entre alternativas de inversión. La reducción de alternativas a una base común es indispensable con el fin de que ciertas diferencias apenas aparentes se vuelvan reales al tener en cuenta el efecto del tiempo sobre el valor de la moneda. Las diferencias reales, una vez expresadas en términos de una base común, se toman comparables directamente y pueden emplearse entonces en el proceso de toma de decisiones. Las bases para la comparación de alternativas más comunes son el valor presente, el costo anual uniforme equivalente, la cantidad capitalizada equivalente, el valor futuro y la tasa de retorno.

Considerando que el objetivo de este trabajo es proporcionar elementos para la toma de decisiones sobre la selección del medio o sistema de calentamiento que proporcionara la carga térmica que requieren los diversos procesos involucrados en la Plataforma Marina de Compresión CA-LT-A, que forma parte del Complejo de producción del Litoral Tabasco. El método que se utiliza para la comparación económica en este trabajo es el Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente^[27], el cual se basa en la transformación del costo de cada alternativa en una serie uniforme equivalente de costos anuales a una tasa mínima requerida de rendimiento. Las ventajas de este método son que: es mucho más fácil explicar y justificar que algunas técnicas más complejas como valor futuro o tasa de rendimiento sobre la inversión. Es un método adecuado para casos como este en los cuales es necesario tomar una decisión de tipo económico sin que se involucren ingresos, es decir, en las situaciones en que solo existen costos para brindar los servicios auxiliares indispensables para el desarrollo de las actividades de la industria, con un beneficio en el proceso productivo que no puede estimarse pero que es

igual en todas las alternativas. Como consecuencia los flujos de efectivo de las alternativas a evaluar comprenden exclusivamente costos por lo que deberá seleccionarse aquella opción que represente el mínimo costo anual equivalente.

También se incluye el cálculo del valor presente que consiste simplemente en traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente para cada alternativa y seleccionar aquel que tenga el valor presente máximo positivo, siempre que los ingresos y egresos de cada flujo de efectivo sea conocido. Como ya mencionamos en esta evaluación solo los costos son conocidos entonces se seleccionara la estrategia que minimice el valor presente de los costos netos incurridos para proporcionar el servicio.

En estos métodos que toman en cuenta el valor del dinero en el tiempo cabe destacar que la tasa de interés i apropiada debe determinarse externamente al proyecto, tomando como referencia el uso alternativo que se le puede dar al dinero y el riesgo de realizar la inversión, de manera que todo inversionista deberá tener una tasa de referencia para hacer sus inversiones conocida como Tasa Mínima Atractiva de Rendimiento (TMAR), esperando obtener cuando menos esa tasa para que su dinero crezca en términos reales, lo que significa ganar un rendimiento superior a la inflación, ya que si se gana un rendimiento igual a la inflación el dinero no crece sino mantiene su poder adquisitivo. Por lo tanto la TMAR es igual a la tasa de inflación más un premio al riesgo. La determinación esta fuera del alcance de cualquier inversionista pero lo que si se puede establecer es el premio al riesgo.

La inflación correspondiente al periodo de mayo de 1999 a mayo de 2000^[32] que es de 9.48%, sin embargo una inversión segura como los Certificados de la Tesorería de la Federación (CETES) proporciona una tasa de rendimiento de 15.34%^[32] con lo cual se puede establecer la TMAR como este valor que proporcionan los CETES más el valor por el riesgo de invertir como el premio es por arriesgar, significa que a mayor riesgo se merece mayor ganancia. De manera que para empresas productoras de bienes o servicios donde la demanda sea estable y no haya una competencia muy fuerte se puede afirmar que el riesgo de la inversión es relativamente bajo, y puede fluctuar del 3 al 5%. Así para este caso se establece con fines comparativos la TMAR del 20%.

El costo de los equipos involucrados se obtuvo a partir de datos de fabricantes y proveedores^{[28][29]}.

6.2.1 Sistema de calentamiento a fuego directo:

6.2.1.1 Costos fijos

Costos fijos	Pesos
Calentador a fuego directo EG-5700*	7 294 000
Tanque de expansión FA-5700*	235 470
Tanque de almanto. de aceite de calentamiento FB-5700*	215 000
Bombas (3) GA-5700 A/R, GA-5702 A/R Y GA-5701*	430 000
Filtro para aceite térmico FG-5700*	10500
Rehervidor de TEG EA-5451*	1 448 530
Calentador de gas combustible EA-5404*	188 000
Rehervidor de MDEA EA-5401*	582 690
Calentador de agua para potabilizadora EA-5350*	343 830
Costo de instalación	322 440
Costo de aceite térmico	235 150
Costos fijos totales	\$ 11 305 610

* Ver dibujo No. 07 "DFP del sistema de calentamiento" en el anexo.

