



Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica



Dirección General de Educación Superior Tecnológica

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN.

TESIS

**“METODOLOGÍA Y SIMULACIÓN EN HYSYS DE
CONDENSADORES SUPERFICIALES DE AMONIACO”**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA ENERGETICA**

**PRESENTA:
ING. EVELYN JOAQUINA ARROYO MÉNDEZ**

**ASESOR
Dr. ROBERTO RAMÍREZ MESA.**



Minatitlán, Veracruz México, Enero del 2012

"2011, Año del Turismo en México"

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

OFICIO NUM. DEPI-164/2011.

Minatitlán, Ver., 2010-10-27

C. EVELYN JOAQUINA ARROYO MÉNDEZ
PRESENTE

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el Grado de MAESTRO EN INGENIERÍA en los Institutos Tecnológicos, y de conformidad con el H. Comité Revisor, es grato autorizarle la impresión de su Trabajo de Tesis Titulado:

"METODOLOGÍA Y SIMULACIÓN EN HYSYS EN CONDENSADORES SUPERFICIALES DE AMONIACO"

ATENTAMENTE

"POR LA INDEPENDENCIA TECNOLÓGICA DE MÉXICO"



ING. FLOR DE AZALIA LÓPEZ ROBLES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Boulevard Institutos Tecnológicos S/N, Col. Buena Vista Norte, C. P. 96848, Minatitlán, Veracruz
Teléfono (01 922) 22 243 45, 22 2 43 39, Fax 22 243 36, e-mail: dirección@itmina.edu.mx
<http://www.itmina.edu.mx>



ISO 9001:2008
SGS 199
Fecha de Terminación: 2010.08.22
Proceso Educativo

ISO 14001:2004
SGS 017
Fecha de Terminación: 2010.02.21
Asesoría, auditorías y certificaciones
Sistemas de gestión y calidad
Integrada en 2008

DEDICATORIA

DEDICATORIA.

A mis padres:

Guadalupe Méndez y Francisco Arroyo porque con cariño y confianza me apoyaron incondicionalmente desde el inicio de maestría hasta la culminación de éste trabajo.

A mi esposo Victor y a nuestra hija Ayari

A mis hermanas Mariely y Nuri

A mis amigos y compañeros que me compartieron conocimientos, y entusiasmo para lograr un objetivo tan anhelado: Arnulfo Hernández Aguilar, José Ángel Enríquez Arróniz, y muchos más que no menciono, pero que de igual manera son muy importantes.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS.

“Porque Dios da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia”

Gracias Dios mío por darme la gran oportunidad de vivir y escalar un peldaño profesional más.

Con gran afecto y admiración al Dr. Roberto Ramírez Mesa por compartirme parte de su vasto conocimiento, por ser un ejemplo viviente de que las barreras no existen cuando realmente se está sediento de éxito.

A todos los Catedráticos que con su experiencia en el mundo de la Energética permitieron obtener una visión extensa y racional del mismo.

RESUMEN

RESUMEN

El presente proyecto de tesis sirve para realizar el estudio del comportamiento de las superficies de transferencia de calor de condensadores de Amoniaco. Se realiza el ejemplo del condensador 127-C1 de la planta de Amoniaco No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque.

Técnicamente se determina la forma de afectación del coeficiente de ensuciamiento por el interior de los tubos por donde circula el agua de enfriamiento del equipo. Este trabajo se fundamenta en una investigación experimental que observa el comportamiento de los condensadores de amoniaco en los tiempos de operación antes y después de los mantenimientos realizados, tomando los datos del sistema de control distribuido con que es operada la planta.

Lo anterior servirá para determinar el modelo del comportamiento de la Transferencia de calor en las Superficies de los equipos en cuestión, mismo que servirá de base para establecer un simulador en HYSYS, y por consecuencia servirá de guía al personal de mantenimiento para establecer el Mantenimiento Proactivo de los equipos de las plantas de amoniaco.

Este proyecto se desarrolló durante la Maestría de Ingeniería Energética, iniciando en junio de 2010 y concluyéndose en el mes de junio de 2011.

El resultado es el simulador en HYSYS que permite visualizar el comportamiento del condensador de amoniaco, para visualizar como está afectando su nivel de limpieza a la operación y con esto determinar el mantenimiento en el momento justo.

ABSTRACT

ABSTRACT

This thesis serves to make the study of the behavior of heat transfer surfaces in Ammonia condenser in case of 127-C1 condenser en Ammonia Plant No. 6 Petrochemical Cosoleacaque complexity of the application, technically determines how involvement fouling coefficient inside the tubes through which the water cooling equipment. This work is based on experimental research that shows the behavior of ammonia condensers operating times before and after maintenance is performed, taking data from distributed control system which is operated the plant.

This will identify the behavioral model of heat transfer in the surfaces of the equipment in question, which will serve as a basis for establishing a HYSYS simulator, and therefore will guide the maintenance staff to establish the Proactive Maintenance teams of ammonia plants.

This project was developed during the Master of Energy Engineering, starting in January 2009 and completed in the month of December 2010.

The result is the HYSYS simulator to visualize the behavior of ammonia condenser, to see how it is affecting their level of cleanliness to the operation and maintenance determine this at the right time.

ÍNDICE

ÍNDICE

| CONTENIDO | Pág. |
|--|-------------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| RESUMEN | vi |
| ABSTRACT | viii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I. DESCRIPCION DEL COMPLEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE | 6 |
| 1.1 Antecedentes de la Empresa..... | 6 |
| 1.1.1 Antecedentes Históricos..... | 6 |
| 1.1.2 Marco Normativo..... | 9 |
| 1.2 Ubicación de la empresa..... | 15 |
| 1.3 Filosofía del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 15 |
| 1.4 Misión del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 16 |
| 1.5 Visión del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 17 |
| 1.6 Política de calidad del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 17 |
| 1.7 Productos fabricados del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 18 |
| 1.8 Evolución en Materia de calidad del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 19 |
| 1.9 Instalaciones..... | 20 |
| 1.10 Ubicación en el proceso del condensador de Amoniacó 127- C1en una planta de Amoniacó | 23 |
| 1.11 Evolución del Mantenimiento en el Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 1.12 Mantenimiento Correctivo..... | 26 |
| 1.13 Mantenimiento Preventivo..... | 26 |
| 1.14 Mantenimiento Predictivo..... | 27 |
| CAPITULO II ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO SOBRE TERMOECONOMÍA Y CAMBIADORES DE CALOR..... | 29 |
| 2.1 Análisis histórico..... | 29 |
| 2.2 Critica bibliográfica..... | 30 |
| 2.2.1 Balance de exergía y destrucción de exergía..... | 33 |
| 2.2.2 Eficiencia exergética y energética..... | 34 |
| 2.2.3 Fundamentos de termoeconomía. | 35 |
| 2.2.4 Costo de exergía..... | 37 |
| 2.2.5 Costos de exergía perdida..... | 40 |
| 2.2.6 Costo de exergía destruida..... | 41 |
| 2.2.7 Análisis del estado del arte y metodología propuesta..... | 42 |
| 2.2.7.1 Análisis económico..... | 43 |
| 2.2.7.2 Costos exergéticos en cambiadores de calor y calderas..... | 44 |
| 2.2.8 Análisis termoeconómico en cambiadores de calor y calderas..... | 50 |
| 2.3. Transmisión de calor..... | 54 |
| 2.4. Cambiadores de calor..... | 55 |
| 2.5. Objetivo de los cambiadores de calor..... | 55 |
| 2.6 Clasificación de los intercambiadores de calor..... | 56 |
| 2.7 Tipos de cambiadores de calor de acuerdo a su función..... | 57 |
| 2.7.1 Condensadores..... | 57 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.7.2 | Condensador parcial..... | 57 |
| 2.7.3 | Condensadores de eyector..... | 57 |
| 2.7.4 | Enfriadores..... | 58 |
| 2.7.5 | Evaporadores, rehervidores o recalentadores..... | 58 |
| 2.8 | Cambiadores de calor según su construcción..... | 58 |
| 2.8.1 | Intercambiadores de tubería doble..... | 58 |
| 2.8.2 | Intercambiadores de tipo placa..... | 59 |
| 2.8.3 | Intercambiadores de casco y tubo..... | 60 |
| 2.9 | Clasificación de intercambiadores casco y tubo..... | 63 |
| 2.9.1 | Intercambiador de cabezal flotante interno (tipo aes)..... | 64 |
| 2.9.2 | Intercambiador de lámina y tubo fijo (tipo bem)..... | 64 |
| 2.9.3 | Intercambiador de cabezal flotante exterior (tipo aep)..... | 65 |
| 2.9.4 | Intercambiador de cabezal y tubos integrados (tipo cfu)..... | 65 |
| 2.9.5 | Rehervidor de caldera (tipo akt)..... | 65 |
| 2.9.6 | Condensador de flujo dividido (tipo ajw)..... | 66 |
| 2.10 | Descripción de partes..... | 66 |
| 2.10.1 | Cuerpo (o carcaza)..... | 66 |
| 2.10.2 | Haz de tubos (fluxería)..... | 67 |
| 2.10.3 | Arreglo de tubos..... | 68 |
| 2.10.3.1 | Espejos..... | 69 |
| 2.10.4 | Deflectores o mamparas..... | 70 |
| 2.10.5 | Cabezales..... | 70 |
| 2.10.6 | Tirantes y espaciadores..... | 71 |

| | |
|--|-----------|
| 2.10.7 Placas de choque..... | 71 |
| 2.10.8 Placas partidoras de pasos (deflectores divisores de pasos)..... | 71 |
| 2.10.9 Bridas..... | 71 |
| 2.10.10 Boquillas..... | 72 |
| 2.10.11 Juntas (empaques)..... | 72 |
| 2.10.12 Espárragos..... | 73 |
| 2.11 Definición de mantenimiento..... | 73 |
| 2.12 Objetivo del mantenimiento..... | 73 |
| 2.13 Actividades del mantenimiento..... | 73 |
| 2.14 Fuentes que originan fallas en el equipo..... | 75 |
| 2.15 Clasificación de mantenimiento..... | 75 |
| 2.16 Mantenimiento predictivo..... | 76 |
| 2.17 Bases para establecer el mantenimiento predictivo..... | 76 |
| 2.18 Mantenimiento preventivo..... | 78 |
| 2.19 Mantenimiento correctivo..... | 78 |
| 2.20 Secuencia del desarmado de un cambiador de calor en las plantas de proceso..... | 81 |
| CAPITULO III.- METODOLOGIA PARA ESTUDIAR EL ENSUCIAMIENTO EN LOS CONDENSADORES DE AMONIACO..... | 85 |
| 3.1 Análisis de la limpieza de los condensadores de amoniaco..... | 85 |
| 3.2 Alcance de la metodología para el estudio del ensuciamiento del cambiador de calor 127-c1..... | 86 |
| 3.3 Selección de datos de las variables para determinar el ensuciamiento de cambiadores de calor 127-c1..... | 87 |
| 3.4 Determinación de las muestras..... | 88 |

| | |
|---|------------|
| 3.5 Caracterización de los fluidos del condensador de amoniaco 127-c1..... | 90 |
| 3.6 Caracterización de los fluidos del condensador de amoniaco 127-c1... | 90 |
| 3.7 Evaluación térmica del condensador de amoniaco..... | 90 |
| 3.8 Incrementos de temperatura..... | 91 |
| 3.9 Corrección de temperatura por efecto de la viscosidad..... | 92 |
| 3.9.1 Masa velocidad..... | 92 |
| 3.10 Evaluación de la transferencia de calor del condensador de amoniaco..... | 93 |
| 3.11 Determinar el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor..... | 94 |
| 3.12 Determinar el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor..... | 94 |
| 3.13 Análisis de datos de las variables para determinar el ensuciamiento... | 94 |
| 3.14 Análisis de datos de las variables para determinar el ensuciamiento... | 95 |
| 3.15 Antecedentes del condensador de la planta N° 6 de amoniaco..... | 96 |
| CAPITULO IV.- RESPUESTAS DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 99 |
| 4.1 Análisis del Condensador de Amoniaco 127-C1 en Hysys..... | 99 |
| CONCLUSIONES..... | 108 |
| RECOMENDACIONES..... | 110 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 112 |
| ÍNDICE FIGURAS | |
| Figura 1.1 Localización de los Complejos Petroquímicos de la Subsidiaria de Pemex Petroquímica..... | 15 |
| Figura 1.2 Localización geográfica del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 16 |

| | |
|--|-----|
| Figura 1.3 Distribución de las Instalaciones del Complejo Petroquímico Cosoleacaque..... | 21 |
| Figura 1.4 Etapas principales del proceso de fabricación del Amoniaco. | 22 |
| Figura 1.5 Ubicación de los condensadores de Amoniaco en la sección de Refrigeración..... | 24 |
| Figura 2.1 Diagrama de Generador de Vapor | 47 |
| Figura 2.2 Curvas características de evolución de temperaturas en intercambiadores..... | 59 |
| Figura 2.3 Cambiador de Tipo Placa | 60 |
| Figura 2.4 Cambiadores de Casco y Tubo | 62 |
| Figura 2.5 Intercambiador Tipo BEM..... | 64 |
| Figura 2.6 Intercambiador Tipo AEP..... | 65 |
| Figura 2.7 Intercambiador Tipo CFU..... | 65 |
| Figura 2.8 Intercambiador Tipo AKT..... | 66 |
| Figura 2.9 Intercambiador Tipo AJW..... | 66 |
| Figura 3.1 Comportamiento esperado de las intervenciones de Mantenimiento actual en los Condensadores de Amoniaco..... | 85 |
| Figura 3.2 Media Logarítmica de la diferencia de temperatura con Flujos Contracorriente..... | 92 |
| Figura 3.3 Media Logarítmica de la diferencia de temperatura con Flujos Paralelos..... | 92 |
| Figura 3.4 Secuencia de los flujos de los condensadores de amoniaco 127-C1 y 127C2..... | 97 |
| Figura 4.1 Pantalla de las Conexiones de las corrientes del condensador de NH ₃ | 100 |
| Figura 4.2 Pantallas de la distribución de corrientes en el condensador de NH ₃ | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.3 Pantalla de los datos de las corrientes del condensador de NH3 | 101 |
| Figura 4.4 Pantalla de los datos de las composiciones de las corrientes del condensador de NH3..... | 101 |
| Figura 4.5 Pantalla de resultados globales del cálculo del condensador de NH3 para fouling nulo..... | 102 |
| Figura 4.6 Resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado coraza..... | 102 |
| Figura 4.7 Resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado tubo..... | 103 |
| Figura 4.8 Pantalla de resultados de propiedades de las corrientes del condensador de NH3..... | 103 |
| Figura 4.9 Pantalla de los resultados globales del condensador de NH3..... | 104 |
| Figura 4.10 Gráfico de temperaturas contra el flujo de calor de las corrientes del condensador de NH3..... | 104 |
| Figura 4.11 Dependencia de la temperatura de salida del agua en el condensador con respecto al fouling por el interior de los tubos..... | 105 |
| Figura 4.12 Dependencia de UA con respecto al fouling por el interior de los tubos. | 106 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla I.1Declaración de variables del Proyecto | 3 |
| Tabla 1.1 Capacidad Instalada de producción de Amoniaco del Complejo petroquímico Cosoleacaque..... | 13 |
| Tabla 1.2 Certificaciones de 1996 al 2006. | 20 |
| Tabla 3.1Declaración de variables independientes para el condensador de Amoniaco 127-C1 de la Planta de Amoniaco No. 6..... | 87 |
| Tabla 4.1 Resultados de evaluación de cambiador a diferentes fouling y temperaturas | 105 |

Nomenclatura

\dot{E}^W : exergía del trabajo transferido

\dot{E}^Q : energía asociada al calor transferido

\dot{C}_{ptot} : costos asociados con los productos del sistema

\dot{C}_f : costos de combustible

\dot{Z}^{CI} : costos asociados a los capitales invertidos

\dot{Z}^{OM} : costos de operación y mantenimiento

\dot{Z} : suma de costos de operación y mantenimiento más costos de capital invertido.

\dot{C} : rango de costo asociado con el flujo de exergía

\dot{E}_i : exergía transferida

W : potencia

\dot{E}_q : exergía asociada al calor transferido

\dot{E}_{LK} : exergía perdida

\dot{E}_{FK} : exergía destruida

\dot{E}_f : flujos de exergía utilizados para producción

\dot{E}_p : Flujo de exergía resultante del sistema

\dot{Z}_i : Gastos operativos para la producción del sistema

$\sum C_{e,k}$: Costos de las corrientes que salen del sistema

$\sum C_{i,k}$: Costos de las corrientes

$\eta_{\text{exergetica}}$: eficiencia exergética

\dot{W} : exergía asociada a la potencia

n' : Tamaño provisional de la Muestra

N : Tamaño de la Población

V^2 : Varianza de la Población

$Q_{\text{Amoníaco}}$: Capacidad calórica del amoniaco

m : Flujo másico del Amoníaco

C_p : Calor Especifico del Amoníaco

T_{Entrada} : Temperatura Entrada del Fluido, fluido caliente

T_{Salida} : Temperatura Salida del Fluido, fluido caliente

ΔT : Diferencial de Temperatura

Q_{Agua} : Capacidad calórica del agua

MDLT : Media Logarítmica de la diferencia de temperatura

F_T : Factor de corrección por temperatura

G_s : Masa Velocidad para lado cuerpo o coraza

W : Flujo másico del fluido

a_s : Área transversal de flujo del Cuerpo o coraza

G_t : Masa Velocidad para lado tubos

G_t : Masa Velocidad para lado tubos

h_0 : Coeficiente de transferencia de calor del Fluido Exterior

j_H : Factor de Transparencia de calor

k : Conductividad Térmica

D_e : Diámetro Interno del Cuerpo

C_p : Flujo másico del fluido

μ : Viscosidad a Temperatura Calórica

μ_w : Viscosidad a Temperatura Calórica de la Pared del Tubo

U_c : Coeficiente Limpio de transferencia de calor

h_{i0} : Valor de h_o cuando está referido al Diámetro Exterior

h_o : Coeficiente de Transferencia de calor de ext. del Tubo

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Plantear una metodología que permita realizar el estudio termo económico y de la transferencia de calor del Condensador de Amoniaco con identificación 127-C1, de la Planta de Amoniaco No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque, basado a los parámetros de las condiciones de operación y propiedades físicas de los fluidos; con la finalidad de determinar con métodos matemáticos asociados a la transferencia de calor y de esta manera alcanzar un aprovechamiento de la temperatura de los fluidos que circulan por su interior. Lo anterior servirá de base para establecer técnicamente el momento más oportuno para la realización del Mantenimiento Preventivo o bien en otro de los casos determinar en qué tiempo deben ser sustituidos la fluxería (tubería), o más aún en qué momento se debe cambiar el equipo completo.

Determinar esos criterios oportunamente, permitirá al proceso de esta planta evitar paros imprevistos y/o incrementos de presión en el sistema de refrigeración y por consecuencia minimizar las afectaciones negativas a los índices energéticos, lo anterior por fallas de estos equipos. Además se podrá determinar de manera más científica el momento más oportuno para aprovechar al máximo las corridas operativas de los condensadores de Amoniaco, donde el resultado refleje los costos favorables para el proceso de producción de Amoniaco.

Las variables de investigación serán el coeficiente de ensuciamiento, la temperatura de salida de Amoniaco, la presión de salida del Amoniaco y el flujo de agua de enfriamiento, que servirán para estudiar su correlación durante su operación en los condensadores de Amoniaco. Los datos a estudiar se tomaran del sistema de control distribuido excepto el dato del flujo de agua de enfriamiento que se tomara de la bitácora.

Se espera obtener un modelo matemático que sirva de base para crear un simulador que permita el personal de mantenimiento determinar su comportamiento en el tiempo y de esa manera establecer los mejores tiempos de intervención de mantenimiento.

Si se logra establecer los Mantenimientos Preventivos Basados en Condiciones para efectuar un mantenimiento Proactivo en el Condensador de

Amoniaco 127-C1 permitirá replicar este criterio a intercambiadores de calor de las otras plantas de Amoniaco.

Dada la apertura de mercados, resulta indispensable alcanzar valores en los índices energéticos que superen los alcanzados históricamente o bien mantener durante más tiempo los establecidos por el diseño de la Planta de Amoniaco No. 6, del Complejo Petroquímico Cosoleacaque, con la decidida actitud de mejorar o minimizar los costos de producción que apuntalen la competitividad del producto y este alcance niveles de competitividad en el mercado nacional e internacional, ya que actualmente las plantas modernas operan con índices energéticos por debajo de los valores de procesos de tecnología pasada en rangos de alrededor de un tercio de su valor numérico, motivo por el cual es necesario aprovechar el mayor tiempo de operación continua programada de la planta.

Es obvio que la salida imprevista genera venteo de fluidos controlados a la atmósfera, y reduciendo estos eventos se lograra impactar menos en la contaminación del medio ambiente, además que se estará dejando de consumir gas natural (recurso natural no renovable) que no produce ningún beneficio al hombre. Y como el centro de productor de Amoniaco actualmente se encuentra circundado por una cantidad considerable de pobladores, se debe tener más en cuenta su servicio para evitar impactos negativos a este sector de la población.

Debemos tomar en cuenta que por cada paro imprevisto o no programado de la Planta de Amoniaco No. 6 originado por este tipo de fallas, trae como consecuencia tener un gasto adicional de alrededor de \$ 3'225,600.00 y al cual debemos sumar al menos 5 días por intervención de mantenimiento en donde la planta deja de producir, incrementando aún más las pérdidas. El reducir o eliminar esta problemática nos llevaría al ahorro de la suma indicada anteriormente tan solo por evitar estos tipos de eventos, y por el contrario se planearía de manera más acertada los compromisos de la entrega del amoniaco.

También debemos mencionar que si este equipo no realiza su función correctamente provoca que la producción de amoniaco no sea la esperada por el diseño, lo que afectaría al índice energético de la planta de Amoniaco No. 6, por que se estaría utilizando los mismos recursos de combustible para tratar de producir lo de

diseño pero que realmente no se estaría alcanzando. Por consiguiente esto estaría incidiendo en la productividad de la planta y en la del centro de trabajo.

El objetivo del proyecto es el de Estudiar el comportamiento de la transferencia de calor del Condensador de Amoniaco 127-C1 de una planta de Amoniaco, a partir de las variables controladas pasivas, con la finalidad de encontrar los tiempos óptimos de operación y de esta manera determinar el momento idóneo para aplicarle los servicios de mantenimiento.

Los objetivos particulares que se pretenden en este proyecto son:

1. Caracterizar la influencia del ensuciamiento de lado agua de enfriamiento en la superficie de los tubos rectos en el condensador de amoniaco 127-C1, a partir de las variables controladas pasivas.
2. La aprobación del proyecto mediante la implantación del simulador para el personal que realiza labores de mantenimiento.

El estudio se realiza en el Cambiador de Calor denominado Condensador de Amoniaco 127-C1 de la sección de Refrigeración de la planta de Amoniaco No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque; además tienen su principio de operación contracorriente y se encuentran dispuestos para operar en serie, y para llevar a cabo este estudio se declaran las siguientes variables:

Tabla I.1Declaración de variables del Proyecto.

| VARIABLE DE ESTUDIO | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL |
|-------------------------------------|-----------------------|--|
| Coeficiente de ensuciamiento | Adimensional. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta variable se calcula en base a los parámetros operacionales del condensador de amoniaco 127-C1. ▪ Identificar el comportamiento del condensador a partir del decremento del gradiente de temperatura de lado de agua de enfriamiento. |
| Temperatura de Salida del Amoniaco. | Grados Celsius. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Correlacionar el incremento de temperatura del lado de Amoniaco respecto a la variación del gradiente de temperatura, lado agua de enfriamiento. |

| VARIABLE DE ESTUDIO | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL |
|---|-----------------------|--|
| Presión de Salida del Amoniaco. | Grados Celsius. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Correlacionar el incremento de presión del lado de Amoniaco respecto a la variación del gradiente de temperatura de lado agua de enfriamiento. |
| Flujo del Agua de enfriamiento. | m3/hr | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcular en base a los parámetros operacionales del condensador de amoniaco 127-C1. |
| Temperatura de Salida de Agua de enfriamiento | Grados Celsius. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Correlacionar el incremento de temperatura del lado de Agua de enfriamiento respecto a la variación del gradiente de temperatura lado de Amoniaco. |
| Presión de Salida del Amoniaco. | Grados Celsius. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Correlacionar el incremento de presión del lado de Agua de enfriamiento respecto a la variación del gradiente de temperatura de lado de Amoniaco. |
| Tiempo. | horas. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificar la frecuencia optima de la aplicación de mantenimiento del condensador de amoniaco 127-C1 |

CAPÍTULO I

CAPITULO I.- DESCRIPCION DEL COMPLEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

La información que a continuación se presenta, se obtuvo de intranet disponible del Complejo Petroquímico Cosoleacaque²³

1.1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Esta dependencia inició sus operaciones en el año de 1962, con una pequeña planta con capacidad para producir 200 toneladas diarias.

La Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de julio de 1992, crea entre otros a Pemex Petroquímica como un organismo descentralizado de carácter técnico, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propio, responsable de llevar a cabo los procesos petroquímicos, cuyos productos no forman parte de la petroquímica básica, así como su almacenamiento, distribución y comercialización.

El Director General de Pemex Petroquímica, sometió a la consideración del H. Consejo de Administración de dicho organismo subsidiario, en su sesión celebrada el 8 de noviembre de 1996, la creación de 10 Empresas filiales, conformadas por cada uno de los centros de trabajo; dicha propuesta fue aprobada, acordándose elevarla a consideración del Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos.

El H. Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos, en uso de las facultades y atribuciones que le otorga su Ley Orgánica, en sesión extraordinaria del 13 de Diciembre de 1996 aprobó la Nueva Estrategia para la Industria Petroquímica y las acciones a adoptar para su implementación, autorizando a Petróleos Mexicanos y a Pemex Petroquímica para llevar a cabo todos los actos jurídicos y administrativos que se requieran, tanto por lo que se refiere a la desincorporación de bienes del dominio público, como aquellos actos vinculados con las relaciones jurídico-laborales en lo que le corresponde.

Derivado de la implantación de la Nueva Estrategia para la industria Petroquímica, Pemex Petroquímica constituyó Empresas Filiales de participación estatal mayoritaria tomando como base los activos de las plantas petroquímicas dedicadas exclusivamente a la producción de petroquímicos no básicos.

La implantación de la nueva estrategia, implicó una trascendental reforma jurídico administrativa de Pemex Petroquímica, que le llevó a constituir en Empresas filiales los Complejos y Unidades Petroquímicas del Organismo, lo cual originó un importante ajuste de sus estructuras funcionales, de plazas y personal, ya que con este motivo Pemex Petroquímica transfirió las funciones que se encontraban centralizadas, así como los recursos humanos asociados al desarrollo de las mismas, con el propósito de fortalecer las estructuras de las Empresas filiales constituidas para que respondiesen a las necesidades presentes y futuras.

Con tal motivo y mediante Escritura Pública N° 36611 del 30 de Enero de 1997, emitida por la Notaría Número 111 del Distrito Federal, se hizo constar que la Empresa Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V., es una Sociedad Anónima de Capital Variable de participación estatal mayoritaria filial de Pemex Petroquímica.

Por otra parte para llevar a cabo la estrategia Comercial de Pemex Petroquímica que establece la modificación de la estructura de organización de las empresas filiales y la transferencia de funciones de la Subdirección Comercial de las de las empresas filiales a la Subdirección Comercial de Pemex Petroquímica., la empresa Petroquímica Cosoleacaque S.A. De C.V., mediante acuerdo DG-A-007/2002, de fecha 27 de diciembre del 2002, autorizó la transferencia de plazas y personal de confianza de sus áreas comerciales a las oficinas de Pemex Petroquímica.

Posteriormente Pemex Petroquímica en cumplimiento a la estrategia jurídica emitida por Petróleos Mexicanos, para lograr la conducción central y la dirección estratégica de la Industria petrolera, lleva a cabo la transferencia de las funciones y recursos de la Unidad Jurídica adscritas a sus empresas filiales al Corporativo de Petróleos Mexicanos, misma que modifica la estructura organizacional de las empresas filiales de Pemex Petroquímica.

Por tal motivo la empresa Petroquímica Cosoleacaque S.A. De C.V., mediante el acuerdo Núm. DG-A-003/2003, autorizó la transferencia de recursos humanos, así como la prestación de servicios generales de Petroquímica Cosoleacaque S.A. de C.V., a la oficina del abogado general.

Más adelante Pemex Petroquímica a través de un nuevo esquema de funcionamiento establece la centralización de las responsabilidades funcionales y

operativas de las áreas de Planeación y Desarrollo, Tecnología de la Información, de Control de Gestión y de la Subdirección de Administración y Finanzas dependientes de la estructura básica de las Empresas filiales, así como de los recursos materiales, informáticos, financieros y presupuéstales asociados a estas.

En este sentido Petroquímica Cosoleacaque S.A. de C.V. Mediante los Acuerdos DG-A-007/2003, DG-A-003/2004, y DG-A-004/2004, modifíco su estructura básica, relativo a la transferencia de las funciones y recursos de la Subdirección de Planeación y Desarrollo, de la Unidad de Tecnología de Información, de la Unidad de Control de Gestión y de la Subdirección de Administración y Finanzas, a oficinas centrales de Pemex Petroquímica respectivamente.

El consejo de Administración de Petróleos Mexicanos mediante Acuerdo CA-379/2002 aprobó el esquema de fusión para consolidar a Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V; en Pemex Petroquímica.

Debido al considerable avance del proceso de fusión, se estimo conveniente reestructurar Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V.; para que opere bajo un esquema que contemple únicamente funciones sustantivas orientadas a la producción, y las funciones y recursos de la Subdirección de Administración y Finanzas se centralicen en Pemex Petroquímica, para que se cumpla con las estrategias del esquema de centralización.