El costo de instalación se cálculo considerando un 3% del costo del equipo.

El costo del aceite térmico es de US\$4.95⁽³⁰⁾ por kilogramo y se requiere de 5 000 kilogramos.

6.2.1.2 Costos de operación

Costos de operación	Pesos por año
Costo de energía eléctrica	150 235
Costo de combustible	6 395 915
Costo de mantenimiento	565280
Costo de reposición de aceite térmico	58 788
Costos de operación anuales	\$ 7 170 218

El costo de combustible se calcula a partir de la carga térmica que proporcionará el calentador y el poder calorífico del gas combustible:

$$(16\ 000\ 000\ \text{Btu/hr}) / (922\ \text{Btu/ft}^3) = 17354\ \text{lb/ft}^3$$

considerando una eficiencia del 70%

$$17354\ \text{ft}^3/\text{hr} (1.43) = 24816\ \text{ft}^3/\text{hr}$$

$$\text{El consumo anual será: } (24816\ \text{ft}^3/\text{hr}) \times (720\ \text{hr/mes}) \times 12\ \text{meses} = 214\ 412\ 141\ \text{ft}^3/\text{año}$$

214 412 141 ft³ de combustible por año multiplicado por el costo del combustible:

$$214\ 412\ 141\ \text{ft}^3/\text{año} (\$29.83/1000\ \text{ft}^3)^{(31)} = 6\ 395\ 915\ \$/\text{año}$$

Generalmente el costo de mantenimiento se calcula considerando el 5% de los costos fijos, y la reposición del aceite térmico será el 25% anual.

Para el caso de la evaluación del costo por consumo de energía eléctrica de las bombas del sistema de calentamiento se tiene:

El sistema emplea dos bombas centrífugas, GA-5700 bomba de aceite de calentamiento de 50 HP y GA-5702 bomba de recirculación de aceite térmico 10 HP

Potencia total = 60HP = 44.7 KW

Costo anual = 44.7 KW (720 hr/mes)(12 meses/año)(0.389 \$/KW-hr) = 150 235 pesos.

6.2.1.3 Costo Anual Uniforme Equivalente

El costo total anual para cada uno de los sistemas analizados se obtiene por medio de un balance entre los costos fijos y los costos de operación, distribuyéndolos en anualidades equivalentes incluyendo un factor de recuperación de capital para una serie de pagos iguales.

COSTOS FIJOS	\$ 11 305 610
COSTOS DE OPERACIÓN	\$ 7 170 218

La anualidad se calcula con la siguiente fórmula, que es la de pago uniforme con reinversión.

$$A = I i (1 + i)^n / [(1 + i)^n - 1]$$

Donde: A= anualidad

I= capital invertido

i= interés

n= tiempo de recuperación

Como ya se mencionó anteriormente se emplea una tasa de rendimiento del 20% anual y el tiempo de recuperación de 10 años (tiempo de vida del equipo). Cabe mencionar que se consideran diez años como vida fiscal sin embargo, la vida de los equipos involucrados puede ser alrededor de 15 años dependiendo del factor de servicio, que en este caso será de 1 lo que significa que el equipo estará trabajando las 24 horas de los 365 días del año, reduciendo su vida útil casi hasta 10 años.

$$A = 11\,305\,610 \times 0.2(1.2)^{10} / [(1.2)^{10} - 1]$$

$$A = \$2\,696\,645$$

COSTOS DE OPERACIÓN \$ 7 170 218

ANUALIDAD EQUIVALENTE \$ 2 696 645

COSTO TOTAL ANUAL \$ 9 866 863

6.2.1.4 Valor presente

Este método consiste en transformar a valor presente, via una tasa de actualización (se utiliza la TMAR), todos los componentes del flujo de fondos de un proyecto, en este caso todos los flujos son costos:

$$\text{Inversión inicial} = \$ 11\,305\,610$$

$$\text{Flujos de efectivo (costos de operación anuales)} = \$ 7\,170\,218$$

$$VP = 11\,305\,610 + 7\,170\,218 \{ (1+0.2)^{10} - 1 \} / (1+0.2)^{10} \times 0.2$$

$$VP = 41\,366\,749$$

6.2.2 Sistema de calentamiento eléctrico

6.2.2.1 Costos fijos

Costos fijos	Pesos
Rehervidor de MDEA EA-5401	1 860 166
Costo de panel de control del EA-5401	1 037 431
Rehervidor de TEG EA-5451	3 677 035
Costo de panel de control del EA-5451	1 184 898
Calentador de agua para potabilizadora EA-5350	93 379
Costo de panel de control del EA-5350	166 267
Calentador de gas combustible EA-5404	197 090
Costo de panel de control del EA-5404	153 737
Costos de instalación	250 000
Costos fijos totales	\$ 8 620 003

6.2.2.2 Costos de operación

Costos de operación	Pesos por año
Costo de energía eléctrica	15 151 847
Costo de mantenimiento	258 600
Costos de operación anuales	\$ 15 410 447

El costo de la energía eléctrica se calcula tomando como referencia los precios de la electricidad para la gran industria para fines comparativos solamente, ya que la plataforma

será autosuficiente y no requerirá del suministro de electricidad por parte de la Comisión Federal de Electricidad.

$$16\ 000\ 000\ \text{Btu/hr} / 3412\ \text{Btu/KW-hr} = 4689\ \text{KW}$$

Considerando un 90 % de eficiencia:

$$4\ 689\ \text{KW} (1.1) = 5\ 157.9\ \text{KW}$$

Para fines de cálculo se considera que el precio de la energía eléctrica para la gran industria al mes de abril de 2000 es de 0.34 pesos corrientes por KW-hr³¹¹.

$$5157.9\ \text{KW} (720\ \text{hr/mes})(12\ \text{meses/año})(0.34\ \$/\text{KW-hr}) = 15\ 151\ 847\ \$/\text{año}.$$

El mantenimiento de los equipos eléctricos será de un 3% de los costos fijos.

6.2.2.3 Costo Anual Uniforme Equivalente

$$\text{COSTOS FIJOS} \quad \$ 8\ 620\ 003$$

$$A = 8\ 620\ 003 \times 0.1(1.2)^{20} / [(1.2)^{20} - 1]$$

$$A = 2\ 056\ 067\ \text{pesos}.$$

$$\text{COSTOS DE OPERACIÓN} \quad 15\ 410\ 447$$

$$\text{ANUALIDAD EQUIVALENTE} \quad 2\ 056\ 067$$

$$\text{COSTO TOTAL ANUAL} \quad \$ 17\ 466\ 544$$

6.2.2.4 Valor presente

$$\text{Inversión inicial} = \$ 8\ 620\ 003$$

$$\text{Flujos de efectivo (costos de operación anuales)} = \$ 15\ 410\ 447$$

$$\text{VP} = 72\ 144\ 121$$

7. CONCLUSIONES.

En la actualidad determinar la viabilidad de un proyecto o elegir una alternativa en lo referente a los aspectos de ingeniería, depende del enfoque que se emplee para encontrar una solución óptima. De manera tal, que la mejor elección dependerá frecuentemente de la capacidad que se tenga para manejar tanto los aspectos técnicos como los económicos, traduciendo lo anterior a una evaluación de propuestas en términos de valor y costo. A continuación se muestra un resumen de los resultados obtenidos que permite valorar en cada uno de los aspectos la aplicabilidad de cada sistema.

Comparación técnica-económica entre los sistemas de calentamiento en plataformas marinas

Aspectos técnicos	Calentamiento eléctrico	Calentamiento a fuego directo
<i>Seguridad</i>	Es muy seguro ya que no requiere de flama para operar reduciendo el peligro de explosión.	Requiere de muchos aditamentos de seguridad debido tanto al requerimiento de flama calentador a fuego directo, así como el uso del aceite térmico.
Mantenimiento	Operaciones de mantenimiento sencillas y económicas.	Requiere de varias operaciones de mantenimiento costosas y complicadas
Espacio y peso	Estos sistemas permiten un considerable ahorro en espacio y peso	El sistema a fuego directo involucra un gran espacio y peso, tanto por el tamaño de los equipo como por las