Mediante Acuerdo CO-2004-XXXIX-MA-013, del Consejo de Administración de Petroquímica Cosoleacaque, S.A. De C.V.; autorizó iniciar los trámites necesarios para transferir las responsabilidades, funciones, plazas definitivas de confianza y sus titulares de la Subdirección de Administración y Finanzas a las Oficinas Centrales de Pemex Petroquímica, e instruyo para celebrar un convenio de colaboración, para que las áreas de la Subdirección de Administración y Finanzas de Pemex Petroquímica asuman la responsabilidad funcional y operativa en esta materia.

Petroquímica se clasifico a las Empresas Filiales en tipo "A" y "B", asimismo, se autorizó la Macro-Estructura de las filiales, quedando Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V.; Clasificada como Empresa Filial Tipo "B" y su estructura propuesta quedará conformada con una Dirección General, y cuatro

Superintendentes: Producción; Mantenimiento; Servicios Técnicos; y de Calidad, Seguridad Industrial y Protección Ambiental.

Mediante acuerdo CO-2004-XL-MY-032, el Consejo de Administración de Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V; autorizo la Macro Estructura de la filial, así como integrar conjuntamente con Pemex Petroquímica los recursos humanos, financieros y presupuestales de las áreas de la Dirección General; Subdirección de Administración y Finanzas y Auditoría de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, para definir la estructura Orgánico-ocupacional de la Empresa Filial, la cual se orienta bajo un esquema tendiente al proceso de fusión del Organismo.

1.1.2 MARCO NORMATIVO

Dentro de este marco, se presenta una relación de los principales ordenamientos jurídicos, de los cuales se derivan las atribuciones de las Oficinas Centrales de Pemex Petroquímica, así como de las disposiciones administrativas de carácter normativo externo e interno que regulan su funcionamiento.

NIVEL EXTERNO

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

EL artículo 27 constitucional establece el dominio que ejerce la Nación sobre los recursos naturales incluyendo el petróleo y todos los carburos de hidrógeno, sólidos, líquidos y gaseosos, e indica además que tratándose de estos materiales no se otorgarán concesiones ni contratos.

Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo del petróleo. (D.O.F. 29-11-58)

Expresa en sus artículos 2º, 3º y 4º la exclusividad del Estado, por conducto de Petróleos Mexicanos, sobre la exploración y explotación del petróleo y sus derivados susceptibles de servir como materias industriales básicas.

Reglamento de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 constitucional en el Ramo del Petróleo en Materia Petroquímica. (D.O.F.09-02-71).

Este reglamento divide a la industria petroquímica en dos grandes áreas: La industria petroquímica reservada al Estado a través de Pemex, y la industria petroquímica secundaria, abierta a la inversión privada, con un máximo 40% al capital extranjero.

El reglamento menciona también la creación de la Comisión Petroquímica Mexicana, hoy llamada Comisión Nacional de Petróleo, Gas y Petroquímica, que tiene entre sus funciones la de auxiliar a la Secretaría de Energía, en la determinación de los productos que deben quedar dentro del campo exclusivo de la nación o reservados a ésta, en asociación con sociedades integradas totalmente por mexicanos, así como opinar sobre solicitudes de permisos para elaborar productos petroquímicos.

Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios y su Reglamento. (D.O.F.16-07-92)

Establece que deberán ser clasificados como petroquímicos secundarios los productos, cuya elaboración requiere de permiso por parte de la Secretaría de Energía, previa opinión de la Comisión Nacional de Petróleo, Gas y Petroquímica.

- | | | | |
|--------------|----------------|----------------|-------------|
| 1. ACETILENO | 5. BUTILENOS | 9. ORTOXILENO | 13. XILENOS |
| 2. AMONIACO | 6. ETILENO | 10. PARAXILENO | |
| 3. BENCENO | 7. METANOL | 11. PROPILENO | |
| 4. BUTADIENO | 8. N-PARAFINAS | 12. TOLUENO | |

Establece también que los productos no clasificados como petroquímicos básicos ni como petroquímicos secundarios, quedan desregulados y podrán ser elaborados indistintamente por los sectores privados, social o público, requiriendo únicamente de registro ante la Secretaría de Energía, a través de la Comisión Nacional de Petróleo, Gas y Petroquímica.

Nueva estrategia para la industria Petroquímica. (D.O.F.13-10-96).

Su objetivo es acelerar el ritmo de expansión de la capacidad productiva de la industria Petroquímica, procurando la concurrencia armónica de inversiones del sector público y de los particulares, tanto Nacionales como Extranjeros.

Decreto por el que se reforma la Ley Reglamentaria del artículo 27 Constitucional en el Ramo Petrolero. (D.O.F.13-11-96)

Se identifican los petroquímicos Básicos a fin de dar certidumbre Jurídica al propio Petróleos Mexicanos y a los inversionistas particulares interesados en la Petroquímica no Básica.

Sesión Extraordinaria del Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos.

(D.O.F.13-1-96)

Presentación al Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos de la Nueva Estrategia para la Industria Petroquímica y acciones que compete adoptar a este órgano de Gobierno.

Constitución de Empresas Filiales de Pemex Petroquímica. (D.O.F.30-01-97)

Decreto por el que se desincorporan del dominio público de la federación, los inmuebles y las plantas o unidades industriales de:

1. Camargo, Chihuahua
2. Cosoleacaque, Ver., y San Fernando, Tamaulipas
3. Tula, Hidalgo
4. Escolín (Poza Rica) y Coatzintla, Ver.
5. Constitución de Empresas Filiales de Pemex-Petroquímica. (D.O.28-02-97)
6. Morelos, Ver.,
7. La Cangrejera, Ver., (Chapopote, Ver.)

Y se autoriza al Organismo Pemex Petroquímica para aportarlos al capital social de las Empresas de participación estatal mayoritaria que se constituyen en los términos de la Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.

Testimonio de la escritura que contiene el Contrato de Sociedad de Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V., que otorgan Pemex Petroquímica y Pemex.

Convenio de sustitución patronal. (28-02-97)

Condiciones de trato al personal que integrará las nuevas Empresas Filiales.

Contrato Colectivo de Trabajo con las Empresas Filiales (D.O.F.19-03-97)

Depósito ante la Junta Federal de Conciliación y Arbitraje el Contrato Colectivo de Trabajo de seis Empresas, constituidas: Cosoleacaque, Ver., Tula, Hidalgo., Escolín, Ver., Camargo, Chihuahua, Cangrejera, Ver., y Morelos, Ver.,
Ley Federal del Trabajo.

Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

Ley Federal de las Entidades Paraestatales y su Reglamento.

Ley de Presupuesto, Contabilidad y Gasto Público Federal y su Reglamento.

Manual de Normas para el Ejercicio del Gasto en la Administración Pública Federal.

Manual de Normas Presupuestarias para la Administración Pública Federal vigentes para el 2004.

Programa de Desarrollo y Reestructuración del Sector Energía.

Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal correspondiente.

Acuerdo que establece las disposiciones de Productividad, Ahorro,

Transparencia y Desregulación Presupuestaria en la Administración Pública Federal para el ejercicio fiscal.

Estrategia Comercial de Pemex Petroquímica que establece la modificación de la estructura de organización de las empresas filiales y la transferencia de funciones de la Subdirección Comercial de las empresas filiales a la Subdirección comercial de Pemex Petroquímica.

Estrategia Jurídica de Petróleos Mexicanos que establece la transferencia de funciones de la Unidad Jurídica de las empresas filiales al Corporativo de Petróleos Mexicanos.

Estrategia de centralización y nuevo esquema de funcionamiento de Pemex Petroquímica, relativo a la concentración en sus oficinas centrales; de las funciones y recursos de las áreas de la Subdirección de Planeación y Desarrollo, Tecnología de la Información, Control de Gestión y de la Subdirección de Administración y Finanzas dependientes de la estructura básica de las Empresas filiales.

NIVEL INTERNO

Contrato Colectivo de Trabajo.

Reglamento de Trabajo del Personal de Confianza de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.

Desde 1959 hasta la creación de las empresas filiales de la Subsidiaria Pemex Petroquímica el Estado Mexicano mantiene el control de la rama de la industria petroquímica secundaria. En octubre de 1992 se acuerda aprobar el paquete de desincorporación de 19 de las 61 plantas de la petroquímica secundaria. En septiembre de 1995 se resuelve solicitar la expedición de lineamientos integrales para desincorporar los activos petroquímicos del organismo, autorizándose en octubre del mismo año la realización de los trámites correspondientes. Noviembre de

1996, se inicia la constitución de las empresas filiales de Pemex Petroquímica. Y a partir del 1° de Febrero de 1997 se constituye PETROQUÍMICA COSOLEACAQUE, S.A. DE C.V., con los activos del Complejo Petroquímico Cosoleacaque de Petróleos Mexicanos. A partir del 1° de Mayo de 2006 derivado de las nuevas estrategias de las políticas públicas y debido al fracaso del intento de la venta de la Petroquímica se regresa al esquema de formar parte de la Subsidiaria de Pemex Petroquímica dependiente de Petróleos Mexicanos. Esto también afecto a los otros centros de trabajo de la misma manera, como lo fueron Petroquímica Cangrejera, S.A. de C.V., Petroquímica Escolín, S.A. de C.V., Petroquímica Morelos, S.A. de C.V.,; Petroquímica Pajaritos, S.A. de C.V. y Petroquímica Tula, S.A. de C.V.

El ahora COMPLEJO PETROQUÍMICO COSOLEACAQUE se desarrolló principalmente como un centro productor de amoniaco debido a la necesidad apremiante de satisfacer la demanda interna de fertilizantes para fortalecer la producción agrícola del país. Inició sus operaciones en el año de 1962, con una pequeña planta de 60,000 toneladas anuales de amoniaco. Oficialmente el Complejo Petroquímico fue inaugurado en marzo de 1968 al entrar en servicio la planta de amoniaco II. Ya para el año 2004 se tenía una capacidad instalada de 2, 080, 000 toneladas anuales de producción de amoniaco.

Tabla 1.1 Capacidad Instalada de producción de Amoniaco del Complejo petroquímico Cosoleacaque.

| PLANTA | CAPACIDAD ANTERIOR TON/AÑO (ANTES DE 2004) | CAPACIDAD MODIFICADA TON/AÑO (RETROFIT/REVAMP) | CAPACIDAD AUMENTADA TON/AÑO | % CAPACIDAD AUMENTADA TON/AÑO |
|----------------|---|---|------------------------------------|--------------------------------------|
| Amoniaco 3 | 300,000 | 300,000 | ----- | ----- |
| Amoniaco 4 | 445,000 | 478,500 | 33,500 | 7.53% |
| Amoniaco 5 | 445,000 | 478,500 | 33,500 | 7.53% |
| Amoniaco 6 | 445,000 | 478,500 | 33,500 | 7.53% |
| Amoniaco 7 | 445,000 | 478,500 | 33,500 | 7.53% |
| TOTALES | 2,080,000 | 2,214,000 | 134,000 | 6.44% |

Actualmente se tiene en proceso las modificaciones de equipos dinámicos del sistema de agua de enfriamiento para incrementar el flujo de agua de enfriamiento, y además se instala equipo de bombeo de mayor capacidad en el área de purificación, en ambos casos para complementar las acciones planteadas en los retrofits y revamps instalados en el proceso; para mejorar la producción hasta alcanzar el 20% de la producción de diseño. Por lo que se refiere a los cambios ya realizados se han obtenido mejoras de hasta el 5% en el índice energético de las plantas que han tenido corridas en los últimos años.

Esta situación ha sido afectada por la evolución y competitividad que ha tenido la industria del Amoniaco con el proceso fabricación de los fertilizantes y que han afectado directamente a, Complejo Petroquímico Cosoleacaque, al grado que solo se opera con 1.5 planta de Amoniaco por año y en algunos casos hasta una cifra menor a esta. Se debe contemplar que en la actualidad el centro de trabajo forma parte de la Subsidiaria PEMEX PETROQUÍMICA, la cual está integrado por los diferentes centros petroquímicos:

1. Oficinas Administrativas Corporativas
2. Complejos Petroquímicos:
3. Cangrejera (En Coatzacoalcos, Ver.).
4. Cosoleacaque (En Cosoleacaque, Ver.).
5. Escolín (En Poza Rica, Ver.).
6. Independencia (En San Martín Texmelucan, Puebla.).
7. Morelos (En Coatzacoalcos, Ver.).
8. Pajaritos. (En Coatzacoalcos, Ver.).
9. Tula (En Hidalgo, Hgo.).

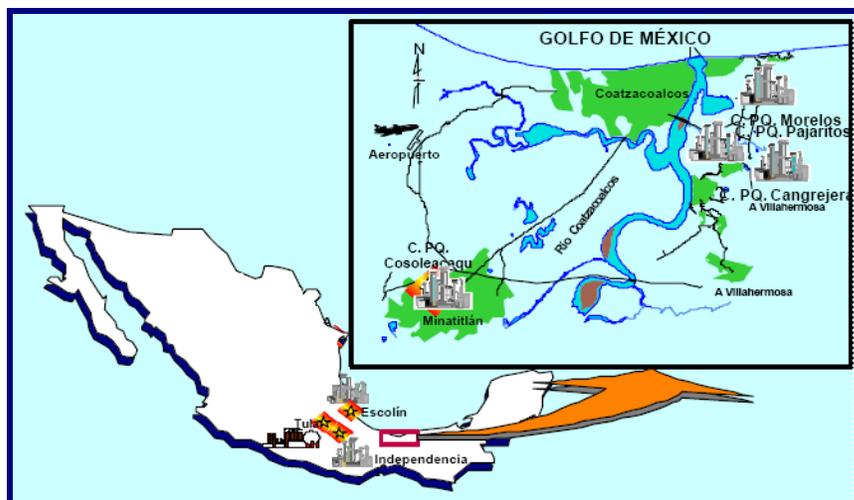


Figura 1.1 Localización de los Complejos Petroquímicos de la Subsidiaria de Pemex Petroquímica.

1.2 UBICACIÓN DE LA EMPRESA

El proyecto se desarrollará en las instalaciones del Complejo Petroquímico Cosoleacaque., en la planta de Amoniaco No. 6 del licenciador The M. W. Kellogg Company.

1.3 FILOSOFIA DEL COMPEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

El complejo como integrante de la Subsidiaria de Pemex Petroquímica, se abriga en los planteamientos estratégicos que se establecen a nivel corporativo, partiendo de los objetivos nacionales, estrategias y prioridades contenidas en el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006, así como en los programas sectoriales,

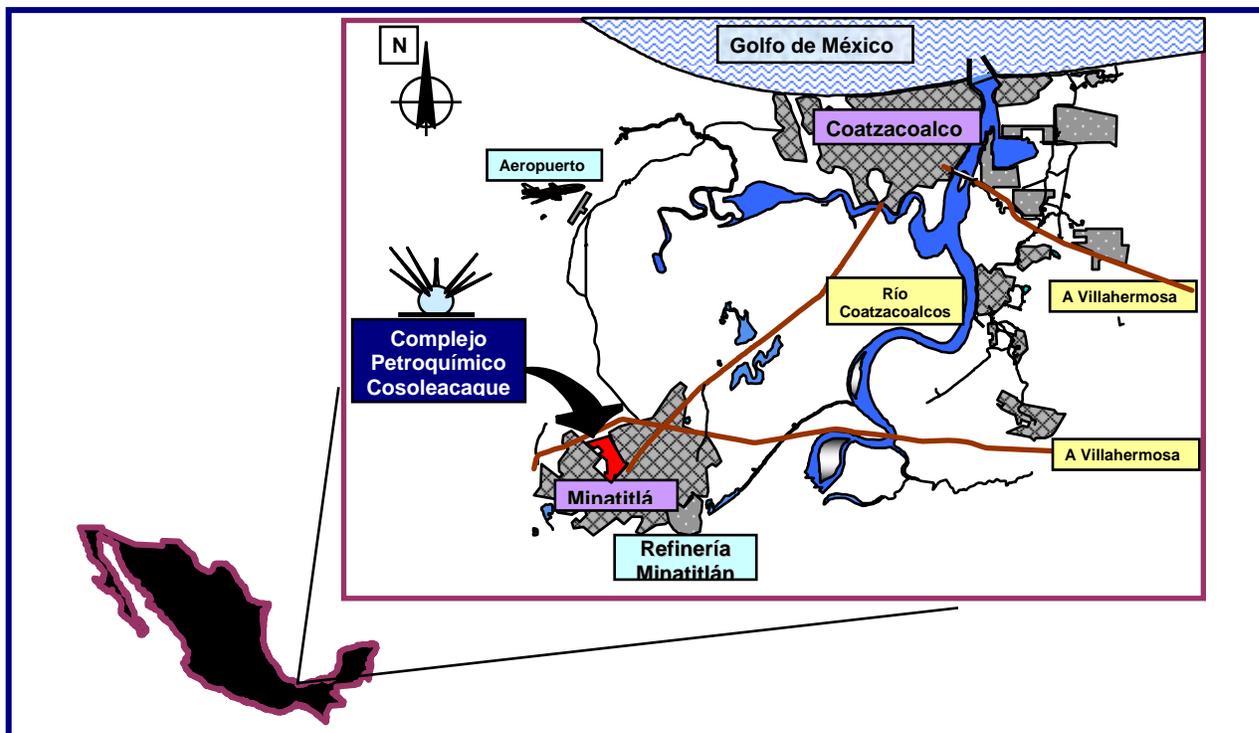


Figura 1.2 Localización geográfica del Complejo Petroquímico Cosoleacaque.

Institucionales, regionales y especiales que de él se desprenden, como el Programa Sectorial de Energía 2001-2006. La alineación estratégica nos permitirá conocer el rumbo de la Organización y servirá como base para la toma de decisiones y además cumple con las necesidades y/o requerimientos de los grupos de interés (clientes, personal, empresa, proveedores y comunidad). La misión y visión de la empresa, fueron realizadas en forma conjunta con todas las áreas de Pemex Petroquímica en las reuniones del grupo de alineación estratégica y propone acciones concretas.

1.4 MISION DEL COMPLEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

Siendo la misión la razón de ser de la empresa considerando sobre todo que es parte atractiva del negocio, y es donde se hace el análisis del macro y micro entorno que permita construir el escenario actual y posible, para que sea posible ver con mayor énfasis la condición y razón de ser de la empresa en dicho mercado. Por lo tanto la misión del Complejo Petroquímico Cosoleacaque dice lo siguiente:

“Somos una empresa que elabora, comercializa y distribuye productos petroquímicos selectos, en crecimiento continuo y maximizando su valor económico,

con calidad, seguridad, respeto al medio ambiente, a su entorno social y promoviendo el desarrollo integral de su personal”¹.

El interés en y los esfuerzos hacia la administración de las empresas son a nivel mundial y están aumentando rápidamente. El cambio cultural crea la necesidad de conocer y comprender la filosofía, enfoque, visión, misión que debe dársele asumiéndola como una verdadera función operativa de control del sector específico que realiza el control o inspección de la calidad. La primera definición que hoy en día las empresas industriales de este tipo implantan es un esfuerzo de toda la compañía que trata de establecer y hacer permanente un ambiente en el cual los empleados mejoren continuamente su habilidad de proporcionar los productos que los clientes encuentren de un valor particular. Cabe mencionar que los valores y los enfoques han sido los aspectos claves de muchos procesos de éxito.

1.5 VISION DEL COMPEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

Al igual que la misión, la visión de la Subsidiaria de Pemex Petroquímica es la misma que para el Complejo Petroquímico Cosoleacaque y esta dice:

“Ser una empresa de clase mundial, líder en el mercado, rentable, confiable y competitiva, reconocida por la calidad de sus productos; con una arraigada cultura de servicio al cliente, respetuosa del medio ambiente, cuidadosa de sus relaciones con la comunidad y promotora del desarrollo integral de su personal”².

Todos los miembros de la organización ven hacia el futuro, pero se ha desarrollado un interés renovado en el uso de las intervenciones para estudiar tendencias proyectadas hacia el futuro y sus implicaciones para la organización.

1.6 POLITICA DE CALIDAD DEL COMPEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

De igual manera podemos visualizar la Política de Calidad de Pemex Petroquímica está dictada para todos los centros y entonces aplica para el Complejo Petroquímico Cosoleacaque, y la letra dice:

“Satisfacer los requisitos acordados con nuestros clientes, cuidando el medio ambiente, la integridad física de las instalaciones, el desarrollo y salud del personal, con una actuación ética, transparente y de mejora continua”³.

La Política de Calidad se encuentra disponible a todo el personal de Pemex Petroquímica, esto incluye a todos los Complejos Petroquímicos y áreas

dependientes de esta subsidiaria, además esta signada por la máxima autoridad de Pemex Petroquímica, que es el Director General.

1.7 PRODUCTOS FABRICADOS EN EL COMPEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

El proceso de fabricación bajo la licencia The M. W. KelloggCompany, las plantas tienen como producto principal al AMONIACO y como elemento secundario el BIOXIDO DE CARBONO.

Para el manejo y distribución del amoniaco dentro del perímetro del Complejo se dispone de dos estaciones de bombeo y dos áreas de almacenamiento, una en el área norte con capacidad para manejar 6,000 ton/día y 4 esferas para almacenar 7,000 Ton/ día, otra en el área sur con capacidad para bombear 2000 ton/día y dos esferas con capacidad para almacenar 3,000 ton.

Para el exterior de las instalaciones se cuenta con una red de ductos que suministran el producto a la planta de Fertilizantes (antes FERTIMEX) ubicadas en Minatitlán, Coatzacoalcos, Veracruz; en donde se tiene una capacidad de almacenamiento de 20,000 toneladas por un ducto de 25.5 cm. de diámetro, 27 Km. de longitud con margen para transportar 3,000 ton/día se envía el Amoniaco a la Terminal de Pajaritos donde se dispone de instalaciones criogénicas. Pajaritos transporta el amoniaco por vía marítima a Ciudad Madero, Tamaulipas; para abastecer el consumo del vértice del Golfo de México.

Por otra parte se envía un volumen importante de amoniaco a la Terminal marítima de Salina Cruz, Oaxaca, a través de un Amoniaducto de 250 kilómetros de longitud y 25.4 cm., de diámetro. En esta Terminal se cuenta con almacenamiento refrigerado para 40,000 Toneladas, de donde se abastece otras dos terminales localizadas en Topolobampo, Sinaloa, y Guaymas, Sonora con capacidad para almacenar 20,000 toneladas cada una y que cubren la demanda de la vertiente del pacífico.

Las operaciones de embarque para exportación, se efectúan únicamente en las terminales de Pajaritos, Veracruz y Salina Cruz, Oaxaca. Para mejorar la red de distribución en el país, se tiene en proyecto la construcción de un amoniaducto

de 30.5 cm. de diámetro que partiendo de Petroquímica Cosoleacaque, llevará Amoniaco hasta Guadalajara, Jalisco, cubriendo así las necesidades del Bajío.

Debido a que el mundo actual vive un proceso acelerado de cambio y transformación, a mediados de los años 90's, se une una corriente nueva dentro del Complejo Petroquímico Cosoleacaque y que es el cuidado del medio ambiente, donde toda empresa establecida debe tomar en cuenta al desarrollar sus actividades el aspecto ecológico, siendo necesario adoptar alguna metodología que permita a las empresas sistematizar todas aquellas actividades relevantes o no que aporten algún contaminante al ambiente para su control efectivo, adoptándose el sistema internacional de estándares (ISO) que proporciona las directrices necesarias para cumplir con las reglamentaciones aplicadas a las em24presas por los gobiernos de cualquier lugar; este sistema es la norma ISO 14000 denominada sistema de administración ambiental.

1.8EVOLUCION EN MATERIA DE CALIDAD DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO COSOLEACAQUE.

En material de calidad, el COMPLEJO PETROQUÍMICO COSOLEACAQUE, ha permanecido certificado en las normas ISO-9002:2004 del año de 1995 al 2001; en ISO-9001:2000 del año de 2002 al 2006; en ISO-14001:1997 del año de 1999 al 2003 y en ISO-14001:2004 del año de 2004 al 2006. De los años de 1995 a 2005, las certificaciones se obtuvieron como una empresa Filial de razón social Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V., y a partir de la fusión de las Filiales con Pemex Petroquímica realizada en Mayo de 2006, ya la certificación fue obtenida como un Complejo de Pemex Petroquímica.

Tabla 1.2 Certificaciones de 1996 al 2006.

| NORMA | CERTIFICADO | REFERENCIAS |
|------------------------------------|--------------------|---|
| ISO-9002:1994 | 1995 | Como Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V. Primera Etapa de Pemex Petroquímica. |
| ISO-14001:1997 | 1999 | Como Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V. Primera Etapa de Pemex Petroquímica. |
| ISO-9001:2000 | 2002 | Como Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V. Segunda Etapa de Pemex Petroquímica. |
| ISO-9001:2000 ISO 14001:2004 | Junio de 2006 | Como Complejo Petroquímico Cosoleacaque, Tercera Etapa de Pemex Petroquímica. |

La preocupación de la organización por cubrir las necesidades que demandan los diferentes clientes nacionales e internacionales, así como la entrega de su producto con los requisitos de calidad requeridas, han generado durante todos estos años que las certificaciones sean una acción cotidiana de sus funciones y con ello demuestra que se tiene una gran madurez y capacidad en este sentido.

1.9 INSTALACIONES

Petróleos Mexicanos fundó este centro, situado en el municipio de Cosoleacaque, en el estado de Veracruz, en 1962, año en que entró en operación la primera planta de producción de amoníaco y bióxido de carbono, lo anterior hizo que el consumo de dichos productos, punto de partida para la fabricación de fertilizante y de gas carbónico tuvieran una demanda creciente que vino a superar los pronósticos más optimistas, lo que obligo a incrementar la producción de amoníaco, con la instalación de nuevas plantas.

Estas nuevas instalaciones fueron sumándose a las ya existentes, hasta llegar a alcanzar 5 plantas de amoníaco, 1 planta de Acrilonitrilo, 1 Planta de Paraxileno y 1 planta de hidrógeno.

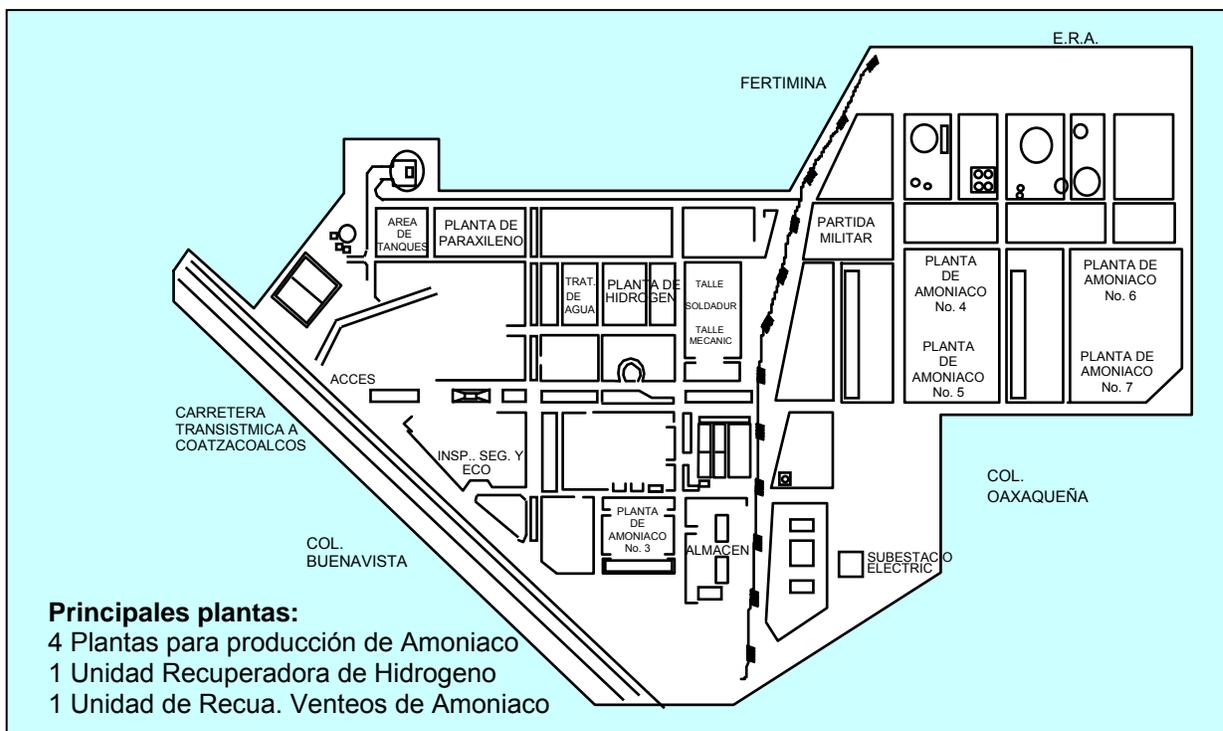


Figura 1.3 Distribución de las Instalaciones del Complejo Petroquímico Cosoleacaque.

El 16 de Julio de 1992, se publica en el Diario Oficial de la Federación, La Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos, estableciendo la creación del organismo subsidiario denominado Pemex Petroquímica, el cual se encargará de llevar a cabo los procesos industriales petroquímicos, cuyos productos no forman parte de la Industria Petroquímica Básica, así como su almacenamiento, distribución y comercialización. Con este paso se da entrada a la constitución de la Gerencia del Complejo Petroquímico Cosoleacaque que recibe para su administración las áreas operativas que tradicionalmente constituían el centro, además se transfieren a este centro las funciones de los Recursos Humanos, Materiales y Financieros.

Posteriormente en sesión del Consejo de Administración de Petróleos Mexicanos, en el mes de diciembre de 1996 se autoriza a PEMEX Petroquímica a constituir diez empresas filiales de participación mayoritaria estatal, es en este marco que se constituye formalmente la empresa Petroquímica Cosoleacaque S.A. de C.V. el 31 de enero de 1997, cuyo objeto fundamental es promover, desarrollar, llevar a cabo la elaboración, producción, almacenamiento, distribución, comercialización y demás actividades conexas de productos petroquímicos no básicos. La fecha de inicio de operaciones es el día 01 de febrero de 1997.