		consideraciones de seguridad y equipo auxiliar.
Disponibilidad de energía	Se dispone de energía eléctrica que se genera a bordo de la misma plataforma	Se dispone de grandes cantidades de gas combustible producido en la plataforma.
Operación	Fácil operación con pocas pérdidas de calor. Sin embargo requiere de un alto consumo de energía eléctrica (5157 KW)	Provoca condiciones de operación desfavorables por la presencia de olores molestos y vapores tóxicos, además de que las condiciones de operación del sistema aceleran la degradación del aceite térmico.
Estabilidad	El calor es fácilmente controlable y puede ser regulado a las necesidades de trabajo, dando una flexibilidad y estabilidad adecuada	Este sistema requiere de elaborados sistemas de control para mantener la estabilidad en el proceso.
Ambiental	El uso de energía eléctrica no presentan limitantes en cuanto a la generación de contaminantes y residuos tóxicos, sin embargo, la generación de la energía trae consigo emisiones a la atmósfera.	Se ve limitado por consideraciones de normatividad en cuanto a la emisión de contaminantes productos de la combustión del energético y la generación de residuos tóxicos.

Aspectos económicos	Calentamiento eléctrico	Calentamiento a fuego directo
Costos fijos	\$8 620 000	\$11 305 000
Costos de operación	\$15 410 447	\$7 170 218
Costo total anual	\$17 466 544	\$9 866 863
Valor Presente	\$72 144 121	\$41 366 749

A partir de los resultados del análisis económico podemos establecer la factibilidad de seguir utilizando los sistemas de calentamiento convencionales en plataformas marinas, a pesar de las ventajas técnicas que ofrecen los sistemas de calentamiento eléctrico sobre todo en materia de seguridad y medio ambiente. Asimismo en puntos como la estabilidad sobre el control de temperaturas, la relativa sencillez en cuanto al mantenimiento y un ahorro considerable en cuanto a espacio (este punto es de gran relevancia en una plataforma marina dado el limitado espacio disponible), el sistema eléctrico presenta ventajas sobre el sistema convencional. Pero la principal limitante que presenta el sistema eléctrico es en cuanto al consumo de la energía eléctrica necesaria para la operación ya que este es bastante elevado (5 157 KW).

El análisis de costos revela la conveniencia del sistema a fuego directo aunque el costo fijo del sistema eléctrico sea alrededor de un 22% menor que el primero, esto se compensa con su bajo costo de operación.

En cuanto a los costos totales anuales tenemos que el sistema a base de aceite térmico es el más viable pues presenta un monto de \$9 866 863 mientras que el sistema de calentamiento eléctrico tiene un costo de \$17 466 544 con lo cual se tiene una diferencia de mas de \$7 000 000 anuales, así también el valor presente para los costos del sistema eléctrico es mucho mayor que para el otro sistema, esto debido al elevado consumo de electricidad. Sin

embargo, se deberá considerar la reducción en el costo de la energía eléctrica utilizada ya que esta no proviene de una compra directa a la CFE pues es autogenerada a bordo, además de que se pueden reducir aún más los costos si esta se obtiene por otros medios como un sistema de cogeneración que dará mayor eficiencia energética a la Plataforma Marina de Compresión.

Cabe señalar que este trabajo es pionero en cuanto al análisis de sistemas de calentamiento en Plataformas Marinas de Compresión lo que resulta de gran importancia dada la creciente demanda de gas natural en el país y por lo tanto la necesidad de instalación de nuevas plataformas. Por ello, este trabajo genera un antecedente para toma de decisiones posteriores, que involucren la instalación de un sistema de cogeneración en plataformas marinas.

Finalmente aun cuando estos resultados muestran la conveniencia económica de seguir utilizando los sistemas convencionales a través de calentamiento de aceite térmico, no se debe descartar la posibilidad de que en un futuro debido a la implantación de sistemas de cogeneración que abata los costos de la energía eléctrica, a la legislación y presiones de orden ambiental se recurra al calentamiento eléctrico.

7. REFERENCIAS Y ANEXOS

REFERENCIAS

- [1] Internet: <http://www.energía.gob.mx/secc7/opi01.html>
- [2] SE, "Prospectiva del mercado de gas natural 1998-2007", ISBN:968-874-118-3, Secretaría de Energía, Dirección General de Política y Desarrollo Energético, México 1998.
- [3] PEMEX, "Annual Report 1997", México, 1997.
- [4] PEMEX, "Statistical Yearbook 1998", México, 1998.
- [5] Ortiz R., J.M., Instituto Mexicano del Petróleo, "Curso de Ingeniería Básica de Proceso", Tomo V, México.
- [6] Donald, Q. Kern, "Procesos de transferencia de calor", Compañía Editorial Continental, S.A., México, 1981.
- [7] Perry, "Manual para el Ingeniero Químico"
- [8] Mills, "Transferencia de calor", ISBN: 84-8086-194-0, España, 1995
- [9] Watlow, "Providing Heating Expertise", USA.
- [10] Richard L. Green; Alvin H. Larsen and Allen C. Pauls, Monsanto Chemical Co., "The Heat Transfer Spectrum", Chemical Engineering, ISSN: Vol., Número 2, February 1989
- [11] Richard L. Green; Ronald C. Morris, Monsanto Co., "Heat Transfer Fluids- to easy to overlook", Chemical Engineering
- [12] "Thermal Degradation" Chemical Engineering, October 1995
- [13] "A selection of heat transfer fluids", Chemical Engineering, Vol. 104, No. 10, October 1997
- [14] "What to look for in a heat transfer fluid", Chemical Engineering, Vol. 96, No. 2, pg. 93, February 1989
- [15] "Heat transfer fluids get more versatile" Chemical Engineering, Vol. 101, No. 5, pg. 115, February 1994

- [16] "Get the most out of heat transfer fluids", Chemical Engineering, Vol. 101, No. 5, pg. 75 May 1994
- [17] Monsanto "Material Safety Data" Therminol 66 heat transfer fluid.
- [18] Dow Chemical Company "Material Safety Data Sheet" Dowtherm G heat transfer fluid
- [19] Craig S. Tiras, "Get the most from your electric process heater", Chemical Engineering, February 1999
- [20] "Therminol heat transfer Fluids" Design Guide, Monsanto Co., USA 1993
- [21] "Therminol Information Bulletin No. 4" Monsanto Co., USA, 1994
- [22] Aldaz Velez Silvia Elizabeth, "Sistemas de Seguridad y Contra Incendio en las Plataformas de la Sonda de Campeche", tesis de licenciatura, México 1997.
- [23] OSHA Hazard Communication Standard 29CFR1900.1200
- [24] NOM-086-ECOL-1994 "Contaminación atmosférica especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles".
- [25] NOM-052-ECOL-1993 "Listado de residuos peligroso por su toxicidad al ambiente".
- [26] NOM-055-ECOL-1993 "Confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radiactivos"
- [27] H.G. Thuesen, "Ingeniería Económica" ISBN: 0-13 464719-X, México, 1986
- [28] Proveedor: Watlow de México S.A. de C.V.
- [29] Proveedor: Industrias Thermoflux, S.A. de C.V.
- [30] Proveedor: Dow Química Mexicana S.A. de C.V.
- [31] Internet: <http://www.energía.gob.mx>
- [32] Banco de México.
- [33] G. Baca Urbina, "Fundamentos de Ingeniería Económica" ISBN:968-422-436-6, México, 1994.
- [34] F.C. Jelen, "Cost and Optimization Engineering", ISBN:07-032323-2, USA, 1970.