El Complejo Petroquímico Cosoleacaque ocupa una superficie de 103 hectáreas y se encuentra localizado en el Kilómetro 39+400 de la carretera costera del Golfo a una altura de 30 metros sobre el nivel del mar en Cosoleacaque, Veracruz.

El proceso del amoniaco lo podemos describir en cuatro etapas: Reformación, Purificación, Síntesis y Refrigeración; además se trata de un proceso continuo.

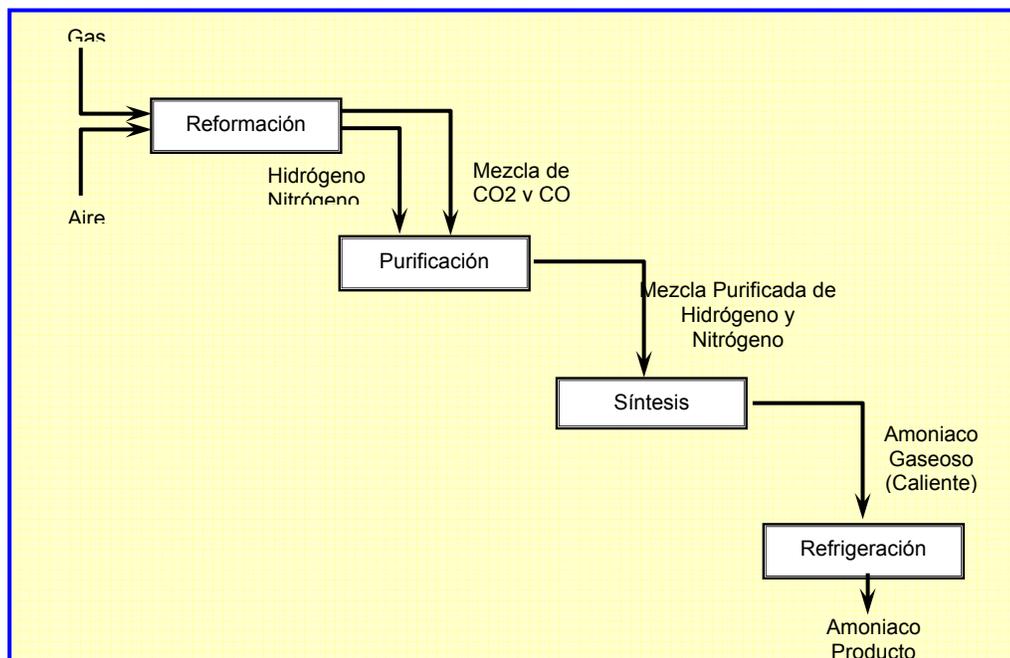


Figura 1.4 Etapas principales del proceso de fabricación del Amoniaco.

Los procesos de fabricación del Amoniaco, cuentan con los programas de mantenimiento necesarios para mantener y mejorar las condiciones operativas, partiendo de la referencia de los programas operativos anuales, sustentándose con infraestructura funcional mediante los talleres de mantenimiento conformado por personal especialista en equipo mecánico estático, mecánico dinámico, eléctrico, obra civil y electrónica, además de áreas destinadas para realizar las instalaciones y maniobras de equipos; con oficinas equipadas con equipos de cómputo, redes informáticas, sistemas de administración informática, sistema Intranet, control de inventarios de refacciones en sistemas informáticos, y equipos de intercomunicación y medios de transporte personal. Además se cuenta con herramientas manual,

mecánica, neumática, hidráulica y eléctrica para apoyo del personal que desarrolla las tareas.

Por lo que se refiere a las plantas de amoniaco cuentan con Sistema de control Distribuido (SCD), definido como un conjunto de componentes que basan su operación en sistemas de cómputo, con funciones independientes, pero relacionados entre sí a través de una red de comunicación, con la finalidad de medir y controlar las variables de proceso y satisfacer las necesidades de estrategias de control y seguridad de la planta. Las características funcionales de estos sistemas son

- a).- Control programado del set-point.
- b).- Supervisión y alarmas de valores límite establecidos.
- c).- Linearización y/o acondicionamiento de la señal de entrada.
- d).- Capacidad de comunicación con otros Componentes digitales.
- e).- Detección automática y auto diagnóstico de fallas.
- f).- Capacidad de almacenar datos históricos.
- g).- Posibilidad de seleccionar diferentes algoritmos de control.

1.10 UBICACIÓN EN EL PROCESO DEL CONDENSADOR DE AMONIACO 127-C1 EN LA PLANTA DE AMONIACO.

El sistema de refrigeración emplea un turbocompresor de cuatro pasos utilizando Amoniaco como refrigerante, donde fluye el amoniaco producido en el convertidor de síntesis 105-D a una temperatura del orden de -22°C y valores de 175 Kg/cm² de presión. Además condensa el amoniaco gaseoso efluente del convertidor, así como purifica el amoniaco producto.

1.11 EVOLUCION DEL MANTENIMIENTO EN EL COMPLEJO PETROQUIMICO COSOLEACAQUE.

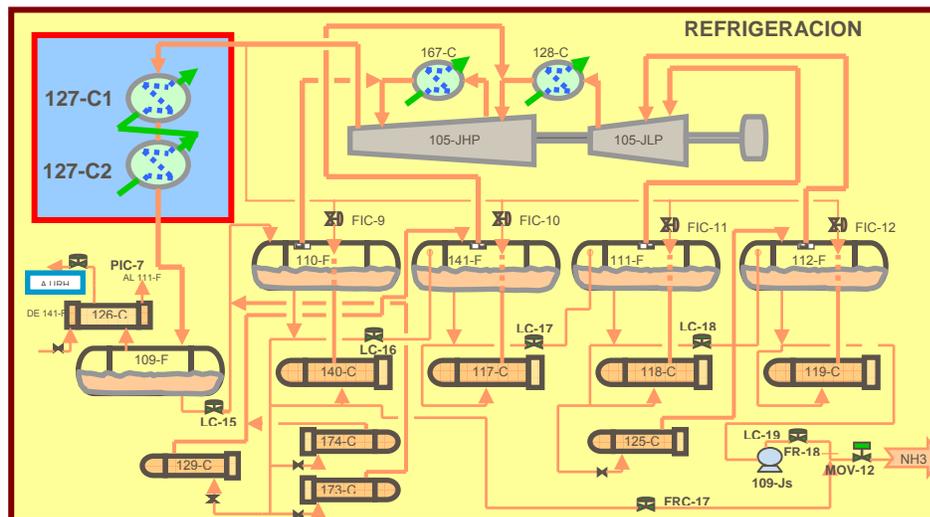


Figura 1.5 Ubicación de los condensadores de Amoníaco en la sección de Refrigeración.

El mantenimiento ha ido evolucionando de manera constante desde su Primera Generación, cuando la industria no estaba muy mecanizada, por lo que los períodos de paradas no importaban mucho. La maquinaria era sencilla y en la mayoría de los casos diseñada para un propósito determinado, lo que ocasionaba que fuera confiable y fácil de reparar. Como resultado, no se necesitaban sistemas de mantenimiento tan complejos y la necesidad de personal calificado era menor que ahora.

Actualmente el crecimiento continuo de la mecanización ha ocasionado que los períodos improductivos tengan un efecto más importante en la producción, en el costo total y en el servicio al cliente. Una mayor automatización significa que hay una relación más estrecha entre la condición de la maquinaria y la calidad del producto, por lo que los estándares de calidad se incrementan continuamente, cada vez son más serias las consecuencias de las fallas de una instalación para la seguridad y el medio ambiente.

Frente a esta serie de cambios, se han creado mayores demandas hacia la función del mantenimiento, el personal que dirige el mantenimiento está buscando un nuevo camino, trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente. Para Petróleos Mexicanos, este camino se llama Modelo del Sistema de Administración de Mantenimiento, el cual involucra a

personal de todos los niveles de la organización y a diversos departamentos que abarcan toda la empresa, con la finalidad de mejorar la producción, la eficiencia en la gestión de mantenimiento y, de forma paralela, la moral de los trabajadores debido a la satisfacción en el trabajo, utilizando las mejores prácticas de mantenimiento.

Para lograr lo anterior, PEMEX Petroquímica necesita reflexionar sobre la situación actual, organizarse, capacitarse y prepararse para el cambio asignando los recursos y dando el apoyo y la supervisión necesaria por parte del personal directivo.

El Modelo del Sistema de Administración de Mantenimiento⁴ está sustentado en cuatro fases de madurez de la organización de mantenimiento, partiendo de un estado cero denominado Mantenimiento Reactivo.

Las cuatro etapas son:

- Etapa cero (mantenimiento reactivo)
- Mantenimiento Planificado
- Mantenimiento Proactivo
- Gerencia Óptima de Activos
- Diseño Centrado en Confiabilidad

Mantenimiento Reactivo: Está basado en intervenciones correctivas no planeadas, independientemente de su impacto a la producción, la seguridad o al medio ambiente. Se considera mantenimiento correctivo o reactivo cuando la falla impide un cumplimiento total o parcial de las funciones de un ítem.⁵

Mantenimiento Planificado: En esta fase se realizan intervenciones que implican la restauración, sustitución de partes y/o elementos de un sistema o equipo, a intervalos predeterminados, con el fin de prevenir o eliminar las fallas o disminuir sus consecuencias. Se realizan programas de mantenimiento predictivo.⁶

Mantenimiento Proactivo: Esta fase se caracteriza por la planeación y programación de actividades que conllevan a la prevención, predicción o eliminación de las fallas o disminución, a niveles tolerables, de las consecuencias de las fallas. Dentro del Mantenimiento Proactivo se considera al Mantenimiento Predictivo, el Mantenimiento Preventivo y el Mantenimiento Detectivo. El Correctivo está reducido a aquellas fallas que no tienen otras consecuencias que los costos de reparación.⁷

Gestión Óptima de Activos: Esta fase se caracteriza porque el mantenimiento está basado en optimizar los costos de mantenimiento y asegurar que los ítems continúen cumpliendo satisfactoriamente su función. El mantenimiento que se planifica, programa y ejecuta es el más indicado en función de los requerimientos operacionales, de seguridad y conservación ambiental.⁸

Diseño Centrado en Confiabilidad: En esta fase se establecen durante la etapa de diseño los parámetros requeridos de funcionalidad, disponibilidad, confiabilidad, costos y riesgos y a la vez se establecen las estrategias de mantenimiento y los recursos necesarios para garantizar la funcionalidad de sus ítems con anticipación.

Estar en la fase de Diseño Centrado en Confiabilidad significa ser empresa de Clase Mundial, ya que la mentalidad y la cultura de los actores está centrada en una continua vigilancia de los cambios del entorno de manera que se pueda responder a estos con acciones proactivas que garanticen la continua generación de valor en la empresa.⁹

1.12 MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

Todas las actividades realizadas como resultado de una falla, para restituir un componente, equipo ó instalación, de manera que pueda desempeñar la función requerida. El mantenimiento correctivo debe comprender todas las actividades requeridas, desde el origen de la falla, hasta restituir las funciones del equipo, componente, instalación. Incluye trabajos previos y actividades de apoyo y de seguridad.

- Ejemplos: aislamiento de energía, protección contra incendio, conexión y desconexión eléctrica y de instrumentos, maniobras, transporte, desarmado, inspección, maquinado ó reemplazo de partes, armado, instalación, pruebas de aceptación para disponibilidad ó puesta en servicio. Estas tareas son enunciativas y no limitativas.

1.13 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

Todas las actividades realizadas a intervalos predeterminados para reducir la probabilidad de falla ó degradación de la función de un elemento, equipo ó

instalación bajo criterios previamente establecidos recomendaciones del fabricante, experiencia propia, análisis RCM, normas, etc.

- Las actividades preventivas están basadas en tiempo calendario, número de eventos como arranques de un equipo y ciclos de desempeño como horas de operación, kilómetros recorridos, etc.
- Las tareas preventivas programadas tales como: limpieza, inspección, lubricación, ajustes y pruebas de funcionamiento, pueden incluir reemplazo de partes y/o productos, independientemente de su condición actual. Estas tareas son enunciativas y no limitativas.
- El mantenimiento preventivo comprende todas las actividades realizadas durante la intervención, aun las no planeadas.

1.14 MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Todas las actividades realizadas para inspección y/o monitoreo de las condiciones de un componente, equipo o instalación, análisis y diagnóstico para predecir su probabilidad de falla durante algún periodo futuro y las acciones para evitar que la falla ocurra. Las actividades que se realizan producto del diagnóstico, deben clasificarse también como mantenimiento predictivo, sin importar el tiempo transcurrido entre el diagnóstico y la ejecución de dichas actividades, siempre y cuando no exista una intervención preventiva o correctiva entre estos dos eventos que corrija la desviación encontrada producto del diagnóstico. Para monitorear y evaluar la condición del equipo pueden utilizarse: los sentidos humanos, técnicas de control estadístico de proceso, hardware y software específicos tales como medición de espesores, medición de amperajes, termografía, análisis de vibración, ultrasonido, análisis de lubricantes, etc.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO SOBRE TERMOECONOMÍA Y CAMBIADORES DE CALOR.

2.1 ANÁLISIS HISTÓRICO.

Durante los años 1840-1878, J.P. Joule llevó a cabo una serie de cuidadosos experimentos sobre la naturaleza del calor y el trabajo, que fueron fundamentales para entender la primera ley de la Termodinámica y el concepto de energía. Para ello colocó cantidades medidas de agua en un contenedor aislado y la agitó mediante un agitador rotativo; la cantidad de trabajo transmitida al agua por el agitador se midió con una precisión y se anotaron cuidadosamente los cambios de temperatura experimentados por el agua, descubriendo que se requería una cantidad fija de trabajo por unidad de masa de agua, por cada grado que aumentaba su temperatura a causa de la agitación, y que la temperatura original del agua se podía restaurar por transferencia de calor mediante el simple contacto con un objeto más frío, demostrando la existencia de una relación cuantitativa entre el trabajo y el calor, por lo tanto, que el calor era una forma de energía.

En experimentos semejantes se aplicó energía al agua en forma de trabajo, pero se extrajo de ésta en forma de calor, la energía una vez aplicada al agua como trabajo y antes de extraerla como calor, quedó almacenada en el agua en otra forma, ni calor ni trabajo, a la que se definió como energía interna.

La energía interna de una sustancia no incluye las energías potencial y cinética asociadas a una sustancia como resultado de las interacciones entre sus campos de fuerza y su posición espacial (energía potencial) o de su movimiento microscópico (energía cinética), que son formas externas de energía; la energía interna se refiere a la energía de las moléculas constitutivas de la sustancia, que se encuentran en movimiento continuo y poseen *energía cinética de traslación* y (a excepción de las moléculas monoatómicas) *energía cinética de rotación y vibración interna*.

La transferencia de calor es el principal motivo de la ciencia de la Termodinámica, ya que trata las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía

como *calor* en los cuerpos de materia así como el intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados *fuentes y recibidor*.

En general, el calor se transfiere por tres mecanismos distintos: por conducción, o transferencia de la energía desde la materia a la materia adyacente por contacto directo, sin mezclarse o flujo de cualquier material.

Por convección o transferencia de la energía por el mezclado íntimo de grupos de material. En la convección natural es la diferencia de densidad del fluido caliente y del frío la que produce el mezclado. En la convección forzada un agitador mecánico o una diferencia de presión externamente impuesta (por un ventilador o un compresor) es lo que produce el mezclado.

Por radiación, tal como las ondas de la luz, infrarrojas, ultravioleta y radio, que emanan desde un cuerpo caliente y se absorben por uno frío.

2.2 CRITICA BIBLIOGRÁFICA

El estándar T.E.M.A.¹⁸ (Tubular Exchange Manufacturers Association), determina que el tipo de cambiador se asemeja al uno como descrito C.J.N. donde se describe un cambiador de Cabezal frontal integral y tapa removible, cuerpo integral de flujo dividido y Cabezal posterior integral y tapa removible.

La universidad Iberoamericana¹⁹ realiza un trabajo de Laboratorio de Operaciones Unitarias, donde considera de manera inadecuada los errores de medición así como las variaciones en los flujos de alimentación al equipo, considerando los valores promedios entre Q y q debido a que son diferentes por lo cual se pueden calcular el calor promedio para los cálculos posteriores.

En la universidad de Valladolid consideran el método del D. Kern como un método gráfico menos riguroso, ya que se basa en modelos gráficos y consideran como un método más riguroso al método Bell por que toma en cuenta las corrientes secundarias como holguras entre tubos y placas deflectoras, placas deflectoras y cuerpo o carcasa, y corriente por falta de tubos entre otras más importantes.

La segunda ley formulada en el siglo XIX, esperaba una herramienta a través de la cual, al ser aplicada, se pudieran observar sus resultados, el método exergético fue esta herramienta. Este método nos permite identificar en un sistema la energía

desperdiciada a través de sus procesos, siendo este desperdicio una medida indirecta del grado de irreversibilidad y eficiencia del mismo, para mayor información ver referencia ¹⁰.

Como un “bosquejo crítico de la revisión histórica por R. W. Haywood, indica las tempranas contribuciones del concepto de exergía dados por Clausius (1865), P. G. Tait (1868), W. Thomson (Lord Kelvin) principalmente J. W. Gibbs (1873) y J. C. Maxwell (1875), estos trabajos son una base para los subsecuentes desarrollos de G. Gouy (1889), A. Stodola (1898), G. A. Goudenough (1911) y G. Darrieus (1930) los cuales generan un pequeño interés.

El desarrollo moderno del análisis de exergía fue iniciado por F. Bosnjakovic en Europa y J. H. Keenan en los Estados Unidos. El clásico lema “irreversibilidad la lucha” ^{“1”} por F. Bosnjakovic marca el comienzo de este desarrollo. En los 1950s y 1960s las contribuciones del concepto de exergía también son hechas por Z. Rant, P. Grassmann, W. M. Brodyansky, E. A. Bruges, J. H. Keenan, M. Tribus, E. F. Obert, R. A. Gaggioli, R. B. Evans, H. D. Baehr, W. Fratzscher, J. Szargut, R. Petela y K. F. Knoche, entre otros. Durante este periodo el balance de exergía y su presentación gráfica, el cálculo de la exergía del combustible y la definición de los estados de referencia para el cálculo de la exergía química son introducidos. Además, algunas definiciones eficiencia exergética y de aplicación del primer análisis-exergía aplicado a un proceso industrial y a una planta son presentados” ^{“2”}. Los estudios termoeconómicos se basan en un análisis exergético del sistema y balances económicos tradicionales, ambos aspectos ayudan a determinar una evaluación real del comportamiento productivo del sistema.

Este comportamiento está basado en la disponibilidad de energía real del sistema, es decir, toma en cuenta los atributos térmicos útiles del mismo, cuantificando todas las corrientes de exergéticas que entran, salen, potencias y transferencias de calor internas y con sus alrededores, estos comportamientos

¹George Tsatsaronis. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy System, Energy Combustion_SCI, 1993 Inglaterra.

²George Tsatsaronis. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy System, Energy Combustion_SCI, 1993 Inglaterra.

determinan el grado de irreversibilidad del mismo y desde el punto de vista económico, permiten asignar a cada flujo de exergía un costo específico.

La exergía, es la parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico, con el nombre de "trabajo disponible". Es por lo tanto, la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea. El término desequilibrio, debe de ser parte de esta descripción, pues de otra forma no es posible la existencia de flujo de calor y a su vez de trabajo, en base a lo anterior, la exergía determina cuantitativamente el valor termodinámico de cualquier recurso; y por otro lado, permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de un proceso, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente.

El concepto de exergía, como se indica anteriormente, está asociado al desequilibrio entre un sistema y su entorno, este desequilibrio está determinado por la diferencia entre los valores de alguna variable termodinámica que los caracteriza (por ejemplo la temperatura o la presión). El desequilibrio consiste en que el valor de la variable dinámica en cuestión es diferente para el sistema y su entorno y, por ello, ambos están en una situación de desequilibrio. Generalmente existe alguna barrera que impide el alcance del equilibrio en la variable dinámica, manteniendo este; pero si espontáneamente o por la acción de un agente externo la barrera se quita, entonces el sistema y su entorno desarrollan los estado de comportamiento para generar la mínima diferencia de energía entre este y su entorno. En estas circunstancias, la energía desarrollada por el desequilibrio puede aprovecharse para lograr algún efecto útil, como por ejemplo trabajo mecánico. La exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un desequilibrio entre un sistema y su entorno esta, es una cantidad física que depende de las variables de dos sistemas, y no nada más de uno sólo, por ello es una propiedad singular, pues vale cero cuando ambos sistemas están en equilibrio y es diferente de cero cuando están en desequilibrio, por lo tanto, la exergía es la capacidad almacenada de realización de trabajo por dos sistemas en desequilibrio. Si el proceso de alcance del equilibrio es a

través de un sistema que funciona con fricción y calor transferido, entonces no se convierte en trabajo toda la exergía disponible, sino solamente una parte, el resto se desperdicia y se transforma en pérdidas de recursos energéticos, ver referencia ⁹. Si observamos un sistema en el cual sus elementos operan sin fricción y disipación, es decir, en un estado reversible, entonces del desequilibrio se puede obtener el trabajo máximo es decir toda la exergía presente en el sistema y su entorno.

2.2.1 BALANCE DE EXERGÍA Y DESTRUCCIÓN DE EXERGIA.

El análisis que se efectúa es de un sistema bajo comportamiento de estado estable, dado que la mayoría de las plantas industriales operan la mayor parte del tiempo bajo este esquema. De acuerdo a G. Tsatsaronis⁴ se puede describir en la ecuación el balance de exergías de un sistema como

$$\dot{E}^W + \dot{E}^Q + \sum_{i=1}^{NO} \dot{E}_i = \sum_{j=1}^{NO} \dot{E}_j + \dot{E}_D \quad (2.1)$$

Derivada de esta ecuación la destrucción de exergía se puede escribir como en la ecuación:

$$\dot{E}_D = \dot{E}^W + \dot{E}^Q + \sum_{i=1}^{NI} \dot{E}_i - \sum_{j=1}^{NO} \dot{E}_j \quad (2.2)$$

O a través de la ecuación de Stodola, o también de la segunda ley, referencia ¹⁶ como.

$$\dot{E}_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (2.3)$$

$$\frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum_{j=1}^{NO} s_j \dot{m}_j - \sum_{i=1}^{NI} s_i \dot{m}_i \quad (2.4)$$

“La exergía destruida y la exergía perdida representan lo que comúnmente se llama desperdicio de energía” ². Es importante determinar la exergía destruida en un sistema que está constituido de un número determinado de subsistemas, dado que el total de exergía destruida es igual a la suma de la destrucción de exergía en

²George Tsatsaronis. Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy System, Energy Combustion, SCI, 1993 Inglaterra.

los subsistemas que lo forman, y el cambio de exergía destruida en un subsistema afecta la exergía destruida en los demás, ver referencia ⁴.

$$\dot{E}_D = \sum_{k=1}^{ND} \dot{E}_{D_k} \quad (2.5)$$

El cálculo del valor de exergía de un estado, está basado en un estado de referencia determinado por el medio ambiente, la exergía del trabajo \dot{E}^W transferido a través de las fronteras del sistema y la energía asociada al calor transferido a través de las mismas \dot{E}^Q , en las ecuaciones de acuerdo a la convención adoptada para el presente trabajo, son negativas cuando $T > T_0$, en este caso, ambas energía son suministradas del sistema a sus alrededores.

$$\dot{E}^W = \dot{W} \quad (2.6)$$

$$\dot{E}^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (2.7)$$

2.2.2 EFICIENCIA EXERGÉTICA Y ENERGÉTICA.

La importancia de la exergía para valorar el desperdicio de recursos exergéticos y, por tanto, la capacidad de ahorro, proviene de los siguientes hechos:

- a) Todos los sistemas requiere de la realización de tareas mecánicas y termodinámicas para su desempeño.
- b) Toda tarea termodinámica implica la creación de entropía derivada de la formación de un desequilibrio entre un sistema y su entorno.
- c) La creación de exergía se realiza destruyendo la exergía existente a través de otros sistemas.
- d) Es posible un gasto mínimo de exergía; este gasto mínimo de exergía corresponde precisamente a la cantidad de exergía que se crea con la mínima destrucción y pérdida de está.
- e) La diferencia entre la exergía mínima requerida y la consumida, da una medida cuantitativa del desperdicio del recurso del cual se obtuvo ésta última y permite calcular el potencial de su ahorro.

Una manera alterna de medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos es mediante la llamada eficiencia exergética, la que se define como el cociente de la exergía propia del producto y la exergía consumida en la tarea (se calcula por el cociente de la energía de salida o útil, y la energía de entrada al sistema o elemento del mismo), ver referencia ⁸ y ¹⁵.

2.2.3 FUNDAMENTOS DE TERMOECONOMÍA.

Una de las principales preocupaciones de los sistemas productivos es determinar los costos verdaderos de sus productos, el tratar de definirlos presenta uno de los principales problemas, en el presente trabajo, se utilizan dos tipos de análisis un análisis térmico (exergético) y un balance económico, la aplicación de ambos, nos proporciona las bases adecuadas para definir los siguientes conocimientos ³:

- a) Determinar el costo para cada producto o servicio.
- b) Proveer una base racional para los precios.
- c) Proveer una base para asignar y controlar gasto.
- d) Proveer suficiente información para tomar decisiones.

De esta forma, se establece a través de un análisis económico convencional, un balance basado en las características térmicas de los costos formulados para todo un sistema el cual opere a un flujo estable:

$$\dot{C}_{p.tot} = \dot{C}_{f.tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (2.8)$$

La ecuación indica que los valores de los costos asociados con los productos del sistema ($\dot{C}_{p.tot}$), son iguales al total de los gastos hechos para producirlo, es decir, en el segundo miembro de la ecuación mencionada se incluye los costos de combustible (\dot{C}_f) y los asociados con los capitales invertidos (\dot{Z}^{CI}), operación y mantenimiento (\dot{Z}^{OM}).

En la pasada ecuación, el costo del combustible es usado para definir todos los costos necesarios para obtener el producto y por lo tanto, una base para los costos de venta de este último. Los valores (\dot{Z}^{CI}) y (\dot{Z}^{OM}) son calculados, y son, el gasto promedio anual del capital invertido y el costo en el mismo periodo de

operación y mantenimiento entre, el tiempo de operación del sistema, usualmente se efectúa en periodos de un año. La suma de estas dos variables es designada por \dot{Z} .

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (2.9)$$

De esta forma, la variable \dot{C} muestra un rango de costo asociado con él un flujo de exergía, la cual es función de los flujos de materia, potencia o transferencia de calor, mientras que la variable \dot{Z} representa los costos restantes.

La principal característica de la termoeconomía es la asignación de costos a corrientes portadoras de energía capaces de desarrollar un trabajo a través de su contenido de exergía (costo exergético), sin embargo en 1983 Tsatsaronis propuso el término Exergoeconomía debe de usarse en un sentido más general y menos ambiguo puesto que también puede referirse a un análisis termodinámico basado solo en la primera ley, con una evaluación económica convencional.

La palabra termodinámica indica el desarrollo de un análisis económico combinado con un análisis exergético¹⁰, basado en la segunda ley de la termodinámica, con el propósito de determinar los costos reales de la operación de un proceso. Por lo anterior el análisis termoeconómico proporciona un esquema de cómo la energía se distribuye en diferentes áreas de un proceso y que tan eficientemente es usada. Esto proporciona un panorama de las áreas de mejora de un proceso a través del uso eficiente de la energía.

Las metodologías desarrolladas hasta ahora se pueden clasificar en dos grupos, según el objetivo primordial, siendo.

La optimización del diseño o la operación del sistema energético

La asignación de costos a sus flujos internos y productos.

Sin embargo todas ellas parten del conocimiento de que es la exergía y no la energía, la propiedad que expresa la utilidad termodinámica de los productos y que por tanto la asignación de costos debe basarse en ello. Dentro del contexto de la asignación de costos, el costo exergético representa la cantidad de exergía que ha sido necesaria para producir los flujos y productos internos de una planta. Esto conduce a que si un sistema tiene más de un producto el costo de producción de

cada uno de ellos debe basarse en su contenido exergético eliminando la incertidumbre de que costo se debe asignar a cada producto o subproducto.

Un estudio termoeconómico completo debe considerar un análisis detallado de la exergia del sistema, un análisis económico, un análisis de costos de exergia y una evaluación termoeconómica de cada componente del sistema.

Los objetivos de un análisis termoeconómico son:

- 1) identificar la localización, magnitud y fuente de pérdidas termodinámicas reales (energía no utilizada) en un sistema de energía (destrucción de exergia).
- 2) Calcular los costos asociados con la destrucción de la exergia y sus pérdidas de la exergia.
- 3) Evaluar los costos de producción de cada producto en un sistema de conversión de energía que posea más de un producto.
- 4) Facilitar estudios de factibilidad y optimización durante la fase de diseño de un sistema de energía, así como estudios para mejorar un proceso existente.
- 5) Auxiliar en la elaboración de tomas de decisión concerniente a la operación y mantenimiento de plantas.
- 6) Comparar técnicamente alternativas tecnológicas de un proceso.

2.2.4 COSTO DE EXERGÍA

En la aplicación de un sistema de costos para un proceso operando a flujo estable, la entrada y la salida de flujo de materia, son una fuente con calor y trabajo interactuando con los alrededores y estableciendo a su vez, flujos de exergia entrando, saliendo del sistema y destruyéndose por las irreversibilidades internas del mismo. Ya que la exergia mide el verdadero valor termodinámico de tales efectos, su costo debido será asignado como producto de su precio, por lo cual, es significativo su uso como una base para asignar los costos en un sistema térmico. De esta forma, la termoeconomía descansa en el concepto de que la exergia es la base racional para asignar costos derivados de las interacciones que el sistema térmico

experimenta con sus alrededores y sus fuentes de ineficiencia interna, ver referencia 14.