ANEXO

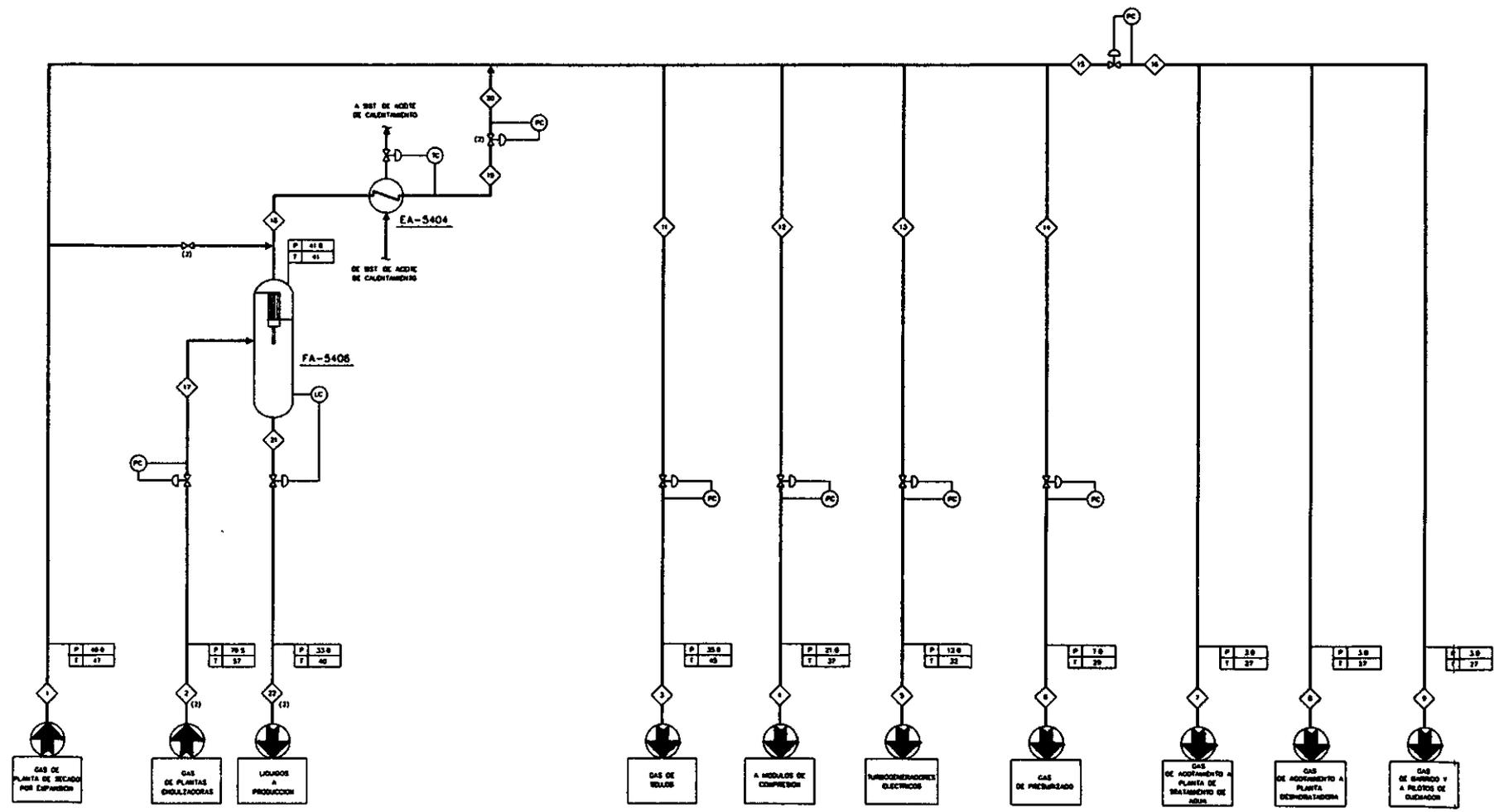
CARACTERÍSTICAS	CONDICIONES										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
W _{CO2}	0.088	0.231	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
W _{H2O}	0.025	0.063	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
W _{N2}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
W _{CO}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{H2}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{CH4}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C2H6}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C3H8}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C4H10}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C5H12}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C6H14}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C7H16}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C8H18}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C9H20}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C10H22}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C11H24}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C12H26}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C13H28}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C14H30}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C15H32}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C16H34}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C17H38}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C18H40}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C19H42}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C20H46}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C21H48}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C22H50}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C23H54}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C24H58}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C25H62}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C26H66}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C27H70}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C28H74}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C29H78}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C30H82}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C31H86}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C32H90}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C33H94}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C34H98}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C35H102}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C36H106}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C37H110}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C38H114}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C39H118}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C40H122}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C41H126}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C42H130}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C43H134}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C44H138}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C45H142}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C46H146}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C47H150}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C48H154}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C49H158}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C50H162}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C51H166}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C52H170}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C53H174}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C54H178}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C55H182}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C56H186}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C57H190}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C58H194}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C59H198}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C60H202}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C61H206}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C62H210}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C63H214}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C64H218}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C65H222}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C66H226}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C67H230}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C68H234}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C69H238}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C70H242}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C71H246}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
W _{C72H250}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

LISTA DE EQUIPO

CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS
EA-5404	CALENTADOR DE GAS COMBUSTIBLE	84.4 x 1.1 Mts/An
FA-5406	SEPARADOR DE GAS COMBUSTIBLE	610 mm. O.D. x 2438 mm T-T

NOTAS:

- 1.- PRESION EN kg/cm² abs. TEMPERATURA EN °C
- 2.- NORMALMENTE SIN FLUJO
- 3.- EN CASO DE UTILIZAR GAS DE LAS PLANTAS EXISTENTES EL COMBUSTIBLE SERA OPERANTE POR LO QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN ESTE BALANCE SE TENDRAN QUE VALIDAR LUEGO.
- 4.- 57A 50PS DE COMBUSTIBLE



DR-01-01	Diagrama de flujo de proceso planta oxidadora
DR-01-02	DR-01-03
DR-01-04	DR-01-05
DR-01-06	DR-01-07
DR-01-08	DR-01-09
DR-01-10	DR-01-11
DR-01-12	DR-01-13
DR-01-14	DR-01-15
DR-01-16	DR-01-17
DR-01-18	DR-01-19
DR-01-20	DR-01-21
DR-01-22	

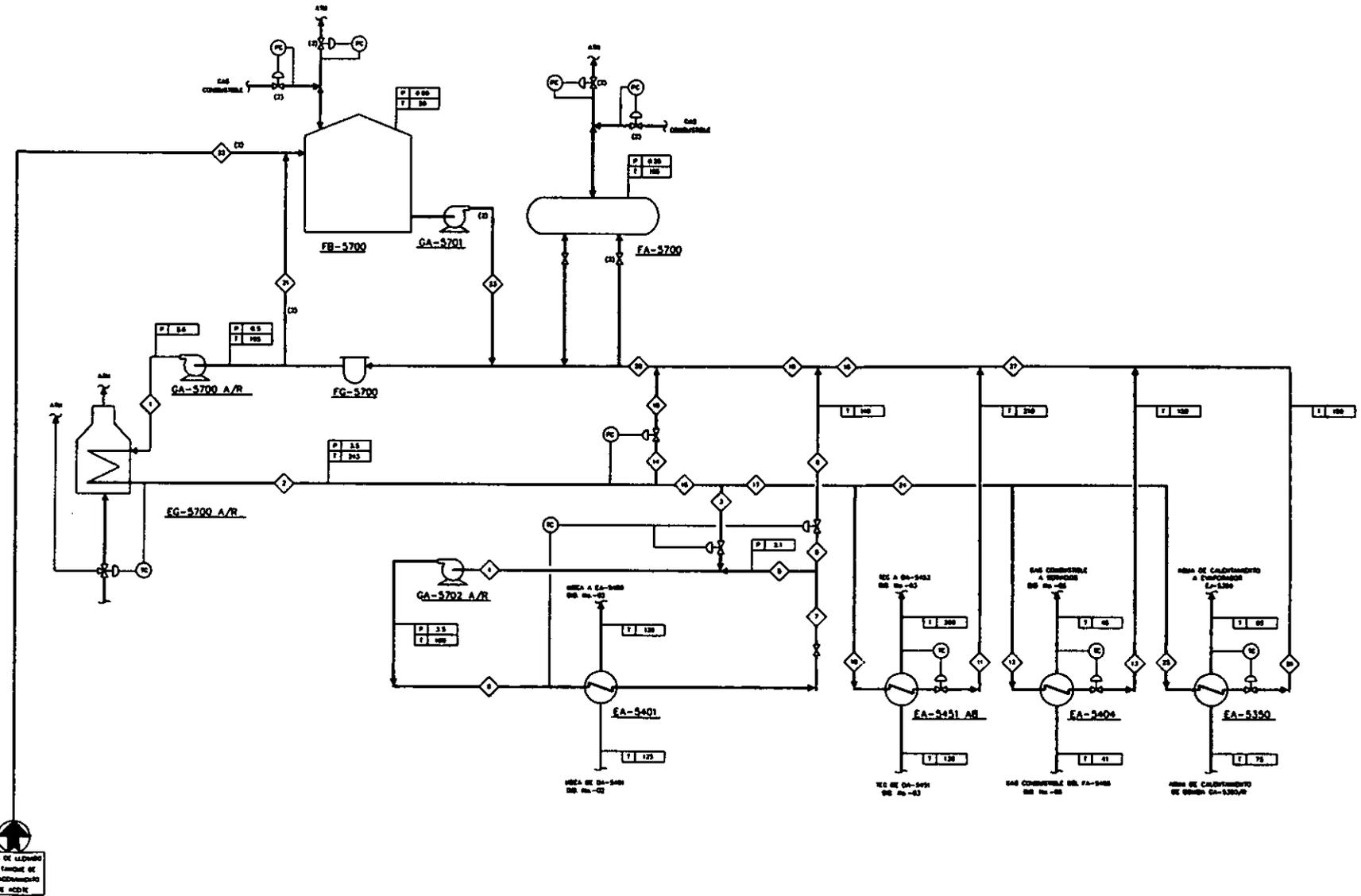
CORRIENTE CM	1	2	3	4	5	6	7
Flujo kg/m ² /h	921.0	171.0	853.0	854.4	10.4	91.0	84.6
Flujo m ³ /h	1080.7	208.6	2030.37	1192.09	227.2	1088.7	2084.7
Flujo m ³ /día	25920	5016	28320	16608	545	2609	25992
Flujo m ³ /año	9.0	1.5	3.5	3.5	3.5	6.0	3.5
Temperatura °C	750	243	100	243	243	170	243
Presión kg/cm ² P.T.	0.9889	0.5297	0.9953	0.5297	0.5297	0.9887	0.5297