El costo de exergía es un costo asociado con cada uno de los flujos de exergía. Así, los flujos de entrada y salida de materia, asociados con los valores de exergía transferida \dot{E}_i y \dot{E}_e , la potencia \dot{W} , y la transferencia relacionada con el calor transferido \dot{E}_q ; se establecen en las siguientes

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i = c_i (\dot{m}_i e_i) \quad (2.9)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}_e = c_e (\dot{m}_e e_e) \quad (2.10)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (2.11)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q \quad (2.12)$$

En estas ecuaciones c_i , c_e , c_w y c_q , denotan el promedio de costos por unidad de exergía en dólares por giga joule o centavos por miles de Btu.

Los costos de exergía incluyen un balance de costos normalmente formulado por cada componente por separado. Un balance de costos aplicado al enésimo componente del sistema, muestra que la suma de costos asociada con toda la exergía salida, es igual, a la suma de costos de todos los flujos de exergía de entrada, más los gastos propios debidos al capital de inversión (\dot{Z}^{Cl}), de operación y mantenimiento (\dot{Z}^{OM}). La suma de los últimos dos términos se denominan \dot{Z} , por lo tanto, para un componente que reciba calor transferido y genere potencia, nosotros podríamos escribir, ecuación:

$$\sum \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (2.13)$$

Esta ecuación establece que “el estado de total de costos de los flujos de salida de exergía, es igual al total de los gastos obtenidos de ellos; por ejemplo, para una turbina, el costo unitario promedio de la exergía de entrada utilizada para generar la potencia y el de la exergía de salida de la turbina son los mismos, y ambos, son proporcionados por el fluido de trabajo en la entrada de la turbina a un costo promedio igual por unidad de energía” ¹ c_i .

¹George Tsatsaronis, Michel J. Moran, Exergy-Aided Cost Minimization, Energy Converts. MGMT, 1997. Inglaterra.

En acuerdo con las prácticas contables, este costo podrían cambiar solo si la exergía en el proceso a evaluar sea incrementada durante el mismo, este punto de vista es acorde con ¹ siendo lógica su aplicación, ver referencia ¹⁰ para mayor información.

2.2.5 COSTOS DE EXERGÍA PERDIDA.

Los costos de los flujos de exergía rechazados a través de flujos de materia o energía al medio ambiente representan los costos de exergía perdida, de acuerdo con lo comentado en la referencia ³ los costos asociados con la exergía perdida, son las pérdidas expresadas en dinero de la exergía que sale del sistema a los alrededores.

La exergía perdida ($\dot{E}_{L,k}$), es la exergía asociada con las pérdidas de calor y flujos de masa rechazada a los alrededores, la cual, nos es vuelta a utilizar en otra parte del sistema.

La ecuación del sistema que representa el balance de costos y la participación de la exergía perdida, es:

$$\dot{C}_{p,k} = \dot{C}_{F,k} - \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k \quad (2.14)$$

Si definimos el costo unitario promedio del combustible y del producto por medio de las ecuaciones

$$c_{F,k} = \frac{\dot{C}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (2.15)$$

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}} \quad (2.16)$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} - \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k \quad (2.17)$$

Existen tres consideraciones para definir el costo unitario de la exergía perdida, la primera es $\dot{C}_{L,k} = 0$, este modo de evaluar el costo de la exergía perdida implica transferir este costo al final de venta del producto; la segunda consideración se establece al igualar el costo unitario de la exergía del combustible al costo unitario de la exergía perdida de acuerdo a la ecuación:

$$\dot{C}_{L,k} = c_{F,k} \dot{E}_{L,k} \quad (2.18)$$

Esta consideración supone, que la exergía perdida está siendo suministrada por un flujo de exergía adicional del combustible, manteniéndose constante el costo promedio de generación del producto, aunque exista variación de la exergía perdida. La tercera consideración, indica la posibilidad de asumir que la exergía perdida produce una reducción de la exergía del producto y, que el promedio del costo de este se mantiene prácticamente constante con la variación de la exergía perdida, ecuación:

$$\dot{C}_{L,k} = c_{P,k} \dot{E}_L \quad (2.19)$$

Esta última ecuación, sobrestima el costo de la exergía perdida, lo cual no es recomendable, ver referencia ³.

La consideración que se aplica en el presente trabajo, es la utilizada en la ecuación anterior, ya que asigna un costo razonable el cual no incrementar el costo de la exergía perdida.

2.2.6 COSTO DE EXERGÍA DESTRUIDA.

Este costo, como se puede observar, es un costo oculto pero es importante determinarlo a través del análisis termoeconómico. El efecto se puede observar con las ecuaciones:

$$\dot{E}_{F,k} = \dot{E}_{P,k} + \dot{E}_{L,k} + \dot{E}_{D,k} \quad (2.20)$$

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} - \dot{C}_{L,k} + \dot{Z}_k \quad (2.21)$$

Eliminando $\dot{E}_{F,k}$ obtenemos la ecuación:

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{P,k} + (c_{F,k} \dot{E}_{L,k} - \dot{C}_{L,k}) + \dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.22)$$

Y eliminando $\dot{E}_{P,k}$ obtenemos la ecuación:

$$c_{P,k} \dot{E}_{F,k} = c_{F,k} \dot{E}_{F,k} + (c_{P,k} \dot{E}_{L,k} - \dot{C}_{L,k}) + \dot{Z}_k + c_{P,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.23)$$

El último término del lado derecho de las ecuaciones anteriores incluye el valor de exergía destruida.

Considerando que la exergía del producto ($\dot{E}_{P,k}$) es fija, y que el costo unitario del producto ($c_{P,k}$) es independiente de la destrucción de exergía, podemos definir el costo de destrucción de exergía como el último término de la ecuación ultima.

2.2.7 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE Y METODOLOGÍA PROPUESTA.

La evaluación de un sistema térmico mediante un análisis exergoeconómico se basa de acuerdo a lo propuesto por ³ en:

- a) La identificación de los flujos de exergías de entrada, salida del sistema y los flujos de calor transferido y potencia generada.
- b) La identificación de los flujos de exergía perdida y destruida.
- c) El producto y el combustible, tomando como estos términos la descripción hecha en la referencia ⁴.
- d) Y los costos unitarios de las corrientes de exergía que participan en los procesos térmicos.

Esta aplicación del balance de costos en el sistema, debe de ir precedida por el análisis exergético del mismo.

En el presente trabajo, se propone la solución de las incógnitas derivadas de las ecuaciones de balance a través de un sistema de ecuaciones no asignando valores prefijados a cada flujo.

Es necesario, para una buena aplicación y utilidad del presente análisis, identificar los elementos que disminuyen la eficiencia del sistema, siendo estos unos de los principales participantes en la producción de altos costos generados en el sistema.

Los elementos de menor eficiencia exergética son aquellos que bajo la luz de la segunda ley, ver referencia ⁵, destruyen, pierden exergía o efectúan bajo sus procesos ambas prácticas, siendo esta, el resultado del grado de irreversibilidad del sistema, ambos aspectos se miden en forma de indicadores, de acuerdo a lo mencionado en ³ para establecer una metodología de optimización elemental, como se explica en el siguiente capítulo.

El análisis exergético se efectúa de acuerdo al siguiente orden:

1. Establecer el estado exergético del sistema en todos los puntos de inicio y fin del proceso a estudio.
2. Efectuar en forma separada los balances exergoeconómicos del sistema tomando las siguientes consideraciones:

3. Combustible \dot{E}_f = flujos de exergía utilizados para producción.
4. Producto \dot{E}_p = Flujo de exergía resultante del sistema.
5. Costo operativo \dot{Z}_i = Gastos operativos para la producción del sistema.
6. En este último elemento se agrupan los costos operativos por mantenimiento y mano de obra \dot{Z}^{OM} y los costos de inversión \dot{Z}^{CI} .
7. Establecer las ecuaciones del sistema termoeconómico por equipo, resultando un sistema de ecuaciones las cuales se agrupan y resuelven en forma matricial. El modelado de estas ecuaciones considera los límites de frontera de cada elemento, siendo esta parte, un aspecto importante en la solución del modelo, ver referencias ⁷ y ¹⁰.
8. Efectuar el cálculo de eficiencia del sistema de acuerdo a la referencias ^{3, 4,5} tomando como esta, la proporción de exergía del producto a la exergía del combustible.

2.2.7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico permite conocer cómo se generan y fluyen los costos a través de un proceso térmico o químico e indica las áreas que representan el mayor porcentaje de los mismos debido a que puede dar origen a uno o varios productos distintos en forma de materia o energía.

El costo total de los productos debe ser igual a los costos de la materia prima mas el costo de la energía consumida en el proceso más los costos asociados a la operación, mantenimiento, administración y capital invertido.

Para efectuar el análisis económico es necesario conocer o estimar los costos involucrados en cada una de las áreas que integran una planta de procesos químicos o planta térmica, estos costos son:

Costos fijos: depreciación, amortización, impuestos, seguros, interés, mantenimiento, administración y capital.

Materiales, mano de obra, transporte, almacenamiento, combustible, energía eléctrica, la parte variable del mantenimiento y la administración.

Uno de los factores más importantes que afecta la selección del diseño de un proceso químico o sistema térmico es el costo del producto final, sin embargo, el precio del mercado de un producto es, en general afectado no solo por el costo de

producción y los beneficios deseados sino por otros factores como la oferta y la demanda el suministro la competencia la regulación y los subsidios.

Energía es el movimiento o habilidad de producir movimiento siempre se conserva en un proceso (primera ley, ley de la conservación).

Exergía es el trabajo o habilidad de producir trabajo siempre se conserva en un proceso reversible⁴ pero siempre es consumida en un proceso irreversible (segunda ley, ley de la exergía).

El concepto de exergía está indisolublemente asociado al de desequilibrio entre un cierto sistema y su entorno, determinado por la diferencia entre los valores de alguna variable dinámica que los caracteriza (por ejemplo la temperatura o la presión). El desequilibrio consiste en que el valor de la variable dinámica en cuestión es diferente para el sistema y su entorno y, por ello, ambos están en una situación de desequilibrio. Generalmente habrá alguna barrera que impida el alcance del equilibrio en la variable dinámica, por lo que la situación se mantiene así; pero si espontáneamente o por la acción de un agente externo la barrera se quita, entonces el sistema y su entorno desembocan en un movimiento hacia el equilibrio. En estas circunstancias, dicho movimiento puede aprovecharse para lograr algún efecto útil, como trabajo mecánico. La exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un desequilibrio entre un sistema y su entorno. La exergía es pues una cantidad física que depende de las variables de dos sistemas, y no nada más de uno sólo; tiene por ello una propiedad singular, pues de los hechos de que vale cero cuando ambos sistemas están en equilibrio y de que es diferente de cero cuando están en desequilibrio, se sigue que la exergía es la capacidad almacenada de realización de trabajo por dos sistemas en desequilibrio.

2.2.7.2 COSTOS EXERGÉTICOS EN CAMBIADORES DE CALOR Y CALDERAS

Para un sistema operando en estado estacionario pueden existir un número de corrientes que entran y salen del sistema así como interacciones de trabajo y energía en forma de calor con los alrededores. Asociado a estas transferencias de materia y energía también existen transferencias de exergía hacia dentro y fuera del sistema así como la destrucción de exergía. Debido a que la exergía determina el

verdadero valor termodinámico de estos efectos es conveniente asignar costos sobre la base de la exergia y no de la materia o energía.

La determinación de los costos exergéticos, el costo es asociado a cada corriente de exergia, esto aplica para cada corriente que entra y sale del proceso con flujos asociados de exergia como es la materia, la potencia y la transferencia de exergia asociada con la transferencia de calor, donde se puede escribir.

Costo de los productos

$$C_p = (C_6 - C_5) + (C_8 - C_7) \quad (2.24)$$

Costo del combustible

$$C_f = (C_1 + C_2) - (C_3 + C_4) \quad (2.25)$$

Ecuación auxiliar de termodinámica

$$\frac{C_6 - C_5}{E_6 - E_5} = \frac{C_8 - C_7}{E_8 - E_7} \quad (2.26)$$

$$C_1 = c_1 E_1 = c_1 (m_1 e_1) \quad (2.27)$$

$$C_6 = c_6 E_6 = c_6 (m_6 e_6) \quad (2.28)$$

Donde:

$E_1 - E_9$: Flujos de exergia asociados a la materia (KJ/Kg)W:

c_1, c_6 : Son los costos promedio por unidad de exergia en pesos por Giga joule. (\$/GJ).

El costo exergético considera los costos de cada una de las corrientes que entran y salen del sistema, por lo tanto si se aplica un balance de costos para cada una de las corrientes, entonces la suma de los costos de las corrientes que salen del sistema será igual a la suma de los costos que entran al sistema más los costos asociados al mantenimiento y operación, mas los costos del capital asociado a cada una de las corrientes. Lo anterior se puede resumir en:

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k^{OM} + Z_k^{CI} \quad (2.29)$$

Los costos de operación y mantenimiento mas los costos de capital y otros costos se pueden considerar como:

$$Z_k = Z_k^{CI} + Z_k^{OM} \quad (2.30)$$

Por lo tanto la ecuación puede escribirse como:

$$\sum_e C_{e,k} + C_{w,k} = C_{q,k} + \sum_i C_{i,k} + Z_k \quad (2.31)$$

Donde:

$\sum C_{e,k}$: Costos de las corrientes que salen del sistema (\$).

$\sum C_{i,k}$: Costos de las corrientes (\$)

Z_k^{OM} : Costos asociados a la operación y mantenimiento (\$)

Z_k^{CI} : Costos de capital asociados al sistema (\$)

Z_k : Costo total asociado al capital, operación, mantenimiento, y otros costos (\$).

Esta ecuación indica que el costo total de las corrientes de exergía que salen es igual al costo total de las corrientes de energía que entran, más sus costos asociados de capital, operación y mantenimiento y otros costos. Considerando las ecuaciones se obtienen:

$$\sum_e (c_e E_e)_k + c_{w,k} W_k = c_{q,k} E_{q,k} + \sum_i (c_i E_i)_k + Z_k \quad (2.32)$$

En el siguiente diagrama del generador de vapor (Fig.2.1) se muestran las corrientes que intervienen en el desempeño del mismo.

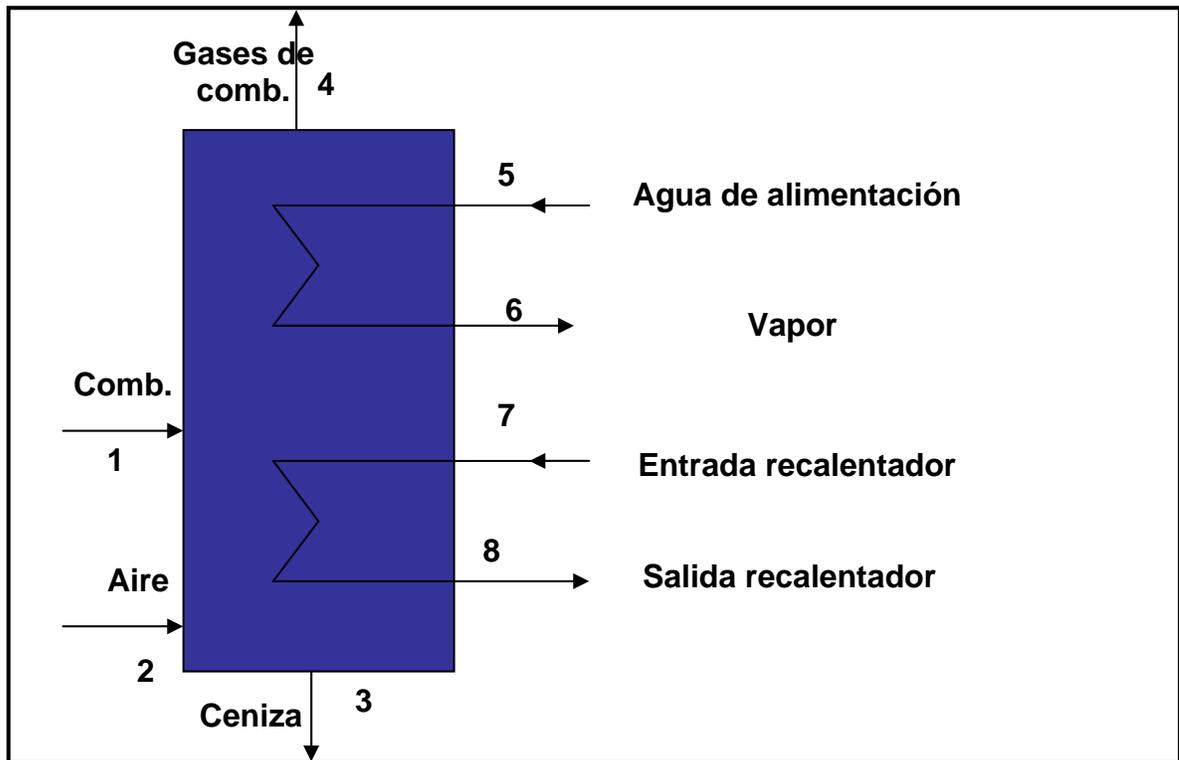


Fig. 2.1 Diagrama de Generador de Vapor

Ecuaciones para determinación de exergias de productos y de combustible para la determinación de eficiencia exergetica:

$$\text{Exergia de los productos, } EP = (E6 - E5) + (E8 - E7) \quad (2.33)$$

$$\text{Exergia del combustible, } EF = (E1 + E2) + (E3 + E4) \quad (2.34)$$

$$\eta_{\text{exergetica}} = \frac{EP}{EF} * 100 \quad (2.35)$$

La importancia de la exergía para valorar el desperdicio de recursos exergeticos y, por tanto, la capacidad de ahorro, proviene de los siguientes hechos:

a) toda sociedad requiere de la realización de tareas mecánicas y termodinámicas para su sobre vivencia (subir pesos, calentar espacios, girar cuerpos, etc.); b) cumplir una tarea termodinámica implica la creación de exergía (de un solo tipo, si es una tarea simple) es decir, la formación de un contraste entre un sistema y su entorno (por ejemplo cuando se sube agua de un nivel a otro, como en el bombeo de agua en la agricultura, en la industria o en los hogares, o cuando se eleva la temperatura de un cuarto sobre la del ambiente, en la calefacción de interiores); c) la creación de

exergía se realiza destruyendo la exergía existente en otras partes, como cuando la elevación de agua se lleva a efecto mediante un motor eléctrico, que funciona por la quema de la exergía química del combustóleo en la termoeléctrica; d) de las posibles maneras de cumplir una tarea mecánica o termodinámica, habrá una que implique el gasto mínimo de exergía; este gasto mínimo de exergía corresponde precisamente a la cantidad de exergía que se crea por la realización de la tarea (por ejemplo, la exergía mínima requerida para elevar una masa de agua a cierta altura es exactamente la exergía que se destruye por un dispositivo sin fricción que opera mediante la bajada de la misma cantidad de agua de tal altura; e) la diferencia entre la exergía mínima requerida y la consumida da una medida cuantitativa del desperdicio del recurso del cual se obtuvo ésta última y, al mismo tiempo, permite calcular con precisión el potencial de su ahorro. Una manera alterna de medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos es mediante la llamada eficiencia exergética, la que se define como el cociente de la exergía mínima y la exergía consumida en la tarea; el valor máximo de la eficiencia exergética es de uno. La eficiencia exergética, o eficiencia de tarea, es distinta de la eficiencia tradicional de los dispositivos mecánicos o termodinámicos, también llamada eficiencia energética. Ésta se calcula por el cociente de la energía de salida o útil, y la energía de entrada al dispositivo (por ejemplo, en una planta termoeléctrica o de potencia, la eficiencia es normalmente el cociente de la energía eléctrica y el calor generado en la caldera).

La principal característica de la termoeconomía es la asignación de costos a corrientes portadoras de energía capaces de desarrollar un trabajo a través de su contenido de exergía (costeo exergético), sin embargo en 1983 Tsatsaronis propuso “el término Exergoeconomía para caracterizar de manera más precisa esta combinación. La expresión Termoeconomía debe usarse en un sentido más general y menos ambiguo puesto que también puede referirse a un análisis termodinámico basado sólo en la Primera Ley, con una evaluación económica convencional.”

La palabra Termoeconomía indica el desarrollo de un análisis económico combinado con un análisis exergético, basado en la Segunda Ley de la Termodinámica, con el propósito de determinar los costos reales de la operación de un proceso. Por lo anterior el análisis termoeconómico proporciona un esquema de

como la energía se distribuye en las diferentes áreas de un proceso y que tan eficientemente es usada. Esto proporciona un panorama de las áreas de mejora de un proceso a través del uso eficiente de la energía.

Las metodologías desarrolladas hasta ahora⁹ se pueden clasificar en dos grupos, según el objetivo primordial, siendo

- a) La optimización del diseño o la operación del sistema energético
- b) La asignación de costos a sus flujos internos y productos.

Sin embargo todas ellas parten del conocimiento de que es la exergía y no la energía, la propiedad que expresa la utilidad termodinámica de los productos y que por lo tanto la asignación de costos debe basarse en ello²³. Dentro del contexto de la asignación de costos, el costo exergético representa la cantidad de exergía que ha sido necesaria para producir los flujos y productos internos de una planta¹⁵. Esto conduce a que si un sistema tiene más de un producto el costo de producción de cada uno de ellos debe basarse en su contenido exergético eliminando la incertidumbre de que costo se debe asignar a cada producto o subproducto.

Un estudio termoeconómico completo debe considerar un análisis detallado de la exergía del sistema, un análisis económico, un análisis de costos de exergía y una evaluación Termoeconómica de cada componente del sistema.

Los objetivos de un análisis termoeconómico son²⁴:

- Identificar la localización, magnitud y fuente de pérdidas termodinámicas reales (energía no utilizada) en un sistema de energía (destrucción de exergía).
- Calcular los costos asociados con la destrucción de la exergía y sus pérdidas de la exergía.
- Evaluar los costos de producción de cada producto en un sistema de conversión de energía que posea más de un producto.
- Facilitar estudios de factibilidad y optimización durante la fase de diseño de un sistema de energía, así como estudios para mejorar un proceso existente.
- Auxiliar en la elaboración de tomas de decisión concerniente a la operación y mantenimiento de plantas.

- Comparar técnicamente alternativas tecnológicas de un proceso.

2.2.8 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO EN CAMBIADORES DE CALOR Y CALDERAS.

El área de costos de una compañía se enfoca a,

- Determinar los costos actuales de productos o servicios.
- Proveer una base para los precios de bienes y servicios.
- Proveer los medios para colocar y controlar ventas.
- Proveer información para tomar y evaluar decisiones.

El balance de costos de un proceso en operación estable para efectuar un análisis económico es

$$\dot{C}_{P,tot} = \dot{C}_{F,tot} + \dot{Z}_{tot}^{CI} + \dot{Z}_{tot}^{OM} \quad (2.36)$$

Donde:

$\dot{C}_{P,tot}$ Costo asociado con el producto del proceso. (\$)

$\dot{C}_{F,tot}$ Costo de la materia prima. (\$).

\dot{Z}_{tot}^{CI} Costos asociados al Capital (\$).

\dot{Z}_{tot}^{OM} Costos asociados a la operación y mantenimiento del proceso. (\$)

El balance de costos establece que los costos están asociados con el producto del proceso, el cual es igual a la suma de los costos asociados con la materia prima, los costos asociados con el capital, los costos de operación y el costo de mantenimiento del proceso.

Los costos asociados con el capital y con la operación y el mantenimiento se obtienen dividiendo la contribución anual por inversión de capital y los costos anuales de operación y mantenimiento respectivamente entre el número de unidades de tiempo de la operación del sistema por año, esto puede ser horas o días, la suma de estas dos variables se denota por:

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (2.37)$$

Donde

\dot{Z} Costo asociado al Capital, operación y mantenimiento (\$/unidad de tiempo).

Para un sistema operando en estado estacionario pueden existir un número de corrientes que entran y salen del sistema así como interacciones de trabajo y energía en forma de calor con los alrededores. Asociado a estas transferencias de materia y energía también existen transferencias de exergía hacia dentro y fuera del sistema así como la destrucción de exergía. Debido a que la exergía determina el verdadero valor termodinámico de estos efectos es conveniente asignar costos sobre la base de la exergía y no de la materia ó energía.

En la determinación de los costos exergéticos, el costo es asociado a cada corriente de exergía, esto aplica para cada corriente que entra y sale del proceso con sus flujos asociados de exergía como es la materia, la potencia y la transferencia de exergía asociada con la transferencia de calor, donde se puede escribir;

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i = c_i \left(\dot{m}_i \dot{e}_i \right) \quad (2.38)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}_e = c_e \left(\dot{m}_e \dot{e}_e \right) \quad (2.39)$$

$$\dot{C}_W = c_W \dot{W} \quad (2.40)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q \quad (2.41)$$

Donde:

\dot{E}_i Y \dot{E}_e flujos de exergía asociados a la materia (KJ/kg).

\dot{W} exergía asociada a la potencia (KJ/s).

\dot{E}_q exergía asociada a la transferencia de calor (KJ/kg).

c_i, c_e, c_W y c_q son los costos promedio por unidad de exergía en pesos por GJ (\$/GJ).

El costo exergetico considera los costos de cada una de las corrientes que entran y salen del sistema, por lo tanto si se aplica un balance de costos para cada una de las corrientes, entonces la suma de los costos de las corrientes que salen del sistema será igual a la suma de los costos que entran al sistema más los costos asociados al mantenimiento y operación, más los costos del capital asociado a cada una de las corrientes. Lo anterior se puede resumir en

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k^{OM} + \dot{Z}_k^{CI} \quad (2.42)$$

Los costos de operación y mantenimiento más los costos de capital y otros costos se pueden considerar como;

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} \quad (2.43)$$

Por lo tanto la ecuación puede escribirse como:

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} = \dot{C}_{q,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (2.44)$$

Donde:

$\sum_e \dot{C}_{e,k}$ Costos de las corrientes que salen del sistema (\$).

$\sum_i \dot{C}_{i,k}$ Costos de las corrientes que entran al sistema (\$).

\dot{Z}_k^{OM} Costos asociados a la operación y mantenimiento (\$).

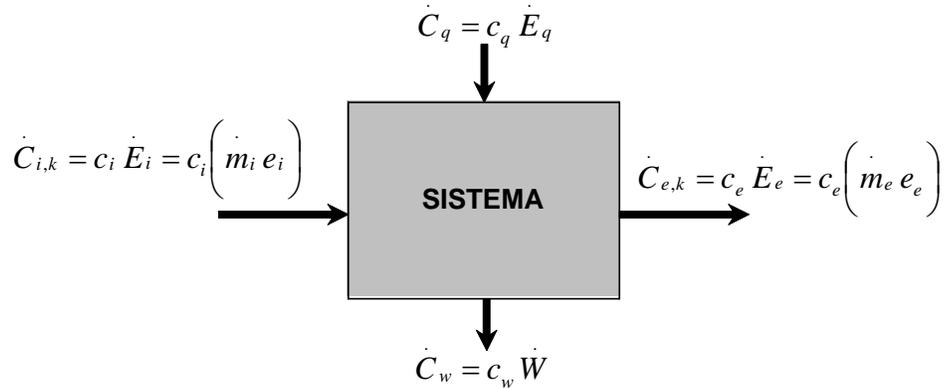
\dot{Z}_k^{CI} Costo de capital asociado al sistema (\$).

\dot{Z}_k Costo total asociado al capital, operación, mantenimiento y otros costos (\$).

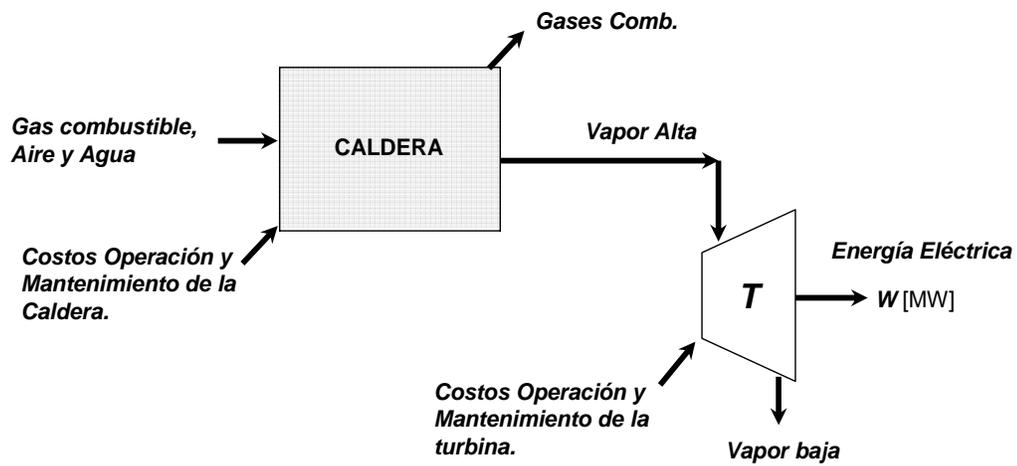
Esta ecuación indica que el costo total de las corrientes de exergía que salen es igual al costo total de las corrientes de exergía que entran, más sus costos asociados de capital, operación y mantenimiento y otros costos.

Considerando las ecuaciones anteriores se obtiene

$$\sum_e \left(c_e \dot{E}_e \right)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum_i \left(c_i \dot{E}_i \right)_k + \dot{Z}_k \quad (2.45)$$

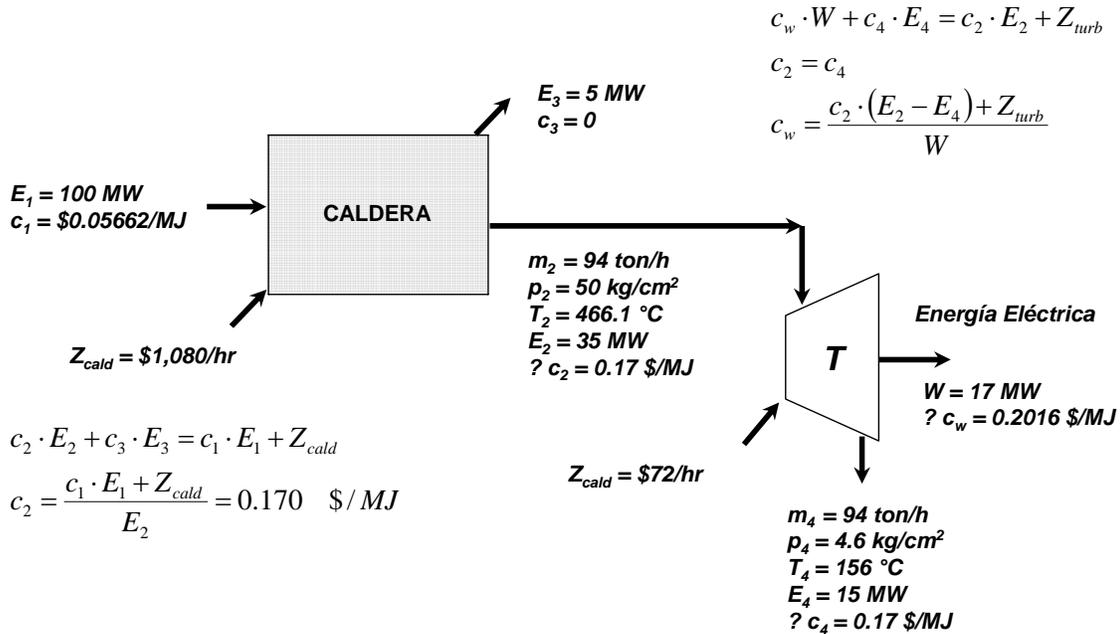


Ejemplo de cálculo de los costos de producción de Energía Eléctrica y Vapor



- Los costos de operación y mantenimiento consideran el costo capital de los equipo, servicios proporcionados por terceros, etc., llevados a hora, día o mes, dependiendo del tiempo considerado en los cálculos.
- Los costos están basados en energía y no en masa para la determinación de los mismos.

Ejemplo de cálculo de los costos de producción de Energía Eléctrica y Vapor



2.3. TRANSMISION DE CALOR

El calor es una de las formas de energía, o bien a la energía que fluye por causas de una diferencia de temperaturas se le denomina calor. El sentido como fluye el calor es del lado más caliente hacia el lado más frío.

El calor se transmite por: conducción, convección y radiación.

CONDUCCION: Es cuando el calor se pasa de un cuerpo a otro estando en contacto directo, o bien, de una parte a otra de un mismo cuerpo sin desplazamiento de sus partículas.

La capacidad de un cuerpo para transmitir calor se le llama conductividad térmica. Un ejemplo característico de conducción es la transferencia de calor a través de sólidos. El calor también puede ser conducido a través de gases y líquidos.

CONVECCION: Tiene lugar cuando la parte caliente de un fluido, siendo más ligera, se eleva y es reemplazado por fluido mas frío; por ejemplo, el aire que rodea al horno en un sistema de calefacción, es calentado y después se eleva circulando a través del local por convección.

RADIACION: Consiste en ondas electromagnéticas de lamisca naturaleza del radio y la luz. Todos los cuerpos radian calor en tal forma que una transferencia de calor por radiación, tiene lugar por que el cuerpo caliente emite más ondas que las recibidas, y el cuerpo frío recibe más hondas que las emitidas.

2.4.-CAMBIADORES DE CALOR

Un intercambiador de calor es todo aquel dispositivo cuya función principal es realizar una transferencia de calor desde un fluido a otro a través de paredes metálicas y sin que ocurra un contacto directo entre ellos. La forma elemental de un cambiador de calor consiste en un tubo por cuyo interior circula un fluido y cuyo exterior es bañado por otro, existiendo un potencial térmico entre ambos.

Como parte integrante de un sistema de producción, la función de los cambiadores de calor del tipo envolvente- haz de tubos es determinante. Por tal motivo y considerando que actualmente funciona una gran cantidad de estos cambiadores en las plantas industriales de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios, existe la necesidad de normalizar todo lo relativo al diseño, materiales de construcción, fabricación y suministro de estos equipos.

Existen diversos tipos de cambiadores de calor, pero el más comúnmente utilizado en las instalaciones de transformación industrial es el tipo de envolvente – haz de tubos.

Uno de los problemas principales que se tiene en las plantas de proceso industrial, es el de la transmisión eficiente de calor. La tecnología industrial aprovecha las propiedades de la transmisión de calor, utilizando equipos, aparatos o dispositivos, diseñados para elevar o bajar la temperatura de los productos de los procesos. Esto se logra mediante el empleo de equipos denominados “intercambiadores de calor”, combinando las diferentes fases cuando se manejan fluidos calientes o fríos.

2.5.- OBJETIVO DE LOS CAMBIADORES DE CALOR

El nombre de Permutadores o Cambiadores de Calor, tiene por objeto transferir o dar calor a un fluido de mayor temperatura a uno de menor temperatura, o sea, pasar calor de un fluido caliente a uno frío. Esta transferencia de calor puede ser a cualquier temperatura y presión. Los fluidos pueden ser gases o líquidos para

propósitos de transferencia de calor y eliminar la contaminación de los fluidos, estos estarán siempre separados por una pared generalmente metálica.

Con una transmisión eficiente de calor obtenido por medio de los cambiadores de calor se ahorra combustible que sería necesario para calentar líquidos y gases por requerimientos del proceso.

Aprovechamiento de las necesidades de proceso en las plantas industriales. Para obtener los productos finales hay necesidad de contar con medios de elevar o bajar temperaturas de los productos intermedios según se requiera a través del proceso.

Lo anterior se logra mediante cambiadores de calor combinado. Aprovechando las diferentes fases cuando se cuenta con líquidos, gases fríos o calientes.

Se tiene como ejemplo los siguientes pasos:

- a.- Calentar fluidos con un gas que se necesita enfriar.
- b.- Calentar fluidos con el vapor de escape que ya ha sido aprovechado en alguna otra fase del proceso.
- c.- En un fluido o producto terminado, aprovechando su contenido de calor para calentar otro fluido que lo requiera.
- d.- Evaporar fluidos aprovechando vapor de escape.
- e.- Condensar un gas caliente con un fluido que requiere ser elevado a cierta temperatura mediante el aprovechamiento adecuado de las necesidades del proceso, existiendo un ahorro económico.

Esta clase de equipo, es responsable del funcionamiento económico y flexible de la planta, como son los casos concretos de las plantas de destilación combinadas con petróleo crudo y las reductoras de viscosidad de residuo, pues algunos de los puntos principales de su diseño son:

- a. Obtener el mayor aprovechamiento de la energía térmica en el proceso.
- b. Evitar el paro y el arranque de la planta en forma frecuente y de gran duración por el mantenimiento excesivo.

2.6 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Dentro de la gran variedad de equipos transformadores de calor, se ha hecho una clasificación basada en la forma en la que se combinan y aprovechan las

diferentes fases, cuando de manejan líquidos y gases fríos y calientes conjuntamente con sentido de circulación del flujo.

En esta variedad, los tipos pueden ser definidos por la función que van a desempeñar en los procesos de la planta industrial, ya sea por su forma tipo de construcción, o por sus características especiales. Por encontrarse entre estos equipos los intercambiadores de calor como generalmente se les conoce y por la diversidad de servicios que prestan por adaptarse fácilmente al manejo de los fluidos bajo condiciones de presión y temperatura razonable, ha sido necesaria la clasificación de los mismos desde un punto de vista práctico de acuerdo a sus características:

- Por su función
- Por su construcción
- Por su operación

2.7 TIPOS DE CAMBIADORES DE CALOR DE ACUERDO A SU FUNCIÓN

2.7.1 CONDENSADORES

Este tipo de equipo, generalmente tiene una forma diferente de envolvente, ya que lleva en la parte inferior, una campana o recolector de condensado.

El uso de este equipo es indispensable en las plantas de proceso industriales, por ejemplo, para condensar el vapor procedente de las turbinas que, además de bajar la presión de salida, se recupera el condensado para utilizarse como agua de alimentación a calderas, obteniendo con ello una gran economía.

2.7.2 CONDENSADOR PARCIAL

Condensa vapor en un punto alto para proporcionar una diferencia de temperaturas suficientes para precalentar una corriente fría del fluido en proceso, economizando calor y eliminando la necesidad de agregar un precalentador por separado.

2.7.3 CONDENSADORES DE EYECTOR

Este es el objetivo que se persigue al recurrir al uso de eyectores de vacío, ya que producen una potente succión dentro de la coraza y alrededor de los tubos, para eliminar y mantener el vacío creado por la condensación del vapor.

Los eyectores, consisten en un Venturi conectado por un lado al vapor de alta presión y por el otro, al interior de la coraza del condensador.

Al expansionarse el vapor en el difusor del Venturi, extrae con gran fuerza una parte de los vapores del interior de la coraza.

Los condensadores para gran capacidad, son de varios pasos. Por lo general, en los turbogeneradores se instalan de dos pasos dobles, o sea que tienen dos entradas del fluido de enfriamiento y dos de salidas, como se ilustra en el esquema No. 3.11.

2.7.4 ENFRIADORES

Comprenden en este tipo de equipo, los que usan un fluido de enfriamiento tal como aire o agua y los que usan líquidos refrigerantes tales como amoníaco, propano, etc., en cuyo caso se les conoce con el nombre de "Chillers ", en los cuales por dentro de los tubos pasa la corriente que se va a enfriar, a temperaturas inferiores al ambiente o a 0°C, y estos están sumergidos en líquidos refrigerantes contenido en el cuerpo del equipo controlándose su nivel y con una cámara de vaporización, por lo que se puede observar , que el diámetro del haz de tubos es inferior al diámetro interior de la envolvente y excéntrico. En este tipo de equipo, se suprime el cabezal flotante para

Evitar la ruptura de los espárragos de sujeción, debido a la contracción que existe ocasionada por las bajas temperatura a las cuales trabaja, utilizándose generalmente tubos en " U " o serpentines únicos.

2.7.5 EVAPORADORES, REHERVIDORES O RECALENTADORES

Este tipo de equipos se construye en forma vertical, con envolventes de diámetro amplio con relación al haz de tubos, se usan principalmente para proveer vapores de calentamiento y arrastre en torres, reactivadores, regeneradores, etc., como corriente de calentamiento se utiliza vapor recalentado o alguna corriente de proceso que pueda ceder el calor necesario para vaporizar el líquido de proceso o para producir vapor, en cuyo caso se les conoce con el nombre de calderetas.

2.8 CAMBIADORES DE CALOR SEGÚN SU CONTRUCCION

2.8.1 INTERCAMBIADORES DE TUBERÍA DOBLE.

Consiste en un tubo pequeño que está dentro de otro tubo mayor, circulando los fluidos en el interior del pequeño y entre ambos. Estos intercambiadores se utilizan cuando los requisitos de área de transferencia son pequeños. Las curvas características de evolución de temperaturas en intercambiadores son:

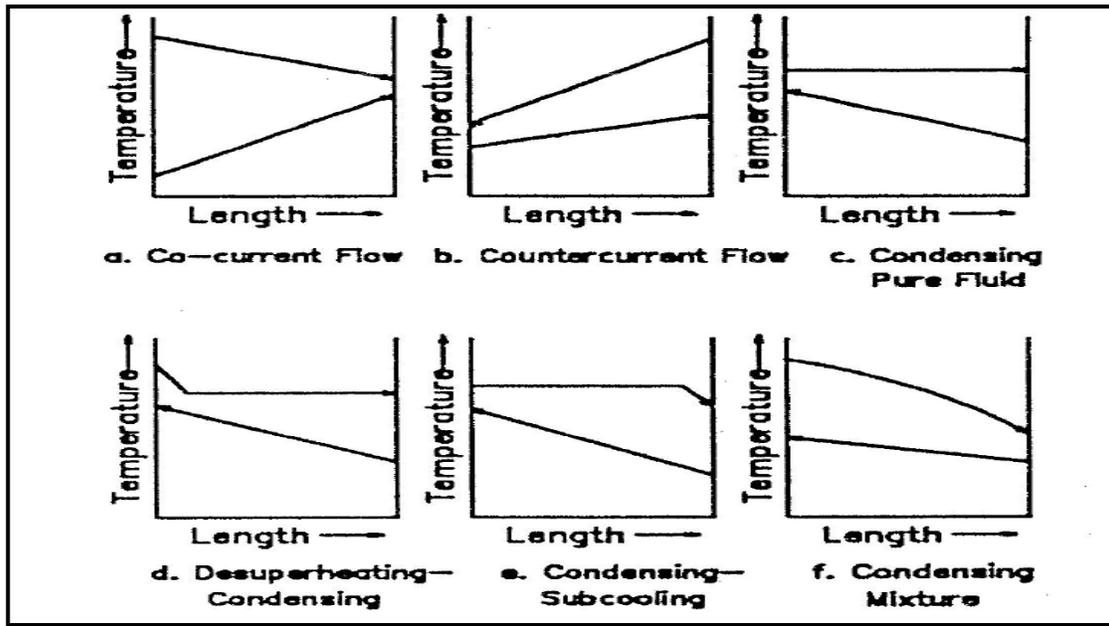


Figura 2.2 Curvas características de evolución de temperaturas en intercambiadores

2.8.2 INTERCAMBIADORES DE TIPO PLACA.

Llamados también intercambiadores compactos. Pueden ser de diferentes tipos:

- Intercambiadores de tipo placa y armazón (*plate-and-frase*) similares a un filtro prensa.
- Intercambiadores de aleta de placa con soldadura (*plate fin*).

Admiten una gran variedad de materiales de construcción, tiene una elevada área de intercambio en una disposición muy compacta. Por la construcción están limitados a presiones pequeñas.

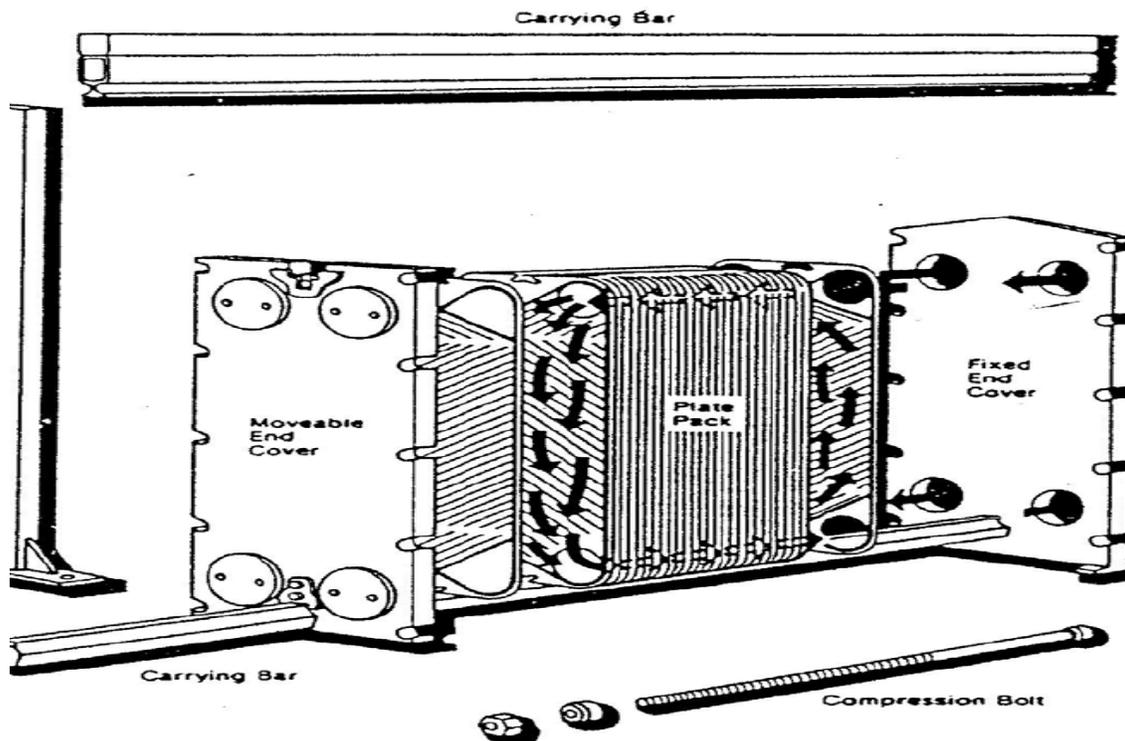


Figura 2.3 Cambiador de Tipo Placa

2.8.3 INTERCAMBIADORES DE CASCO Y TUBO.

Son los intercambiadores más ampliamente utilizados en la industria química y con las consideraciones de diseño mejor definidas. Consisten en una estructura de tubos pequeños colocados en el interior de un casco de mayor diámetro.

Las consideraciones de diseño están estandarizadas por The Tubular Exchanger Manufacturers Association (**TEMA**).

Un intercambiador de calor de casco y tubo conforme a TEMA se identifica con tres letras, el diámetro en pulgadas del casco y la longitud nominal de los tubos en pulgadas.

La primera letra es la indicativa del tipo del cabezal estacionario. Los tipo **A** (Canal y cubierta desmontable) y **B** (Casquete) son los más comunes.

La segunda letra es la indicativa del tipo de casco. La más común es la **E** (casco de un paso) la **F** de dos pasos es más complicada de mantener. Los tipos **G**, **H** y **J** se utilizan para reducir las pérdidas de presión en el casco. El tipo **K** es el tipo de rehervidor de caldera utilizado en torre de fraccionamiento.

La tercera letra nos indica el tipo de cabezal del extremo posterior, los de tipo **S**, **T** y **U** son los más utilizados. El tipo **S** (cabezal flotante con dispositivo de apoyo) el diámetro del cabezal es mayor que el del casco y hay que desmontarlo para sacarlo. El tipo **T** (Cabezal flotante sin contra brida) puede sacarse sin desmontar, pero necesita mayor diámetro de casco para la misma superficie de intercambio. El tipo **U** (haz de tubo en U) es el más económico, pero a la hora de mantenimiento necesita una gran variedad de tubos en stock.

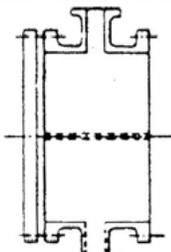
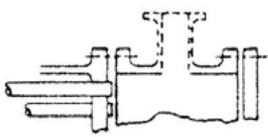
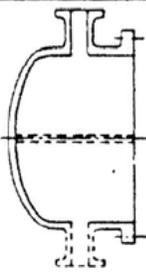
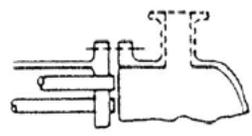
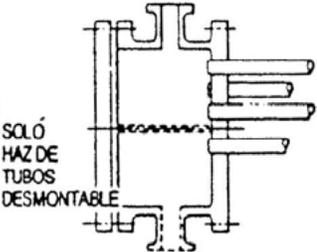
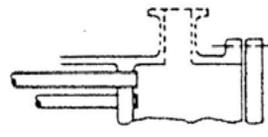
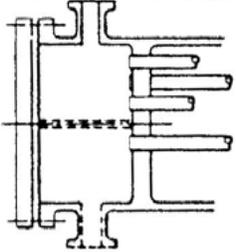
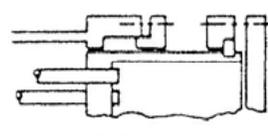
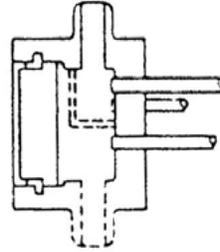
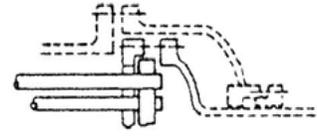
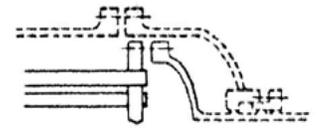
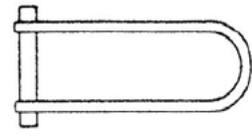
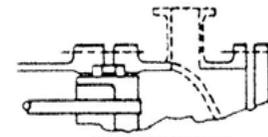
| | TIPOS DE CABEZAL ESTACIONARIO, EXTREMO FRONTAL | TIPOS DE CORAZAS | | TIPOS DE CABEZALES, EXTREMO POSTERIOR |
|----------|--|------------------|----------|--|
| A |  <p>CANAL Y CUBIERTA DESMONTABLE</p> | E | L |  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "A"</p> |
| B |  <p>CASQUETE (CUBIERTA INTEGRADA)</p> | F | M |  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "B"</p> |
| C |  <p>SOLO HAZ DE TUBOS DESMONTABLE</p> <p>CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE</p> | G | N |  <p>DE ESPEJO FLUO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO "C"</p> |
| N |  <p>CANAL INTEGRADO CON ESPEJO Y CUBIERTA DESMONTABLE</p> | H | P |  <p>CABEZAL FLOTANTE CON EMPAQUE EXTERIOR</p> |
| D |  <p>CIERRE ESPECIAL A ALTA PRESIÓN</p> | J | S |  <p>CABEZAL FLOTANTE CON DISPOSITIVO DE APOYO</p> |
| | | K | T |  <p>CABEZAL FLOTANTE SIN CONTRABRIDA</p> |
| | | X | U |  <p>HAZ DE TUBO EN U</p> |
| | | | W |  <p>ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE</p> |

Figura 2.4 Cambiadores de Casco y Tubo

2.9 CLASIFICACION DE INTERCAMBIADORES CASCO Y TUBO

Los intercambiadores de casco y tubo de TEMA descritos a continuación tienen la siguiente descripción de sus componentes principales:

| | | | |
|------|--|------|---|
| 1.- | Cabezal estacionario, canal | 21.- | Cubierta del cabezal flotador, exterior |
| 2.- | Cabezal estacionario casquete | 22.- | Falcón de lamina de cierre tubular del flotador |
| 3.- | Pestaña de cabezal estacionario casquete o canal | 23.- | Brida del prensaestopas |
| 4.- | Cubierta de canal | 24.- | Empaque |
| 5.- | Tobera de cabezal estacionario | 25.- | Anillo seguidor de empaque |
| 6.- | Lamina estacionaria de tubo | 26.- | Anillo de cierre hidráulico |
| 7.- | Tubos | 27.- | Bielas y espaciadores |
| 8.- | Cascos | 28.- | Desviadores de apoyo transversales o placas |
| 9.- | Cubierta de casco | 29.- | Desviadores de choque |
| 10.- | Brida del casco extremo de cabezal estacionario | 30 | Desviador longitudinal |
| 11.- | Brida de casco extremo del cabezal posterior | 31.- | Separación de paso |
| 12.- | Tobera del casco | 32.- | Conexión de ventila |
| 13.- | Brida de la cubierta de casco | 33.- | Conexión de drenaje |
| 14.- | Junta de expansión | 34.- | Conexión de instrumentos |
| 15.- | Lamina de cierre tubular del flotador | 35.- | Albardilla de soporte |
| 16.- | Cubierta del cabezal flotador | 36.- | Talón elevador |
| 17.- | Brida del cabezal flotador | 37.- | Ménsula de soporte |
| 18.- | Dispositivo de apoyo del cabezal r | 38.- | Vertedero |

| | | | |
|------|----------------------------|------|-------------------------------|
| 19.- | Anillo de cizalla dividida | 39.- | Conexión de nivel de líquido. |
| 20.- | Brida de apoyo dividida | | |

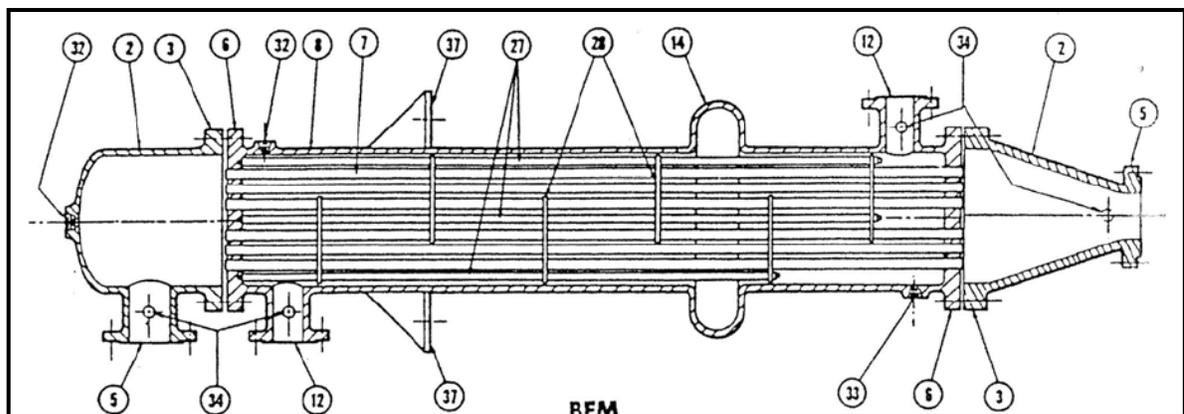
2.9.1 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE INTERNO (TIPO AES)

Es el modelo más común, tiene casco de un paso, tubos de doble paso con canal y cubierta desmontable, cabezal flotante con dispositivo de apoyo. Tiene desviadores transversales y placas de apoyo. Sus características son:

1. Permite la expansión térmica de los tubos respecto al casco.
2. Permite el desmontaje
3. En lugar de dos pasos puede tener 4,6 u 8 pasos.
4. Los desviadores transversales, con el porcentaje de paso y su separación modifican la velocidad
5. El flujo es contracorriente y a favor de corriente en la mitad de los tubos

2.9.2 INTERCAMBIADOR DE LÁMINA Y TUBO FIJO (tipo BEM)

Este intercambiador no tiene apenas diferencia entre ambos extremos, es de un solo paso entubo y casco, lo que limita la velocidad dentro de los tubos, lo que reduce el coeficiente de transmisión de calor. Tiene junta de expansión en casco E.

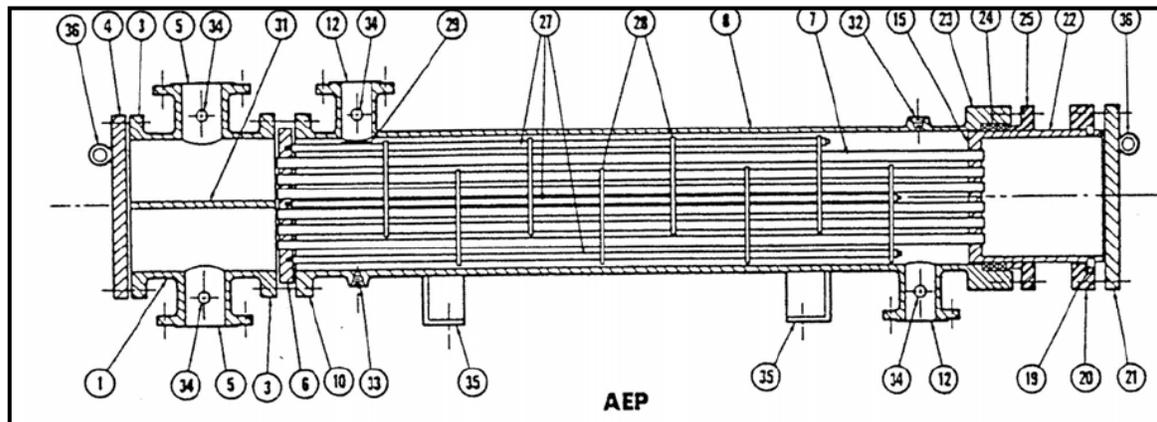


Imposibilidad de apertura para limpieza en lado del casco

Figura 2.5 Intercambiador Tipo BEM

2.9.3 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE EXTERIOR (TIPO AEP)

Este modelo permite cierto movimiento del cabezal flotante y puede desmontarse para limpieza. Tiene el inconveniente de necesitar más mantenimiento



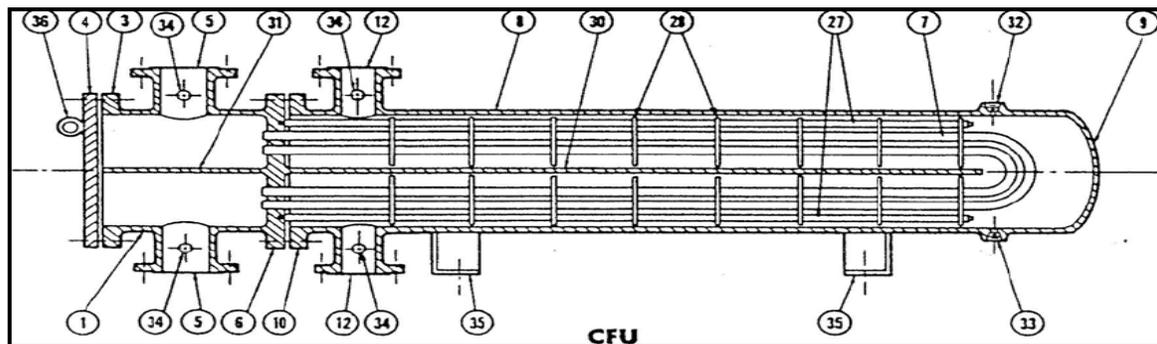
para mantener el empaquetado y evitar las fugas.

Figura 2.6 Intercambiador Tipo AEP

2.9.4 INTERCAMBIADOR DE CABEZAL Y TUBOS INTEGRADOS (TIPO CFU)

Este modelo tiene el conjunto de tubos en U lo que permite un fácil desmontaje del conjunto de tubos.

Tiene el inconveniente a la hora de sustituir un tubo dañado. Tiene el



desviador central unido a la placa de tubos.

Figura 2.7 Intercambiador Tipo CFU

2.9.5 REHERVIDOR DE CALDERA (TIPO AKT)

Este intercambiador se caracteriza por la configuración del casco. El conjunto de tubos puede ser también A-U, dando lugar al AKU. El vertedero a la derecha de los tubos mantiene el líquido hirviendo sobre los tubos. El vapor sale por la tobera superior y el líquido caliente sale por la tobera inferior.