LISTA DE EQUIPO

CLAVE	SERVICIO	CARACTERÍSTICAS (1)
EA-5401	REGENERADOR DE LA REGENERADORA DE AGUA	1512 m ³ /hr x 1.1
EA-5451 AB	REGENERADOR DE LA TORRE REGENERADORA DE AGUA	1662 m ³ /hr x 1.1
EA-5404	CALENTADOR DE GAS COMBUSTIBLE	84.4 m ³ /hr x 1.1
EA-5300	INTERCAMBIADOR AGUA/AGUOTE	758 m ³ /hr x 1.1
CO-5700 A/R	CALENTADOR DE ACEITE TERMO	4534 m ³ /hr x 1.21
FA-5700	TANQUE DE EXPANSION TERMICA	1534 mm Ø1. x 2040 mm T-1
FB-5700	TANQUE DE ALMACEN DE ACEITE DE CALENTAMIENTO 2501 mm Ø1. x 3040 mm T-1	
FS-5700	FILTRO DE ACEITE DE CALENTAMIENTO	3757 LPM. 25 MICRAS
GA-5700 A/R	BOMBA DE ACEITE DE CALENTAMIENTO	3415 LPM x 1.1; 0.7-5.1 kg/cm ²
GA-5300	BOMBA DE REPOSICION DE ACEITE DE CALENTAMIENTO 18 LPM x 1.1; 0.7-4.0 kg/cm ²	
GA-5702 A/R	BOMBA DE REGULACION DE ACEITE DE CALENTAMIENTO	3467 LPM x 1.1; 0.7-1.4 kg/cm ²

NOTAS:

- 1.- PRESION EN kg/cm² abs. TEMPERATURA EN °C.
- 2.- NORMALMENTE EN FLUJO.
- 3.- ACEITE TERMO CONTIENE 0-10 (PESO MOLECULAR PROMEDIO 715) G SIMLAR.
- 4.- LAS CARACTERÍSTICAS ESTAN DADAS POR UNIDAD EXCEPTO PARA LOS REGENERADORES EA-5451 AB, DONDE SU CARGA TERMICA INCLUYE LAS DOS UNIDADES.
- 5.- LOS DATOS INYELACION EN EL CUADRO DE BALANCE CORRESPONDEN A LA CAPACIDAD DE BOMBEO (ESTIMADA) DE LOS EQUIPOS INVOLUCRADOS EN EL SISTEMA.



02 No-01	D.E.P. SISTEMA DE COMPRESION DE GAS AMARCO	
02 No-02	D.F.P. PLANTA REGULADORA DE GAS AMARCO	
02 No-03	D.F.P. PLANTA REGULADORA DE GAS AMARCO	
02 No-04	D.F.P. SISTEMA DE DISTRIBUCION DE GAS COMBUSTIBLE	
02 No-05	BASES TECNICAS DE PLANTA POTABILIZADORA	

LILIANA LINARES HERNANDEZ

TESIS PROFESIONAL DE LICENCIATURA

UNAM

FACULTAD DE QUIMICA

DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO
SISTEMA DE ACEITE DE CALENTAMIENTO

PLATAFORMA DE COMPRESION

DIBUJOS DE REFERENCIA

DIBUJO No 07