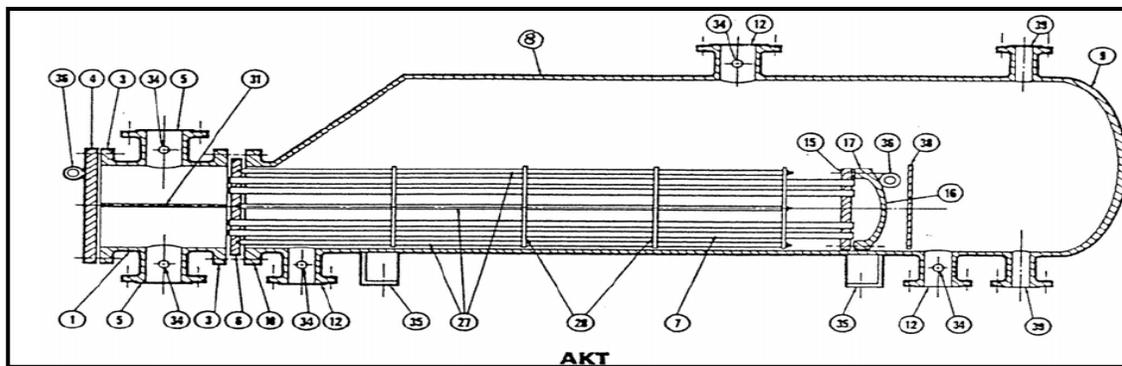
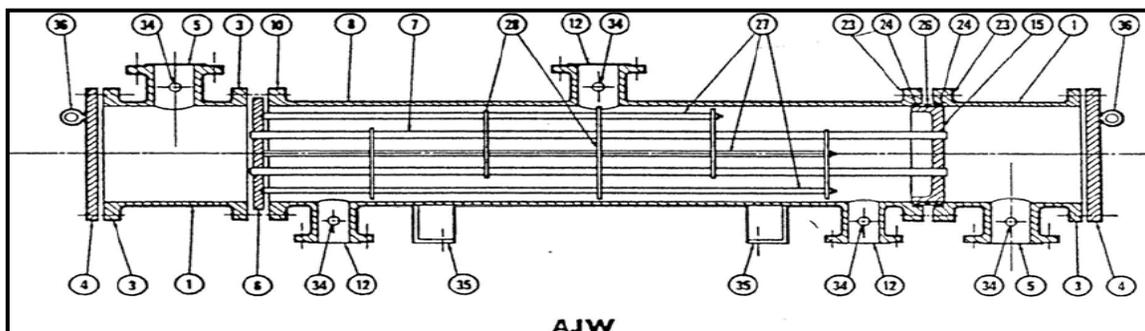


Figura 2.8 Intercambiador Tipo AKT

2.9.6 CONDENSADOR DE FLUJO DIVIDIDO (TIPO AJW)

Se utiliza fundamentalmente para condensar vapores, pues disminuye la pérdida de carga (en un factor de 8). Parte del intercambiador se utiliza como condensador y parte puede utilizarse con enfriador. El desviador central divide el flujo



en dos y el resto de desviadores lo llevan a través de los tubos para enfriarse.

Figura 2.9 Intercambiador Tipo AJW

2.10 DESCRIPCION DE PARTES.

2.10.1 CUERPO (O CARCAZA).

El cuerpo de un intercambiador de calor, generalmente es de forma cilíndrica, aunque pueden existir casos en donde adopten formas especiales.

Los cuerpos se fabrican de tubería hasta un diámetro de 584mm (23") y placa rolada soldada para diámetros mayores.

El cuerpo comprende las placas roladas o tubo, en cuyos extremos van soldadas las bridas donde se montan y fijan las tapas o cabezales. Se carece de estas bridas en aquellos tipos de intercambiadores de calor donde tapas o cabezales van soldados directamente a la carcasa formando parte integral de la misma.

El cuerpo está dotado de boquillas de entrada y de salida del fluido manejado que interviene en el intercambio de calor.

Las variaciones de diseño y forma de carcasas dependen de las necesidades del proceso, recursos económicos y facilidades de mantenimiento.

De ahí que existan cuerpos compuestos únicamente por una envolvente con los espejos soldados formando parte integral de la misma y boquillas. En otros casos lleva instalada un deflector longitudinal para obligar al fluido a hacer dos recorridos a lo largo del cuerpo.

Algunos cuerpos no son cilíndricos en toda su longitud con el fin de lograr un volumen mayor de captación de fluidos vaporizados. Esta vaporización puede ser parcial o total.

Para fluidos que no alcanzan a vaporizar, se cuentan con placas de nivel (vertederos) que los obliga a salir por la boquilla inferior y los vapores salen por la parte superior.

Las carcasas de vaporización total no llevan placas de nivel ni tuberías para el fluido derramado.

2.10.2 HAZ DE TUBOS (FLUXERIA).

Un haz de tubos (fluxes) está compuesto por tubos por donde circula interiormente uno de los fluidos que interviene en la transferencia de calor, soportados entre espejos o placas fijas, o bien entre una placa fija y otra flotante.

Entre los materiales más utilizados para su fabricación se encuentran: el acero al carbono, aceros de baja aleación, acero inoxidable, admiralty, cuproníquel, inconel, metal Muntz, aluminio y el cobre.

Los tubos pueden ser rectos o doblados en “U” (horquilla), utilizando un solo espejo para el haz en este último caso.

De acuerdo con el diseño, el haz puede llevar un deflector horizontal con uno de sus extremos soldados a la cara posterior del espejo estacionario, con el fin de obligar al fluido circulante por el lado del cuerpo, hacer dos recorridos a lo largo del mismo.

El haz de tubos lleva también deflectores transversales repartidos convenientemente a lo largo del haz de acuerdo al diseño. La función de estos

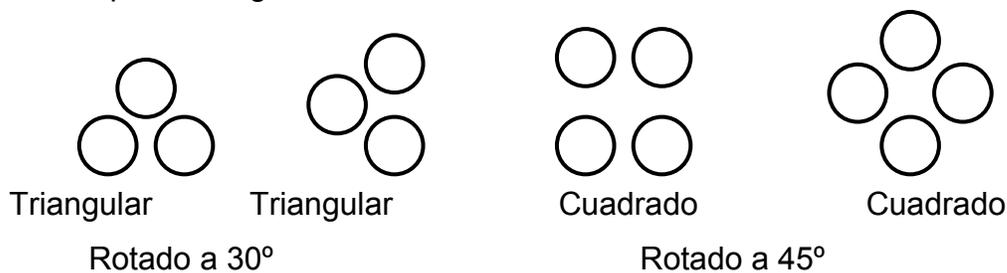
deflectores consiste en obligar al fluido a cambiar de dirección constantemente y, por lo tanto, a pertenecer más en contacto con las superficies de transferencia de calor. Los deflectores están soportados por tirantes de varilla que se fijan en agujeros roscados, localizados en la cara posterior del espejo estacionario y espaciados adecuadamente, y sostenidos en su lugar por medio de separadores tubulares del mismo material, diámetro y espesor de, los tubos.

El haz lleva una placa de choque, normalmente instalada sobre, los tubos, localizada coincidiendo con la entrada del flujo en el cuerpo. Esta placa además de evitar el choque directo del flujo sobre los tubos, lo amortigua, evitando vibraciones en los mismos y proporciona una distribución uniforme del flujo en ese lugar

2.10.3 ARREGLO DE TUBOS.

El arreglo de tubos en los espejos puede ser como sigue:

- De paso cuadrado a 90° .
- De paso cuadrado girado a 45° .
- De paso triangular, o tresbolillo como también se conoce.
- De paso triangular rotado a 30°



La ventaja del paso cuadrado sobre el triangular, es que la limpieza del haz por fuera de los tubos puede efectuarse con un 100% de efectividad, y la caída de presión es menor.

El paso triangular normalmente es recomendado donde los fluidos manejados por el lado del cuerpo son limpios. No debe ser empleado donde se requiera limpiar mecánicamente el haz por el exterior de los tubos.

El arreglo cuadrado se recomienda cuando el fluido que circula fuera de los tubos sea sucio o donde la caída de presión por el lado de la carcasa o envolvente

este muy limitado, además de que se pueden llevar a cabo la limpieza mecánica tanto como la química.

El paso, en cualquier arreglo de tubos en los espejos, es la diferencia entre centros.

En general cuando se diseña la distribución de los tubos en un cambiador, lo que se busca es obtener una mayor área de transferencia de calor con los tubos contenidos en el área seccional dada, pero a su vez permitir la limpieza interior y exterior de los tubos

2.10.3.1. ESPEJOS.

Son placas circulares que son barrenadas y ranuradas para a colocación de tubos, los empaques, varillas tensoras y el circulo de espárragos (tornillos) para que embone con la envolvente. Los tubos son sostenidos en su lugar al ser insertados en los orificios practicados a los espejos y posteriormente son rolados o soldados a este.

El espejo, en adición a sus requerimientos mecánicos, deberá soportar el ataque corrosivo de ambos fluidos y deberá ser electroquímicamente compatible con el material de los tubos y el material del carrete (cabezal). Normalmente se construyen de acero inoxidable cuando se va a trabajar con fluidos oxidantes, corrosivos y a altas presiones, aunque algunos espejos se hacen de acero al carbono con una capa delgada de aleación resistente a la corrosión.

Los espejos donde se fijan los tubos son de dos tipos:

- Estacionario o fijo.
- Flotante.

El espejo estacionario o fijo, recibe este nombre por su colocación, debido a que permanece estacionario al fijarse con el cuerpo por medio del acoplamiento del cabezal frontal.

El espejo flotante debe su nombre al quedar libre en un extremo dentro del cuerpo, absorbiendo las dilataciones del material por efecto de la temperatura; su diámetro es ligeramente menor que el diámetro interior del cuerpo.

Los intercambiadores de calor diseñados de varios pasos para circulación del flujo por dentro de los tubos, llevan una tapa o cabeza flotante que se fija

directamente al espejo por medio de espárragos (tornillos), o también puede fijarse por medio de un anillo bipartido de acoplamiento diseñado especialmente.

2.10.4. DEFLECTORES O MAMPARAS.

Son placas metálicas que se les da un contorno circular y tienen dos funciones una de ellas es soportar los tubos en la posición apropiada durante su ensamble y operación, previendo la vibración de los tubos causada por remolinos en el flujo y la otra función es, guiar el flujo de la envolvente en forma transversal al haz de tubos, aumentando la velocidad y el coeficiente de transferencia de calor.

Para lograr coeficientes de transmisión de calor altos, es necesario mantener al flujo en turbulencia por fuera de los tubos (lado del cuerpo). Para provocar esto, es necesario utilizar placas deflectoras que obliguen al flujo a circular a través del cuerpo formando ángulos rectos con respecto a los ejes de los tubos.

Estos deflectores o mamparas, trabajan conjuntamente con el haz de tubos y el cuerpo, y van colocados transversalmente al haz distribuido adecuadamente en toda su longitud.

Los tipos de deflectores más utilizados son:

- Deflector de un segmento.
- Deflector de dos segmentos.
- Deflector de tres segmentos.

La separación entre deflectores es mantenida por medio de espaciadores tubulares colocados concéntricamente entre los tirantes de varilla de acero. Los tirantes se fijan en agujeros roscados que se localizan en la cara posterior del espejo estacionario, y en el otro extremo se fijan por medio de tuercas a placas-soporte.

2.10.5. CABEZALES.

Estas partes conocidas como cabezales frontales y cabezales posteriores, generalmente son referidas como carretes y tapas del cuerpo respectivamente, actúan conjuntamente con la carcasa para que el fluido manejado circule por dentro y fuera de los tubos de acuerdo a las necesidades del proceso. Estos cabezales van instalados en los extremos del cuerpo y los tipos más comunes son:

1. Cabezal separado con tapa: este tipo es muy utilizado por la ventaja que representa para efectuar una revisión rápida y accesible por dentro de los tubos con solo desmontar la tapa; lleva una brida en cada extremo para acoplarse al cuerpo y fijar su tapa; y boquillas para entrada y salida del flujo circulante dentro de los tubos.
2. Cabezal con tapa fija y con casquete semi-elíptico: este cabezal es necesario desmontarlo de la carcasa para inspeccionar y limpiar por dentro de los tubos. Llevan una brida para acoplarse al cuerpo, y boquillas de entrada y salida de flujo circulante.
3. Cabezal integrado al espejo: este tipo tiene la característica de estar soldado al espejo de un haz de tubos doblados en “U” (horquilla), removible para trabajos de limpieza y reparación. Su tapa es desmontable, lo que permite accesibilidad a inspecciones y trabajos de reparación y limpieza.
4. Cabezal integrado al cuerpo: Con la variante de que forma parte de una unidad integral donde el haz de tubos no es removible. Por tener tapa desmontable, permite inspeccionar, limpiar y reparar por dentro de los tubos.

2.10.6 TIRANTES Y ESPACIADORES.

La función principal de los tirantes y espaciadores, consiste en fijar y mantener en su posición a los deflectores y placas-soporte para que trabajen estructuralmente con el resto del haz.

2.10.7 PLACAS DE CHOQUE.

Consiste en una placa que se instala sobre el haz de tubos, coincidiendo con la boquilla de entrada del flujo, para que el chorro no golpee directamente sobre los tubos y los dañe, y para lograr una distribución uniforme del flujo en ese lugar. El material y dimensiones dependen de la condiciones de diseño.

2.10.8 PLACAS PARTIDORAS DE PASOS (DEFLECTORES DIVISORES DE PASOS).

Estas placas o deflectores, se instalan en el cabezal y en la tapa flotante en cantidad y disposición de acuerdo al diseño, para lograr las condiciones de intercambio de calor requeridas por el proceso.

2.10.9 BRIDAS.

Son partes de acoplamiento de tuberías, válvulas, conexiones, torres de proceso, recipientes a presión, tanques de almacenamiento, etc.; así como de tapas, cabezales, carcasas de intercambiadores de calor.

Existen diversos tipos de bridas, siendo las más comunes las siguientes:

- Integral.
- De cuello.
- Deslizable.
- De traslape.
- Roscada.
- Ciega.

Las bridas que se utilizan en intercambiadores de calor para acoplamiento de tapas y cabezales al cuerpo, se conocen como bridas clase TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), fabricadas con normas de diseño establecidas por la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores de Calor, comprendidas en dos clases.

- Bridas de cuello soldable.
- Bridas de anillo.

2.10.10 BOQUILLAS.

Las boquillas de conexión generalmente son del tipo de cuello soldable, o fabricada de tubería y bridas del mismo tipo. Van instalados radialmente al cuerpo y a cabezales.

Las boquillas con diámetro de 1 ½" (38mm) o mayor, deben llevar una conexión (cople) de ¾" (19mm) de diámetro, instalado en posición horizontal para termómetro.

2.10.11 JUNTAS (EMPAQUES).

Los intercambiadores de calor, tienen partes bridadas que se acoplan a otras por medio de espárragos (tornillos); tales como: tapa del cabezal frontal, cabezal frontal al cuerpo, haz de tubos al cuerpo, tapa flotante al espejo flotante, cabezal posterior al cuerpo, boquillas a tuberías, etc.

Las normas de diseño para recipientes a presión comprenden hasta las bridas pero el procedimiento de fabricación, forma de las caras de las bridas, y selección de

las juntas (empaques), queda a criterio del fabricante quien debe ajustarse invariablemente a las condiciones del diseño.

La junta o empaque debe llenar los siguientes requisitos:

- Soportar las condiciones operacionales de la unidad.
- Ser de fácil manejo.
- De adquisición accesible.

Las juntas pueden ser: metálicas sólidas, cartón de asbesto comprimido, cartón de asbesto comprimido reforzado con malla de acero, metálica con doble camisa rellena con asbesto, etc.

Para seleccionar una junta, deben ser considerados tres factores:

- la fuerza que se aplica a los espárragos.
- La presión y temperatura internas.
- Las características del fluido por sellar.

2.10.12 ESPARRAGOS.

Son tornillos sin cabeza, con rosca corrida en toda su longitud; normalmente son utilizados con dos tuercas para armado y acoplamiento de partes y ensamblado de equipos.

2.11 DEFINICIÓN DE MANTENIMIENTO

MANTENIMIENTO: Es el conjunto de actividades que es necesario desarrollar para conservar equipos, unidades e instalaciones óptimas de servicio, prolongar su vida útil y sostener su operación al máximo nivel de eficiencia y el menor costo.

2.12 OBJETIVO DEL MANTENIMIENTO

Los objetivos del mantenimiento son: técnico y económico. El concebir a la infraestructura instalada como medio y no solo como un fin permitirá orientar adecuadamente los trabajos de mantenimiento que sobre ella se realicen, pendiente a la conservación del servicio y de la calidad de servicio.

Si un aparato o dispositivo es creado de tal forma que proporciona un servicio con la calidad suficiente para dar satisfacción a una necesidad, es lógico pensar que este fue diseñado adecuadamente, esto es, que todos sus componentes cumplen una función y todos serán necesarios, por lo que mientras la necesidad que le dio

origen no se modifique, las labores de la entidad encargadas del mantenimiento, orientadas a la conservación de las propiedades físicas de un aparato deberán mantener adecuadamente la calidad del servicio que éste presta .

Considerando que es el servicio el que mantiene y las máquinas las que se reparan. Los objetivos del mantenimiento son:

1. Lograr la máxima disponibilidad de la infraestructura instalada.
2. Operaciones correctas y eficientes de los equipos.
3. Lograr largas corridas de operación a máximas producciones de calidad aceptable.
4. Operación segura con mínimos riesgos.
5. Adecuado aprovechamiento de los recursos.
6. Conservar en el almacén inventarios de repuesto y accesorios en un nivel óptimo.
7. Minimizar el costo del mantenimiento sin deteriorar la calidad del mismo.

Como se ve no es un departamento de servicio, mucho menos un taller auxiliar que trabaja y obtiene resultados en forma aislada del resto de la organización.

2.13 ACTIVIDADES DEL MANTENIMIENTO

Actualmente existen métodos y procedimientos para realizar un mantenimiento. Se enumeran algunos puntos para realizar cualquier tipo de mantenimiento.

1. Seleccionar y adiestrar al personal calificado para que se lleven a cabo los distintos deberes y responsabilidades de la función proporcionando reemplazo de trabajadores calificados.
2. Planear y programar en forma conveniente la labor de mantenimiento.
3. Disponer la relevación de máquinas y / o equipos para poder realizar las labores de mantenimiento planeado
4. Iniciar y sostener los programas de conservación para la adecuada utilización de aceites y lubricantes.
5. Preparar estadísticas para su incorporación a los procedimientos y normas de mantenimiento.

6. Solicitar herramientas, accesorios y todo el equipo necesario para lograr un buen desempeño del mantenimiento.

2.14 FUENTES QUE ORIGINAN FALLAS EN EL EQUIPO

Normalmente las fallas que se originan en un equipo o maquinaria son ocasionadas en general por las siguientes fuentes.

1. **La maquinaria:** Se vuelve una fuente más o menos importante de fallas, dependiendo de las propiedades de sus partes y de la bondad del diseño.
2. **Los métodos de trabajo:** Inadecuado o la ausencia de ellos provoca que las intervenciones se realicen con diferentes criterios, dependiendo de las personas que efectúen la operación o el mantenimiento, afectando al personal y equipo y su correspondiente servicio.
3. **Personal de mantenimiento:** Cuando se conocen o no tienen las habilidades para operar o mantener el equipo o maquinaria esto se traduce en fallas de los mismos.
4. **La materia prima:** Afecta al equipo cuando sus especificaciones no corresponden a las indicaciones dadas en proceso.
5. **La administración :** Incluye de manera determinante en las condiciones de los equipos, podemos mencionar una mala supervisión, falta de programación de mantenimiento, falta de partes de repuestos, falta de recursos económicos, etc.
6. **El medio ambiente:** También es un factor muy importante que afecta el funcionamiento de los equipos y maquinarias, por ejemplo: la corrosión, humedad, temperatura.

Todas las fuentes de fallas mencionadas, nos obligan a intervenir en mayor o menor grado, en el equipo bajo nuestra responsabilidad para darle mantenimiento y dejarlo en condiciones óptimas de funcionamiento.

2.15 CLASIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO

Los criterios de clasificación de los tipos de sistema de mantenimiento, son variados. No obstante, se puede establecer una división sistemática la cual consiste en dividir el mantenimiento en tres importantes métodos técnicos.

1. Mantenimiento predictivo

2. mantenimiento preventivo
3. Mantenimiento correctivo

2.16 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La técnica de descubrir el equipo en términos de una curva de vida - falla, es la base de este tipo de mantenimiento. Su principal objetivo es el de localizar donde aumentó considerablemente la frecuencia de falla. Agrega técnicas científicas avanzadas para aumentar los tiempos de operación y eliminar los trabajos innecesarios. El equipo se trabaja justo antes de la falla. Se toman medidas preventivas solo en equipos cuya falla puede crear un riesgo serio o cuyas operaciones sean especialmente críticas.

Esta técnica trae consigo un ahorro sustancial, ya que pueden identificarse las corridas del tiempo del equipo y el trabajo de reparación puede llevarse a cabo justamente antes de la falla, con lo que se puede alargar el tiempo entre “paradas” y eliminar el trabajo de reparación demasiado temprano o demasiado tarde.

2.17 BASES PARA ESTABLECER EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Para establecer el Mantenimiento Predictivo deben cumplirse los siguientes aspectos en los programas de Mantenimiento a Cambiadores de Calor:

1. Establecer las necesidades de mantenimiento para todos los equipos del acercamiento crítico contra el no crítico.
2. Determinar la programación del Mantenimiento Óptimo.
3. Sistematizar la colección y almacenamiento de los datos mediante el establecimiento de historia clínica de cada uno de los equipos.
4. Controlar y evaluar constantemente la eficiencia de mantenimiento.

El Mantenimiento Predictivo del Cambiador de Calor se habrá de establecer de acuerdo con la siguiente consideración.

CENSO: Se debe contar con los datos de placa del Cambiador de Calor.

DATOS Y LECTURAS: El tipo de lectura o datos que deberá tenerse del Cambiador de Calor como una previsión técnica de falla y donde debe ser formada de acuerdo con los siguientes datos técnicos de diseño:

1. General, para cualquier defecto exterior visible.
2. De fugas de conexiones, cuerpo, carretes, tapas, bridas, etc.

3. De condiciones de soporte o estructuras.
4. De condiciones de alineamiento y protección.
5. De condiciones operacionales.
6. De calibración de espesores.

Una inspección visual es generalmente aceptable para los incisos 1, 2, 3 y 4.

Para determinar las condiciones de operación se requiere:

Tomar lecturas de temperaturas a través de termo pozos instalados en las boquillas de entrada y salida de fluidos que pasan por el interior y exterior de los tubos.

Tomar lecturas de caídas de presión entre salidas y entradas de los fluidos, tanto por el exterior como por el interior de la tubería.

Para la determinación de espesores se requiere:

Cuando el Cambiador se encuentra en operación, calibrar diversos puntos del cuerpo, carretes, tapas y boquillas.

Cuando el Cambiador se encuentra desarmado, calibrar los diferentes componentes del equipo, (cuerpo, tubos, mamparas, deflectores, espejos, placas de choque, etc.).

FRECUENCIA: Es necesario establecer con qué frecuencia y mediante que medios se tomarán las lecturas en el equipo, se recomienda lo siguiente:

1. Las lecturas de temperaturas se tomarán cada 15 días por medio de termómetros bimetálicos.
2. Las lecturas de caída de presión se tomarán con la misma frecuencia que las temperaturas mediante manómetros diferentes.
3. Las lecturas de espesores desde el exterior se tomarán cada 2 ó 3 meses con un instrumento adecuado ultrasónico.
4. Las lecturas de los diferentes componentes del Cambiador se tomarán cada vez que se desarme previa programación mediante Compases, Vernier y Micrómetros.

INTERPRETACIÓN: Las temperaturas y caídas de presión se toman y registran en el formato No. 1, por los operadores que en cada planta designe el Ingeniero de Operación y deberán ser interpretados por Ingenieros de Proceso, Mantenimiento e Inspección. . Las lecturas de calibración de espesores serán tomadas y registradas

en un formato por personas designadas por el Ingeniero de Inspección y deberán ser interpretadas por los Ingenieros de Mantenimiento e Inspección.

2.18 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Definido como una sustitución de parte, es utilizado para prevenir falla, alargar la vida de operación del equipo por medio de inspecciones programadas y reemplazo periódicos de las partes. Este tipo de mantenimiento, algunas veces puede dar margen a problemas, Originando además gastos extras por cambio prematuro y sacrificio de las últimas horas de vida útil de las partes reemplazadas. Por lo tanto, es algo en lo cuál fácilmente se cae en las exageraciones y abusos.

2.19 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Es un método antiguo que consiste en permitir que el equipo opere hasta la falla. Aunque requiere poca planeación, es inaceptable como sistema en las plantas industriales grandes, pues todos los trabajos se llevan a cabo sobre la base de la emergencia que provoca un deficiente empleo de la mano de obra y material inadecuado.

Sin embargo este tipo de mantenimiento resulta ser más usual en la industria mediana y chica, debido a que no es necesario un sistema moderno de organización, pues su función es la de corregir fallas en los equipo y efectuar reparaciones parciales o totales cuando así se requiere.

Es un conjunto de actividades que es necesario desarrollar para la reparación o corrección de daños.

Seis razones por las que falla un Cambiador de Calor son:

1. Suciedad excesiva.
2. Aire o gas dentro del Cambiador, resultado de instalación inadecuada de líneas, o carencia de venteo.
3. Condiciones de operación diferentes a la que se diseña.
4. Mala distribución de los flujos de la unidad.
5. Excesiva holgura entre los baffles y los tubos, generalmente debido a la corrosión.
6. Diseño térmico inadecuado.

Usualmente las causas para sacar de operación un Cambiador de Calor son:

1. Caída de presión excesiva.

2. Pérdidas de eficiencia que afecta la operación de la unidad.
3. Contaminación por fuga.
4. Fuga hacia el exterior excesiva.
5. Fin de su vida útil en récords anteriores.

La caída de presión excesiva y la pérdida de eficiencia, son el resultado de la impureza que puede circular con el fluido, mientras que la contaminación de un fluido con el otro se debe generalmente a la corrosión. Sin embargo la inadecuada operación de un cambiador al arrancar o parar una planta, puede también ser causa de contaminación o fuga al exterior, aunque esta última puede ser también debido a fallas por defectos mecánicos. De lo anterior se deduce que podemos dividir en tres grandes grupos al estudio de las causas que motiva la reparación o limpieza de un Cambiador de Calor.

1. Por la corrosión.
2. Por la acumulación de sustancias extrañas.
3. Por mala operación.

La corrosión puede ocurrir en cualquier parte de un Cambiador y la intensidad de la misma está directamente relacionada con la concentración de los agentes corrosivos de los fluidos así como a la resistencia a la corrosión de los materiales con que fueron construidos.

No de los principales agentes corrosivos es el azufre que se encuentra en los hidrocarburos bajo la forma de sulfuro de hidrógeno o mercaptanos en los procesos de refinación del petróleo y petroquímico. Ataca con facilidad las superficies de aleaciones de cobre, adelgazándolas.

El sulfuro de hidrógeno ataca al acero al carbón cuando existen temperaturas superiores a 500°F y a baja temperatura si está presente la humedad.

Otro importante agente corrosivo es el ácido clorhídrico. Prácticamente todos los aceites crudos contienen agua salada con cloruros de calcio, magnesio y sodio, entre otras muchas sales. Cuando esta agua salada es calentada a temperaturas entre 300 y 400°F, se forma ácido clorhídrico por un proceso llamado hidrólisis. Primeramente se forma cloruro de hidrógeno que solo es corrosivo en presencia del agua con la que si forma el ácido clorhídrico.

El agua es un agente corrosivo por sí solo cuando lleva sólidos en suspensión causando erosión cuando pasa con fuerza a través de espacios pequeños. Cuando se usa

vapor de agua como medio de calefacción en los calentadores y evaporadores, el condensado puede depositar incrustaciones dentro de los tubos. El CO₂ o Bióxido de carbono y el oxígeno que contiene el condensado son causas principales de corrosión que se puede controlar mediante tratamiento de aguas.

Acumulación de Sustancias Extrañas en los Cambiadores de Calor: La caída De presión excesiva y la pérdida de eficiencia en los Cambiadores de Calor son el resultado de las impurezas que pueden circular con los fluidos.

Las sustancias extrañas que se acumulan en el interior de los Cambiadores de Calor pueden dividirse en dos grupos:

1. Sustancias que circulan con el producto.- Estas sustancias son generalmente de dos clases, que son las conducidas por el crudo que llega a las plantas de proceso y que han existido con los yacimientos petrolíferos o que las han adquirido durante el transporte y aquellas sustancias olvidadas en el interior de las torres y recipientes durante las reparaciones tales como estopas, trapos, restos de electrodos de soldadura y las sustancias químicas que forman parte del proceso o tratamiento de las gasolinas, como son granos y polvos de catalizadores que son arrastrados por el fluido al pasar por los reactores y recipientes de tratamiento a los Cambiadores de Calor.

2. Sustancias que Circulan en el Aire.- Muchos de los Cambiadores, se emplean como Enfriadores y Condensadores, utilizando las aguas de los ríos, lagos, etc., como se sabe el agua del río conduce toda clase de restos orgánicos e inorgánicos que son succionados en grandes cantidades por las bombas. Todas estas sustancias, todas estas sustancias se van acumulando poco a poco hasta llegar a tapar los tubos cuando circulan por el interior de éstos o se detienen entre el haz cuando circulan por la carcasa.

Efectos de la Mala Operación de los Cambiadores de Calor. Los fluidos deben ser conducidos al interior de los tubos y carcasa de tal manera que primero se introduzca el fluido frío y posteriormente y poco a poco el fluido caliente, para evitar choques térmicos y mal funcionamiento posterior del equipo.

Esto es muy importante particularmente cuando los gradientes de temperatura de operación son grandes. La aplicación súbita de las altas temperaturas causa desigual dilatación en los tubos y ello puede ocasionar fugas u otros daños. Los cambios bruscos de temperaturas, aflojan los espárragos o tornillos y separan las juntas.

Medida Preventiva: En Cambiadores de Calor de varios pasos, la temperatura varía entre ellos, de esta manera varía también la dilatación de los tubos en los diferentes pasos. Los Cambiadores están diseñados de tal forma que los esfuerzos producidos por estas diferencias de expansión están dentro de los límites de seguridad cuando se trabaja a temperatura normal del equipo.

Para ello se usa pasta Garlock roja del tipo "A" y se acostumbra reapretar el equipo una vez que alcance su temperatura de operación.

2.20 SECUENCIA DEL DESARMADO DE UN CAMBIADOR DE CALOR EN LAS PLANTAS DE PROCESO

El mantenimiento de los Cambiadores de Calor en las plantas de operación se realiza de acuerdo a la siguiente secuencia:

Cuando en alguna planta de proceso surge algún problema o necesidad que determine la reparación y limpieza de un Cambiador. El grupo coordinado del sector de operación elabora una solicitud de trabajo al personal de mantenimiento.

Existe un reglamento de órdenes de trabajo, en estos formatos se finca con precisión la responsabilidad del personal que interviene en la elaboración, ejecución de obra y en la autorización de las órdenes de trabajo.

En general tiende a agilizar el trámite administrativo para la ejecución de las obras y además permitirá a los niveles de organización ejercer un control adecuado.

La aplicación separa en dos grupos su relación de órdenes de trabajo.

1. El grupo de órdenes que se entrega al personal de mantenimiento.
2. El grupo de órdenes entregados al taller para la reparación de piezas.

La solicitud ya elaborada se entrega al personal de mantenimiento y bien planea y programa los trabajos de campo determinando el tiempo según los recursos existentes tanto humanos como materiales y es cuando se debe trabajar por medio de la ruta crítica.

Mantenimiento solicita el pedido de personal de campo de acuerdo con la planeación y a través de Asesoría Técnica de Materiales solicita el trabajo de ensamble (espárragos, tuercas, juntas, soportes, instrumentos y conexiones roscadas) y entrega al taller por medio de una orden de taller la reparación, limpieza y prueba del equipo.

Previa colocación adecuada de andamios se procede a la colocación de las juntas ciegas, estas deberán ser de lámina lisa y suficiente espesor que garantice hermeticidad durante la prueba hidrostática, se deberán tomar todas las medidas de seguridad.

Quitar tapa a carrete, carcasa y carrete posterior.- Todas las tapas deberán contar con orejas de carga y deberán inspeccionarse las soldaduras antes de cualquier maniobra. Deberán dejarse cuando menos 4 espárragos opuestos diametralmente para ser quitado hasta que el estrobo de carga sea cuidadosamente tensado sin ejercer demasiado esfuerzo. Ya tensado el estrobo de carga se aflojan los espárragos finales sin quitar las tuercas, deberán ser despegadas las tapas por medio de sus tornillos extractores o con gatos para bridas, la costumbre de palanquear con tubos o barretas en la abertura de unión deberá desecharse ya que un movimiento brusco daña las juntas. Una vez despegada la tapa hay que inspeccionar la junta para ver si se encuentra desprendida de sus dos caras de asiento, puede ser retirada o si se encuentra adherida a una sola cara y no se dañará al quitar totalmente la tapa, si se encuentra adherida a sus dos caras en zonas diferentes debe despegarse con rasqueta en la totalidad de una de sus caras, hecho lo anterior se puede retirar la tapa.

Se realiza el mismo trabajo para la tapa posterior.

Quitar el Carrete.- Quitar esta pieza con dos estrobos suficientemente largos para librar la tubería que sale de la boquilla superior, para quitar los espárragos y cuidar la junta.

Sacar el núcleo.- Esta actividad implica una cuidadosa maniobra cuyos pasos se dan a continuación:

- a) Colocar el riel o vigueta de extracción en el espejo frontal fijado fuertemente a este por medio de sus espárragos que se introducen en los barrenos roscados que para tal efecto deben tener todos los Cambiadores de Haz Removible. Entre el riel de extracción y el espejo, deberá colocarse una tira de lámina de hule semiduro con un ancho de 1.5 veces el ancho del riel para que no se dañen los extremos de los tubos.

- b) En el centro del riel se colocará un grillete de tamaño adecuado al peso del haz, para que ahí se enlace el extremo del cable del malacate que deberá comunicar el jalón. Cuando convenga y sobre todo en los Cambiadores Elevados el jalón del malacate no irá directo, sino a través de una polea ijada en un poste de tubería rellena de concreto que se insertará verticalmente en los hoyos que se encuentran en el piso frente a cada Cambiador. En los Cambiadores más altos montados sobre estructuras metálicas se hará necesario por lo menos dos poleas, una en el piso frente al malacate y la otra al nivel del centro del Cambiador frente a éste. Deberá tenderse un cordón de seguridad que proteja el área de maniobra para evitar un accidente por algún reventón del cable.
- c) El jalón del malacate deberá ser lento y constante hasta que el Haz sobresalga de la carcasa una distancia de tres veces el ancho de cinturón de carga (eslinga), que se usará para cargarlo. Si el Haz no cede al jalón se emplea un gato hidráulico en la parte posterior de la carcasa, se empuja el Haz por el centro del espejo posterior a través de una placa metálica y lámina de hule semiduro. En este caso una sola persona deberá coordinar el jalón del malacate y el empujón del gato. Si el Haz no cede se recomienda un lavado químico por fuera de los tubos antes de volver a intentar la extracción.
- d) Cuando el Haz se encuentra afuera tres veces el ancho de la eslinga, se colocará éste, suspendiéndolo por medio de una grúa, la cual se situará en posición tal que pueda girar la pluma cargando el Haz, mientras se continúa extrayendo de la carcasa.
- e) Cuando con auxilio del malacate y grúa, se tenga el Haz fuera de la carcasa una distancia de 0.5 veces la longitud de los tubos más tres veces el ancho de la eslinga, se suspenderá la extracción del núcleo. En este punto se apoyará el espejo frontal en un banco adecuado de soporte que permite librar de la carga a la grúa.
- f) Ya apoyado el haz en sus espejos, el frontal en un soporte y el posterior aún dentro de la carcasa, la eslinga debe llevarse a una posición cuya línea de acción pase por el centro de gravedad del Haz. Este deberá estar situado no precisamente a la mitad de la longitud del Haz, sino ligeramente cargado hacia el

espejo de mayor peso. Cuando se carga un Haz con su tapa flotante colocada, deberá tomarse en cuenta el peso de ésta y el peso de los espárragos.

- g) Con el cinturón de carga en el centro de gravedad del Haz, la grúa sola se, encargará de extraer totalmente el haz, colocándolo sobre el carro especial de transporte, si se va a llevar al taller o sobre soportes (bancos o durmientes) que reciban los bafles del Haz. Nunca se debe permitir que los soportes lastimen a los tubos. Los espejos deben quedar libres para cualquier intervención posterior sobre ellos.
- h) En los Cambiadores que cuentan con instalación fija de monoriel y diferenciales, se usarán dos eslingas, uno para cada diferencial. En estos casos el sostenimiento del haz durante su extracción, es diferente a lo anteriormente, ya que los diferenciales, además de repartirse el peso del Haz pueden viajar a lo largo del monoriel, solo hay que cuidar que el centro de cada eslinga se coloque a una distancia del espejo más cercano de 1.5 a 2 veces el ancho de ellos.

Una vez que se ha extraído el núcleo, ingresa al taller de Cambiadores de Calor y se procede a la limpieza del núcleo y posteriormente a la reparación y/o reposición de partes.

CAPÍTULO III

CAPITULO III.- METODOLOGIA PARA ESTUDIAR EL ENSUCIAMIENTO EN LOS CONDENSADORES DE AMONIACO

3.1 ANÁLISIS DE LA LIMPIEZA DE LOS CONDENSADORES DE AMONIACO.

No se tiene referencias técnicas de la proporción en que se ensucia el cambiador de calor denominado Condensador de Amoniaco identificado como 127-C1 en la Planta de Amoniaco No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque, para determinar su limpieza y mantenimiento; tomándose de sus parámetros operativos, así como las propiedades físicas de los fluidos. Lo anterior basados en métodos matemáticos asociados a la transferencia de calor y de esta manera alcanzar un aprovechamiento de la temperatura de los fluidos que circulan por su interior de tal manera que su funcionamiento sea el más eficiente al proceso de la planta.

Actualmente se aplican mantenimientos programados basados únicamente en frecuencias de tiempo para proporcionarles su limpieza y recuperar su servicio sin tomar los valores para su medición.

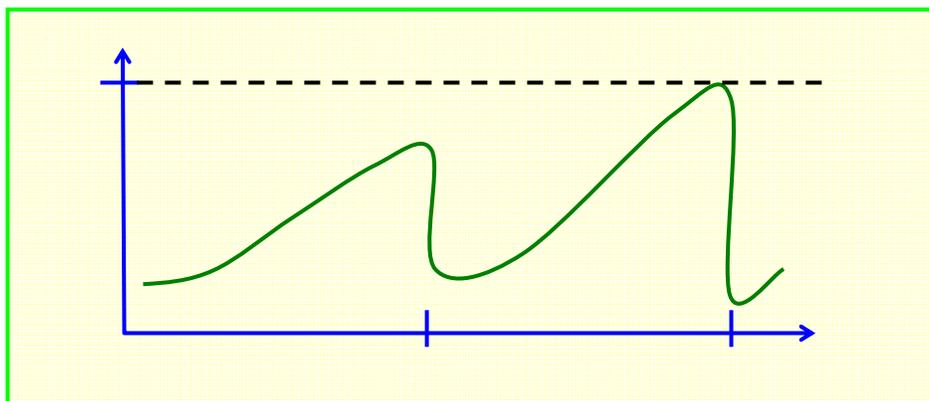


Figura 3.1 Comportamiento esperado de las intervenciones de Mantenimiento actual en los Condensadores de Amoniaco.

Determinar oportunamente el comportamiento y la tendencia del Coeficiente total de transferencia de calor y su caída de presión, permitirá al proceso de esta planta evitar paros imprevistos y/o problemas de incremento de presión del sistema de refrigeración y por consecuencia deberá contribuir de manera positiva en sus índices energéticos.

Las variables de investigación de los condensadores de Amoniaco son:

1. Coeficiente de ensuciamiento,
2. Temperatura y Presión de salida de Amoniaco,

3. Temperatura y Presión de Entrada y Salida de Agua de Enfriamiento.

4. Flujo de Amoniaco y Agua de Enfriamiento.

Además estas variables servirán para estudiar la correlación que se tienen entre sí, durante la operación en los condensadores de Amoniaco. Los datos a estudiar se tomarán del sistema de control distribuido excepto el dato del flujo de agua de enfriamiento que se tomara de la bitácora.

3.2 ALCANCE DE LA METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO DEL ENSUCIAMIENTO DELCAMBIADOR DE CALOR 127-C1.

El diseño es No experimental o Pasivo, ya que solo estará limitado a observar el comportamiento de las variables independientes tal y como transcurren en la operación real, donde no se estará permitido experimentar condiciones diferentes a las requeridas por el diseño de la planta y sólo estará enfocado a estudiar desempeño. Y además se tomarán datos históricos para efectuar dicho estudio, dependiendo de la operación o corridas que se tengan en la planta de Amoniaco No. 6.

El diseño no experimental Longitudinal de Tendencia o “trend” será aplicado a este proyecto debido a que se requiere analizar los cambios a través del tiempo en las variables energéticas y sus relaciones entre ellas, recolectándose los datos a través del tiempo en puntos o periodos específicos, para poder determinar las inferencias con respecto a los cambios, sus determinantes y consecuencias.

Mediante un estudio de correlación se espera determinar el comportamiento de transferencia de calor y por consecuencia el ensuciamiento en el Condensador de Amoniaco 127-C1 de la planta de Amoniaco No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque, a partir de las variables controladas pasivas.

Al concluir el estudio se espera obtener un modelo matemático que sirva de base para crear un simulador que permita el personal de mantenimiento determinar su comportamiento en el tiempo y de esa manera establecer los mejores tiempos de intervención de mantenimiento.

Este estudio se tomará como justificante técnico para determinar en qué momento es el más oportuno para la realización del Mantenimiento Preventivo o bien

en otro de los casos determinar en qué tiempo deben ser sustituidos la fluxería (tubería) o cambiar el equipo completo (dependido el tipo de equipo).

3.3 SELECCIÓN DE DATOS DE LAS VARIABLES PARA DETERMINAR EL ENSUCIAMIENTO DEL CAMBIADORES DE CALOR 127-C1.

La muestra del universo de datos que se generan en la operación de los condensadores de amoniaco, deberá ser del tipo probabilística por que los datos que se registran tienen el mismo valor y por tanto su probabilidad de ser elegido es la misma para todos; ya que los objetivos del proyecto consisten en determinar su comportamiento en el tiempo.

Para seleccionar una muestra bajo el enfoque cuantitativo se ha definido que la unidad de análisis sea el condensador de Amoniaco de la Planta No. 6 del Complejo Petroquímico Cosoleacaque, donde los alcances del estudio van hasta el punto de vista energético y las variables que intervienen en la misma. Los datos de dichas variables son los que se requieren ser recolectados.

Tabla 3.1 Declaración de variables independientes para el condensador de Amoniaco 127-C1 de la Planta de Amoniaco No. 6.

| VARIABLE DE ESTUDIO | VARIABLES INDEPENDIENTES | VARIABLE DE ESTUDIO |
|--|--|---|
| Temperatura y Presión de Salida de Amoniaco. | Temperatura de Entrada y Salida de Agua de Enfriamiento. | Coeficiente de ensuciamiento de lado de Agua de enfriamiento. |
| | Presión de Entrada y Salida de Agua de Enfriamiento. | |
| | Flujo de Agua de Enfriamiento. | |
| | Flujo de Amoniaco. | |

Los datos de lado amoniaco se recolectan por sistemas electrónicos que son almacenados en una base del Sistema de Control Distribuido de la Planta de Amoniaco No. 6 y los referidos al lado de agua de enfriamiento son tomados manualmente por los operadores del área de Servicios Auxiliares de la Planta de Amoniaco No. 6. Los datos estarán restringidos a la calidad de los datos que se

hayan registrado en las bitácoras y formatos de manera manual para poderlos correlacionar.

Se selecciona una muestra probabilística, con la intención de que todos los elementos de la población tengan la misma posibilidad de ser escogidos, y de esta manera abarcar todas las posibilidades del comportamiento de los condensadores de Amoniaco.

3.4 DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Tomar el universo de datos que se tienen del Sistema de control distribuido y de las bitácoras de operación de la planta de Amoniaco No. 6, teniendo presente que tienen que identificar aquellos valores que tengan más significancia y que reflejen las variaciones que tengan que relación con las variaciones de la producción.

Siguiendo con este enfoque, fundamentarlo con la aplicación del paquete estadístico STATWIND y así determinar la ecuación del comportamiento o de la variabilidad dada. Se deberá apoyar con la estadística descriptiva.

Para determinar el tamaño de la muestra debe considerar la posibilidad de que cualquiera de ellos pueda ser elegido.

$$n' = \frac{S^2}{V^2} \quad (3.1)$$

Donde, se tiene que:

n' Tamaño provisional de la Muestra.

S^2 Varianza de la Muestra.

V^2 Varianza de la Población.

$$n = \frac{n'}{\left(1 + \frac{n'}{N}\right)} \quad (3.2)$$

Donde, se tiene que:

n' Tamaño provisional de la Muestra.

N Tamaño de la Población.

V^2 Varianza de la Población

En relación a la elección de los datos de la muestra, se deben de realizar de manera aleatoria, tomando los Números RANDOM donde se eligen aquellos casos dependiendo del tamaño de la muestra.

Otra alternativa para obtener el tamaño de la muestra, se puede calcular mediante el programa de computadora STATS versión 2, donde solo se teclean los datos de la población, y además considera una confianza del 95% y un error del 3% que es aceptado por la ciencias sociales, que aún se considera aceptable. Además ya trae de manera integrada la generación de los números aleatorios sin ocupar la tabla de Números RANDOM.

Este proyecto de tesis realizará un estudio de investigación correlacional, por que identificará la relación que existe entre el flujo y el coeficiente de ensuciamiento de lado de agua de enfriamiento. Así como el comportamiento que todo esto refleje del lado de Amoniaco en los condensadores de Amoniaco.

Una vez definido el *tamaño de la muestra*, fijando el error estándar en 0.1; y el procedimiento de selección para una muestra probabilística estratificada, en función de los rangos del poder calorífico del gas natural. Para tomar la muestra entonces de los datos de las variables relacionadas en el horno del reformador primario de la planta de Amoniaco No. 6 que abarca como población la operación de la planta durante el año 2006, se opta por los números random o aleatorios, usando como herramienta estadística el paquete STATS.

La etapa de recolección de datos se efectúan a partir de los registros que se tienen disponibles en las hojas de lecturas y los reportes de control químico, ya que tanto el método y la aplicación de la recolección de los datos están muy bien establecidos con fines de control operacional de la planta. Para el análisis de los datos se han preparado formatos donde se vacía la información requerida. El procedimiento a seguir para el análisis cuantitativo de los datos es un Análisis Estadístico, a través de una estadística descriptiva para cada una de las variables con el paquete estadístico STATWIN y luego se describe la relación entre éstas, la idea es llegar a un modelo que describa el comportamiento de los Condensadores de Amoniaco con agua de enfriamiento.

Hasta aquí se conoce ya la interrelación entre las variables dependientes y las independientes y el grado de interdependencia. Ahora se efectúa la aplicación del modelo desarrollado.

Las tres actividades de la etapa de recolección de datos se efectúan a partir de los registros que se tienen disponibles en las hojas de lecturas y los reportes del S.C.D. (Sistema de Control Distribuido), ya que tanto el método y la aplicación de la recolección de los datos están muy bien establecidos con fines de control operacional de la planta.

3.5 CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS DEL CONDENSADOR DE AMONIACO 127-C1.

La composición de la corriente de Amoniaco que llega al condensador es de 100 por ciento.

Los reportes que se generan en el área de laboratorio se van a ser los mandatarios para tomar en cuenta los datos que se generan tanto en el SCD con los registrados en bitácoras y formatos del área de servicios auxiliares.

3.6 CARACTERIZACION DEL CONDENSADOR DE AMONIACO 127-C1.

La evaluación de los condensadores se tomara de manera individual por estar operando en serie, para cada uno de ellos se efectuara la evaluación de acuerdo con la metodología del Kern:

3.7 EVALUACIÓN TÉRMICA DEL CONDENSADOR DE AMONIACO.

Balace térmico o de calor transferido.

$$Q_{Amoniaco} = m C_p \Delta T = m C_p (T_{Entrada} - T_{Salida}) \quad (3.3)$$

De donde se tiene que:

$$Q_{Amoniaco} = \text{Capacidad (BTU/hr)}.$$

$$m = \text{Flujo másico del Amoniaco (Lb/hr)}.$$

$$C_p = \text{Calor Especifico del Amoniaco (BTU/Lb.F)}.$$

$$T_{Entrada} = \text{Temperatura Entrada del Amoniaco, fluido caliente (F)}.$$

$$T_{Salida} = \text{Temperatura Salida del Amoniaco, fluido caliente (F)}.$$

$$\Delta T = \text{Diferencial de Temperatura (F)}.$$

$$Q_{\text{Agua}} = mC_p\Delta T = mC_p(T_{\text{Salida}} - T_{\text{Entrada}}) \quad \left(\frac{\text{BTU}}{\text{hr}}\right) \quad (3.4)$$

De donde se tiene que:

$Q_{\text{Agua}} = \text{Capacidad (BTU/hr)}$.

$m = \text{Flujo másico del Agua (Lb/hr)}$.

$C_p = \text{Calor Especifico del Agua (BTU/Lb.F)}$.

$T_{\text{Entrada}} = \text{Temperatura Entrada del Agua, fluido frío (F)}$.

$T_{\text{salida}} = \text{Temperatura Salida del Agua, fluido frío (F)}$.

$\Delta T = \text{Diferencial de Temperatura (F)}$.

Se tomara el calor transferido del amoniaco al Agua para determinar el flujo másico en el caso que las lecturas del flujo de agua no sean confiables.

$$m = \frac{Q_{\text{Agua}}}{C_p(T_{\text{Salida}} - T_{\text{Entrada}})} \quad \left(\frac{\text{Lb}}{\text{hr}}\right) \quad (3.5)$$

3.8 INCREMENTOS DE TEMPERATURA.

$$\Delta T = MDLT * F_T \quad (F) \quad (3.6)$$

De donde se tiene que:

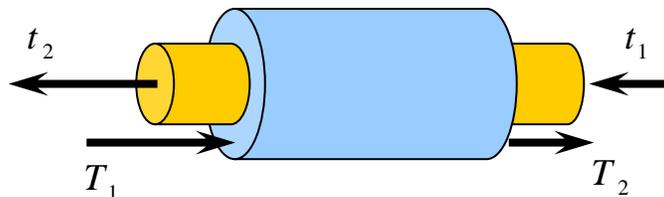
$\Delta T = \text{Diferencial de Temperatura (F)}$.

$MDLT = \text{Media Logarítmica de la diferencia de temperatura (F)}$.

$F_T = \text{Factor de corrección por temperatura (Adimensional)}$.

La Media Logarítmica de la diferencia de temperatura se calcula:

$$MDLT = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{[\ln(T_1 - t_2)] / (T_2 - t_1)} \quad (F) \quad (3.7)$$



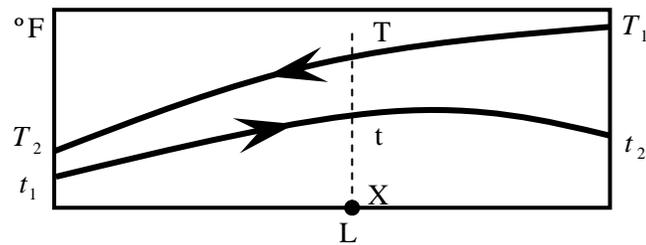


Figura 3.2 Media Logarítmica de la diferencia de temperatura con Flujos Contracorriente

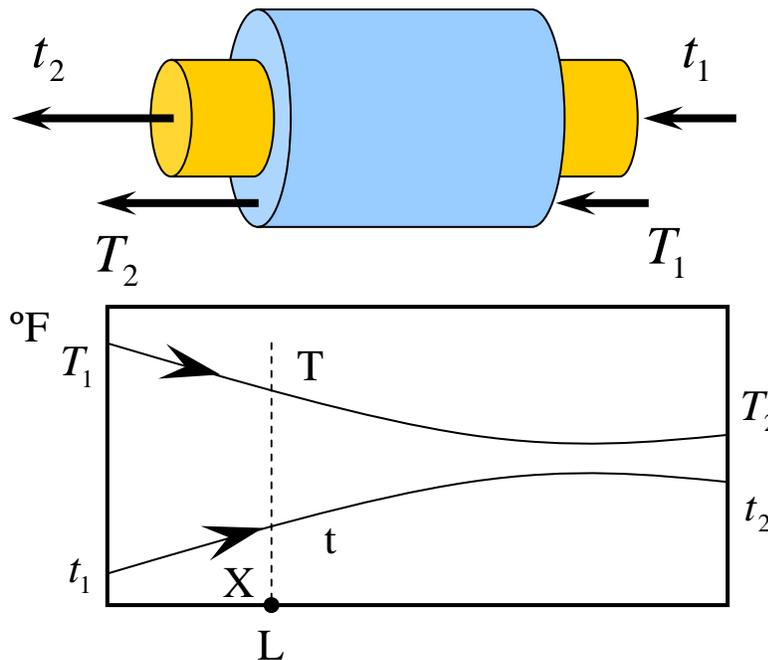


Figura 3.3 Media Logarítmica de la diferencia de temperatura con Flujos Paralelos.

3.9 CORRECCIÓN DE TEMPERATURA POR EFECTO DE LA VISCOSIDAD.

3.9.1 MASA VELOCIDAD.

$$G_s = \frac{W}{a_s} \left[\frac{L b}{(hr)(pie^2)} \right] \quad (3.8)$$

De donde se tiene que:

G_s = Masa Velocidad para lado cuerpo o coraza (Lb/hr.pie²).

W = Flujo másico del fluido caliente (Lb/hr).

a_s = Área transversal de flujo del Cuerpo o coraza (pie²).

$$G_t = \frac{w}{a_t} \left[\frac{Lb}{(hr)(pie^2)} \right] \quad (3.9)$$

De donde se tiene que:

G_t = Masa Velocidad para lado tubos (Lb/hr.pie²).

W = Flujo másico del fluido frio (Lb/hr).

a_t = Área transversal de flujo de los tubos (pie²).

3.10 EVALUACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DEL CONDENSADOR DE AMONIACO.

Determinar el Coeficiente de transferencia de calor.

$$h_0 = j_H \frac{k}{D_e} \left(\frac{Cp \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.10)$$

De donde se tiene que:

h_0 = Coeficiente de transferencia de calor del Fluido Exterior (BTU/hr.pie₂.F).

j_H = Factor de Transparencia de calor (Adimensional).

k = Conductividad Térmica [BTU/hr.pie₂(F/pie)].

D_e = DiámetroInt. del Cuerpo (pie).

Cp = Flujo másico del fluido frio (Lb/Lb.F).

μ = Viscosidad a Temperatura Calórica (Lb/pie.hr).

μ_w = Viscosidad a Temp. Calórica de la Pared del Tubo (Lb/pie.hr).

Determinar los coeficientes Limpio de transferencia de calor.

$$U_c = \frac{(h_{io} * h_o)}{(h_{io} + h_o)} \frac{Btu}{hr.pie^2.F} \quad (3.11)$$

De donde se tiene que:

U_c = Coeficiente Limpio de transferencia de calor (BTU/hr.pie².F).

h_{io} = Valor de h_o cuando está referido al Diám. Exterior (BTU/hr.pie².F).

h_o = Coeficiente de Transf. de calor de ext. del Tubo (BTU/hr.pie².F).

Determinar la caída de presión de ambos lados del cambiador. ($\square P$ Lb/pullg²)

Factor de distracción, R_d (hr.pie².F/BTU)

3.11 DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRASFERENCIA DE CALOR.

Determinar cómo son afectados los condensadores de amoniaco por el grado de ensuciamiento de los tubos por el lado de agua de enfriamiento, a través del tiempo, para poder visualizar las afectaciones del ensuciamiento por el interior de los tubos de dichos condensadores de amoniaco. Esto se efectuará con el apoyo de un gráfico que se pueda observar este comportamiento.

La grafica deberá observar los momentos que se han estado efectuando los mantenimientos durante el 2005 y 2006, para correlacionar estos valores.

Se debe establecer y generar los gráficos comparativos en:

- El Coeficiente Total de Transferencia de Calor cuando están limpios y su comportamiento a través del tiempo.
- El Coeficiente Total de Transferencia de Calor de Diseño y su comportamiento a través del tiempo.
- Los costos de las corrientes y su comportamiento a través del tiempo.

3.12 IDENTIFICAR EL COSTO ÓPTIMO DE LAS INTERVENCIONES DE LOS CONDENSADORES DE AMONIACO

Evaluar en el periodo de investigación, cual es la forma más conveniente de poder llevar a cabo los servicios de mantenimiento, toman como fuente de información para la toma de decisiones las consideraciones de comportamiento del equipo Operando con afectaciones negativas en la transferencia de calor con costos elevados, o bien tomar la difícil decisión de meter a mantenimiento los condensadores de amoniaco. Esta información deberá estar graficándose con los siguientes parámetros:

- Costos generados por la operación de los coeficientes de transferencia de calor a través de un periodo de tiempo.
- Y los costos generados por los servicios de mantenimiento a través de un periodo de tiempo.

3.13 ANALISIS DE DATOS DE LAS VARIABLES PARA DETERMINAR EL ENSUCIAMIENTO.

La recolección de datos referente a la Temperatura, Presión y Flujo del lado de Amoniaco se tomara a través del Sistema de Control Distribuido de la Planta de Amoniaco No. 6, por que se tienen las mediciones integradas. Por lo que se refiere a los datos de Temperatura, Presión y Flujo de lado de Agua de Enfriamiento se tomaran de las “Sábanas” o “Bitácoras” del operador del área de Servicios Auxiliares de la Planta de Amoniaco No. 6.

Los equipos o instrumentos de medición de Temperatura, Presión y Flujo son confiables, ya que se tienen equipos patrones certificados bajo los que se calibran periódicamente y se tienen controles de los grados de incertidumbre en la medición, lo que da un grado de confiabilidad muy elevado.

Los datos serán analizados desde el punto de vista cuantitativo a través de Pruebas Paramétricas mediante el Análisis Factorial de varianza (ANOVA ó Análisis de varianza de “k” direcciones).

3.14 DESCRIPCION DEL EQUIPO 127-C1

El cambiador de calor 127-C de planta de amoniaco N°6 es del tipo condensador que condensa amoniaco para la recuperación de hidrogeno.

Por el lado carcasa del cambiador circula NH₃ e Inertes y por el lado tubos circula lo que es agua de enfriamiento.

El cambiador de calor 127-C1 tiene una presión de diseño por el lado carcasa de 30.79 Kg/cm² (438 PSIG) y una presión de diseño por el lado cuerpo de 20.59 Kg/cm² (298 PSIG).

Su temperatura de diseño por el lado carcasa es de 100°C (212 °F) y por el lado cuerpo tiene una temperatura de diseño de 65 ° C (149 ° F).

Tiene un total de 356 tubos con un diámetro exterior de 1.901 cm, calibre BWG: 14 Min * 609.6 cm de Longitud (20 pies).

Espesor del espejo de 8.80, con paso de 2.38 triangular girado a 30°. Clasificación por el tema es de tipo: BEM.

Tiene una corrosión permitida en lado carcasa de 3.175mm (1/8” INCH) y de lado tubos una corrosión permitida de 3.175mm (1/8” INCH).

La presión permitida de prueba hidrostática es en lado carcaza de 46.19 Kg/cm (657 PSIG) y en por el lado tubo una presión de 30.89 Kg/cm² (439 PSIG).

El peso del cambiador de calor en vacío es de 3858 Kg, su peso lleno de agua es de 5129 Kg, peso de haz de tubos es de 2412 Kgs.

3.15 ANTECEDENTES DEL CONDENSADOR DE LA PLANTA N° 6 DE AMONIACO

El equipo opera desde el año 2000 y con alimentación de agua de enfriamiento del cabezal de la planta de amoniaco VI con una presión de 3.6 Kg /cm² y llegada del equipo de 2.6 Kg /cm ocasionando con esta presión un bajo flujo y por consiguiente una deficiente operación del mismo.

El equipo actualmente cuenta con 13 tubos cegados, motivo la corrosión interna de los tubos y desgaste de los mismos en los espejos.

La falla por ruptura de tubos en este equipo, ocasiona pérdida de producción en la plantas de amoniaco por que es necesario sacar de operación completamente la unidad recuperadora de hidrogeno para su reparación.

También se incrementa el contenido de amoniaco en la torre de agua de enfriamiento ocasionando con esto un mayor consumo de reactivos para mantener dentro del control los parámetros el agua de enfriamiento.

El gas de purga se tiene que ventear a la atmosfera para mantener en la operación de la plantas de amoniaco y por consiguiente se impacta el aire con el amoniaco contenido.

Observado el historial de fallas del cambiador de calor el jefe de la planta de amoniaco VI hace la siguiente petición.

Se pide cambio o re entubado del Condensador de amoniaco 127-C1 de la columna de destilación 105-E, no por el porcentaje de tubos cegados ya que este es de 3.6% si no por la corrosión presentada y el desgaste.

- Sustancia de Trabajo:
- Lado Tubos: Agua de Enfriamiento.
- Temperatura de Entrada [90 °F (32.22°C)]
- Temperatura de Salida [105 °F (40.56°C)]
- Presión de Operación [45 Psig (3.16 Kg/cm²)]
- Lado Cuerpo: Amoniaco.
- Temperatura de Entrada [244 °F (117.78 °C)]

- Temperatura de Salida [108 °F (42.22 °C)]
- Presión de Operación [246 Psig (17.30 Kg/cm²)]

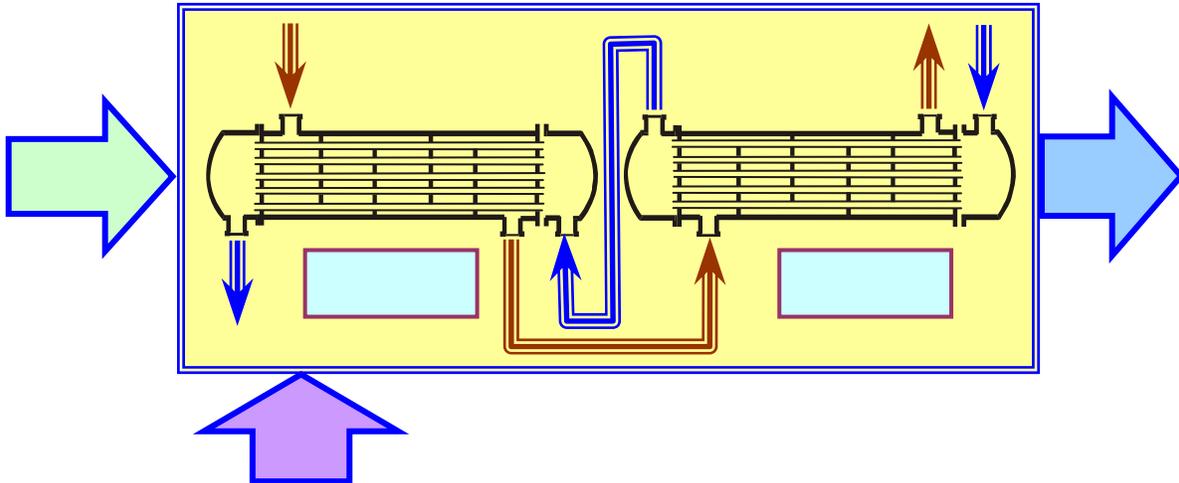


Figura 3.4 Secuencia de los flujos de los condensadores de amoníaco 127-C1 y 127C2.

Nota: Los valores de los parámetros operacionales que se encuentran entre corchetes corresponden a los valores de diseño.

- Las Variables controladas son Pasivas.
- Se tomaran datos del SCD (Sistema de Control Distribuido).
- También se tomaran datos de bitácoras de registros diarios (Manualmente)
- Variables Independientes Controladas X_i .
- Temperatura de Entrada del Agua de Enfriamiento [TI-1-64]
- Presión de Entrada del Agua de Enfriamiento. [PI-234]
- Temperatura de Entrada del Amoníaco. [TI-1-135]
- Presión de Entrada del Amoníaco. [PI-81]
- Gasto del Agua de Enfriamiento [Calcular a partir de FR-26]
- Gasto del Amoníaco. [FIC-9]
- Tiempo.
- Variables Independientes Incontrolables Z_i .
- Temperatura del Medio Ambiente.
- Suciedad del agua de enfriamiento.
- Variables Dependientes Controlables Y_i .

- Coeficiente de Fouling.
- Eficiencia del Equipo.
- Temperatura de Salida del Amoniaco. [TI-2-76]
- Presión de Salida del Amoniaco. [PIC-7 / PI-82]
- Temperatura de Salida del Agua de Enfriamiento. [TI-2-74]
- Presión de Salida del Agua de Enfriamiento. [No tiene]

Las preguntas de investigación del proyecto son las siguientes:

3. ¿Cuánto impacta el incremento de flujo del 10% en el agua de enfriamiento en el coeficiente de ensuciamiento en el interior del tubo recto?
4. ¿Cuánto impacta el incremento de flujo del 10% en el agua de enfriamiento en el coeficiente global de transferencia de calor?

Este proyecto de tesis realizará un estudio de investigación correlacional, por que identificará la relación que existe entre el flujo y el coeficiente de ensuciamiento de lado de agua de enfriamiento.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV. RESPUESTAS DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las hipótesis presentadas para este proyecto son las siguientes:

H_{IC1}: El incremento del flujo de agua e enfriamiento en un 10% ocasiona un aumento de un 10% el valor de diseño (0.00167) del ensuciamiento por el interior de los tubos del condensador de amoniaco y reduce hasta en un 10% el coeficiente global de transferencia calor.

La presente Tesis se desarrolla en el Complejo Petroquímico Cosoleacaque, en su Planta de Amoniaco No. 6 y en la sección de Refrigeración, donde actualmente existen Cuatro Plantas de amoniaco, Una Unidad de Recuperación de Hidrógeno y Una unidad Recuperadora de Venteo de Amoniaco. La Metodología de Investigación se aplica con un Enfoque Cuantitativo de acuerdo con el libro de texto de Metodología de la Investigación⁹, de los autores Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio. De ahí que se determine llevar a cabo bajo el diseño no experimental longitudinal de tendencia porque se trata de un equipo que se encuentra instalado en una planta de proceso, y se efectuara su estudio durante el tiempo que se encuentre operando y los estudios que se realicen serán para analizar su correlación de variables declaradas y con el apoyo del programa estadístico STATS para determinar un modelo matemático que sirva para crear un simulador en base de Excel. De esta manera se plantea la solución a las preguntas de investigación y la comprobación de las hipótesis que se establecieron en el capítulo correspondiente. Además se determinan como tomar las muestras para efectuar el estudio.

4.1 ANALISIS DEL CONDENSADOR DE AMONIACO 127-C1 EN HYSYS

A continuación se describe la secuencia de figuras que ilustran el cálculo y análisis energético realizado al condensador de NH₃ en el simulador HYSYS:

1. En la Figura 4.1 se muestra la conexión de las cuatro corrientes de flujo principales del condensador de NH₃ 127 C1

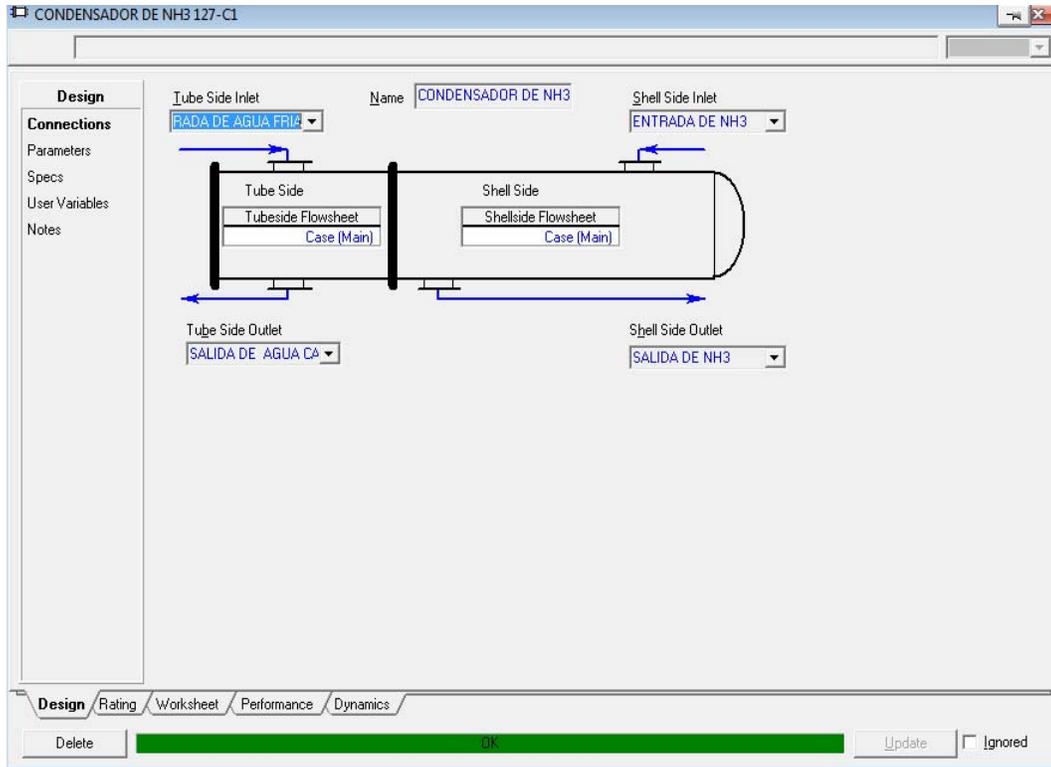


Figura 4.1 Pantalla de las Conexiones de las corrientes del condensador de NH3

2. En la Figura 4.2 se muestra la distribución de las corrientes de entrada y salida a dicho condensador de NH3 127 C1

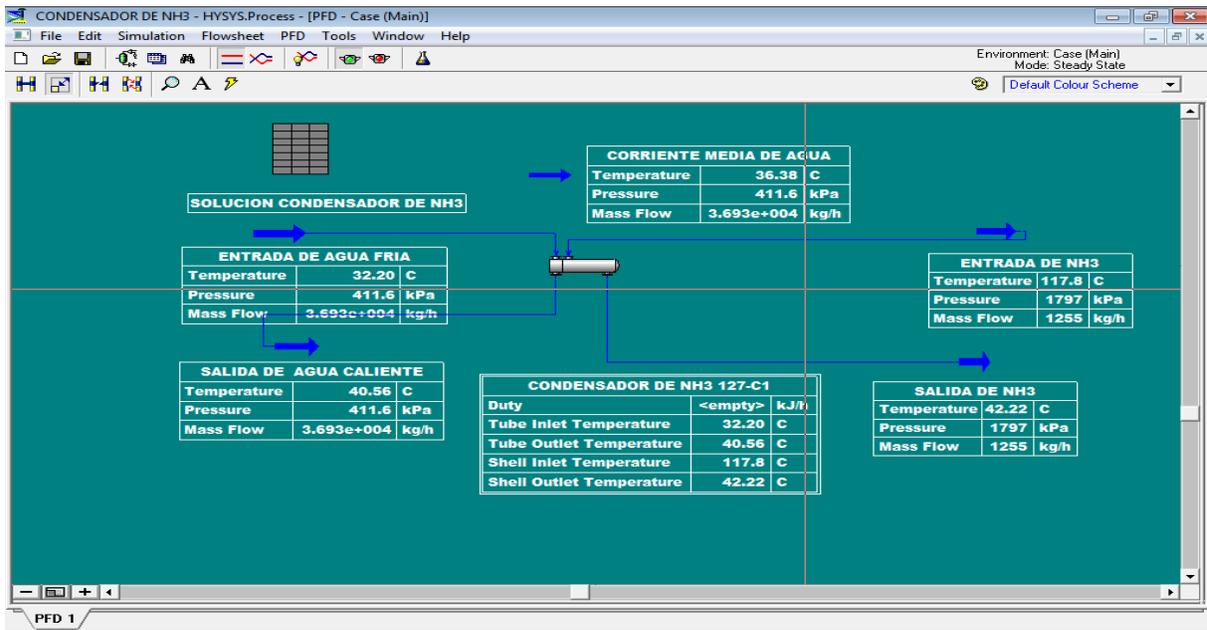


Figura 4.2 Pantallas de la distribución de corrientes en el condensador de NH3

3. En la figura 4.3 se muestra los datos principales de las corrientes mencionadas.

| Name | ENTRADA DE | SALIDA DE | ENTRADA DE | SALIDA DE |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Vapour | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| Temperature [C] | 32.20 | 40.56 | 117.8 | 42.22 |
| Pressure [kPa] | 411.6 | 411.6 | 1797 | 1797 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 2050 | 2050 | 73.69 | 73.69 |
| Mass Flow [kg/h] | 3.693e+004 | 3.693e+004 | 1.255 | 1.255 |
| Liq/Vol Flow [m3/h] | 37.00 | 37.00 | 2.037 | 2.037 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -2.877e+005 | -2.869e+005 | -4.305e+004 | -6.530e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 85.56 | 88.14 | 193.7 | 124.8 |
| Heat Flow [kJ/h] | -5.898e+008 | -5.882e+008 | -3.172e+006 | -4.812e+006 |

Figura 4.3 Pantalla de los datos de las corrientes del condensador de NH3

4. En la Figura 4.4 se muestra las composiciones de dichas corrientes

| Ammonia | RADA DE AGUA | A DE | AGUA CALENTRADA | DE NH3 | SALIDA DE NH3 |
|---------|--------------|--------|-----------------|--------|---------------|
| 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 |
| 1.0000 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

Figura 4.4 Pantalla de los datos de las composiciones de las corrientes del condensador de NH3

5. En la Figura 4.5 se muestra el resultado global del cálculo del condensador para fouling nulo

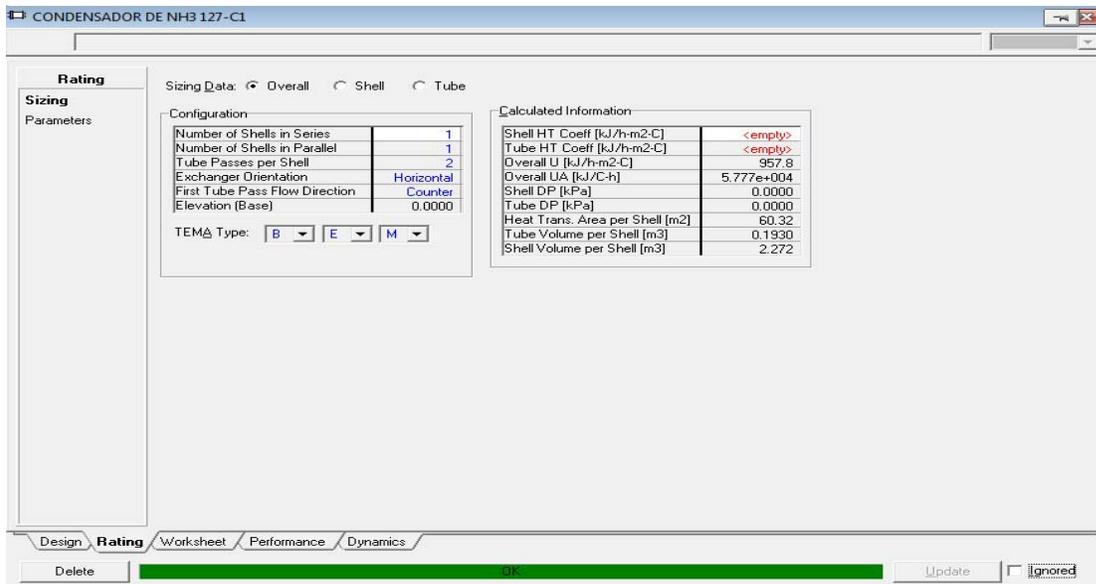


Figura 4.5 Pantalla de resultados globales del cálculo del condensador de NH3 para fouling nulo

6. En la Figura 4.6 se muestra los resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado coraza.

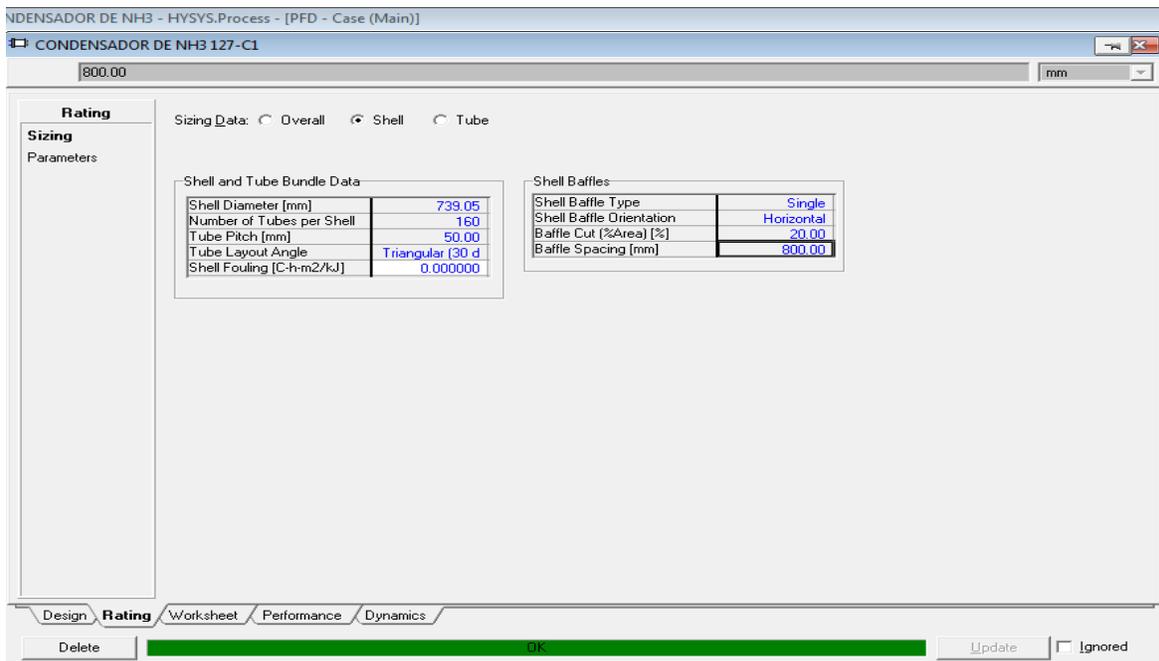


Figura 4.6 Resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado coraza.

7. En la Figura 4.7 se muestra los resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado tubo.

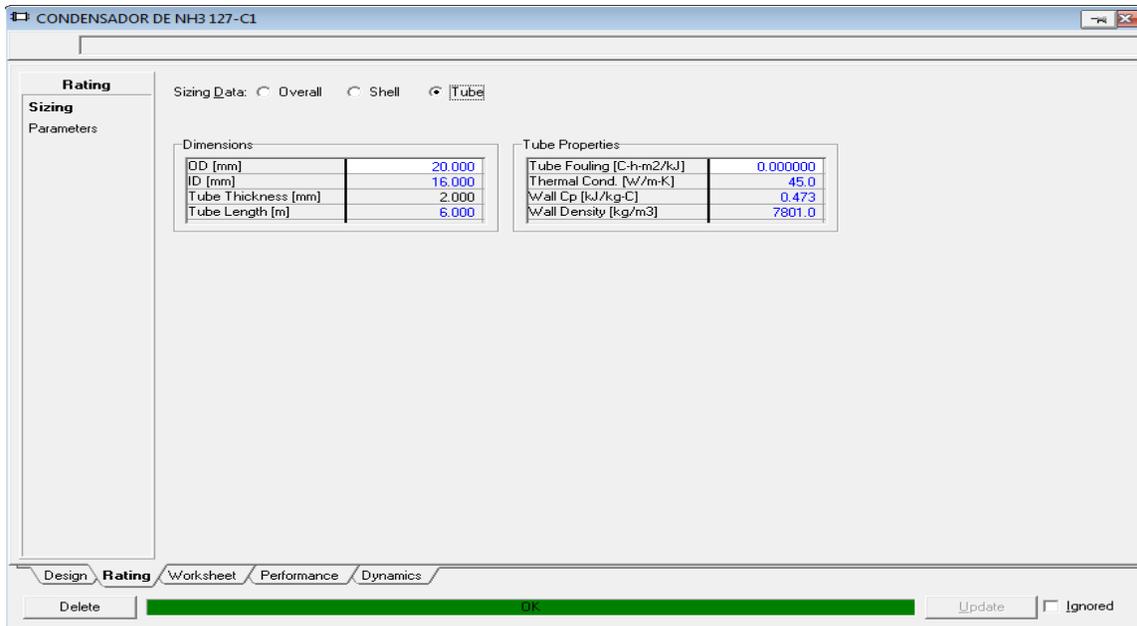


Figura 4.7 Resultados del cálculo de transferencia de calor por el lado tubo.

8. En la Figura 4.8 Se muestra la Pantalla de resultados de propiedades de las corrientes del condensador de NH3

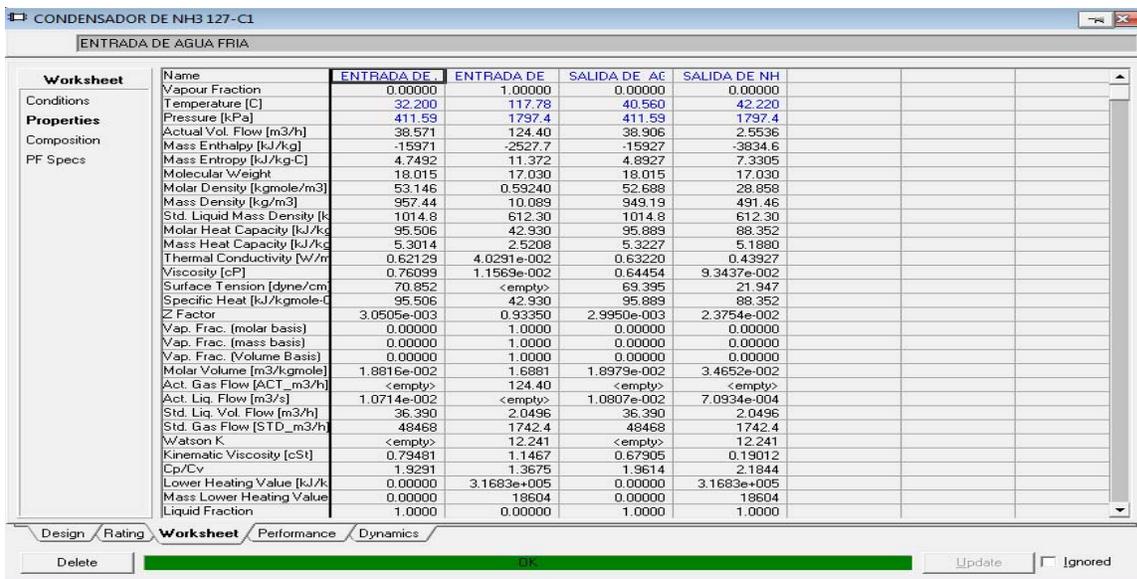


Figura 4.8 Pantalla de resultados de propiedades de las corrientes del condensador de NH3

9. En la Figura 4.9 se muestra la Pantalla de los resultados globales del condensador de NH3

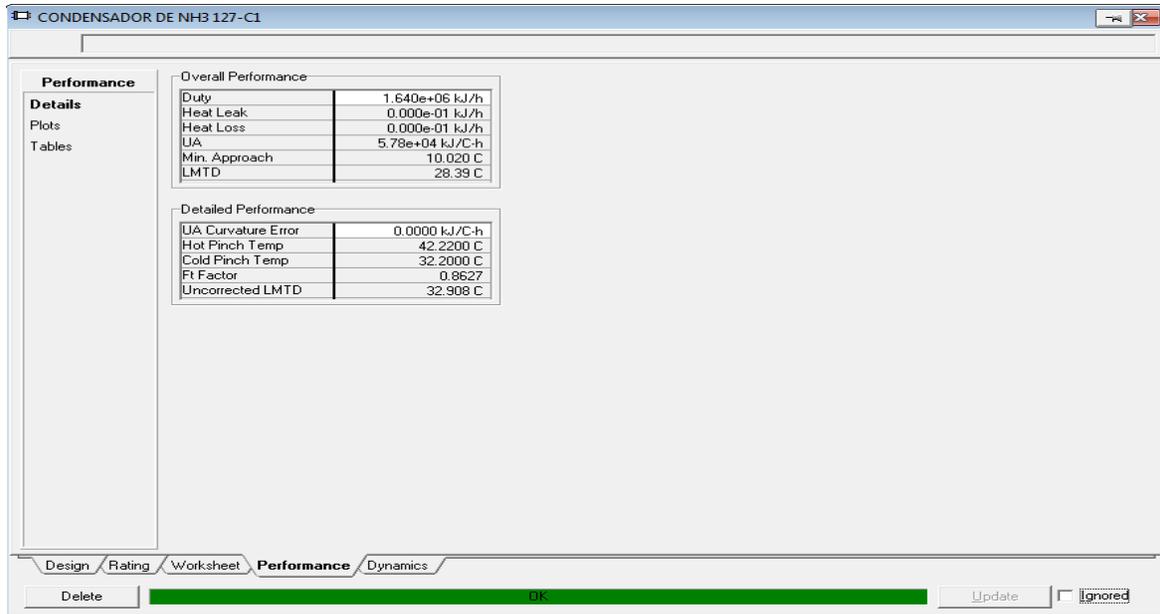


Figura 4.9 Pantalla de los resultados globales del condensador de NH3

10. En la Figura 4.10 se muestra el Gráfico de temperaturas contra el flujo de calor de las corrientes del condensador de NH3

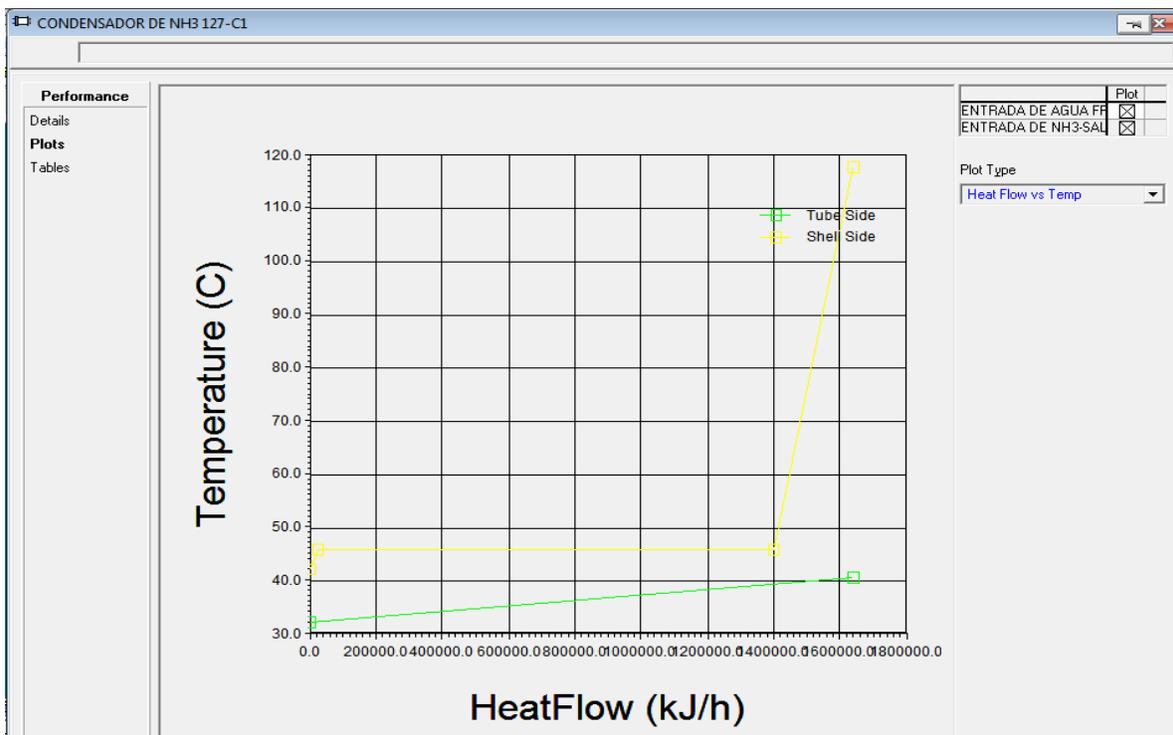


Figura 4.10 Gráfico de temperaturas contra el flujo de calor de las corrientes del condensador de NH3

De la misma forma en que se evaluó con la secuencia anteriormente escrita para un valor de fouling igual a cero (condiciones ideales), se procedió a evaluar el cambiador de calor para otras tres condiciones de fouling y de temperatura de salida del agua en el equipo, por razones evidentes de espacio solo se exponen los resultados globales obtenidos en la siguiente Tabla 4.1, se incluye además las obtenidas en las Figuras de la 4.1 a la 4.10.

| VALOR DE FOULING (°C hr m ² / KJ) | TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA (°C) | UA (KJ/°C hr) |
|---|--|--------------------|
| 0.000 | 40.56 | 5.78×10^4 |
| 0.005 | 41.80 | 5.60×10^4 |
| 0.010 | 42.78 | 5.42×10^4 |
| 0.015 | 45.10 | 5.27×10^4 |

Tabla 4.1 Resultados de evaluación de cambiador a diferentes fouling y temperaturas

A continuación los resultados gráficos se muestran en las Figuras 4.11 y 4.12.

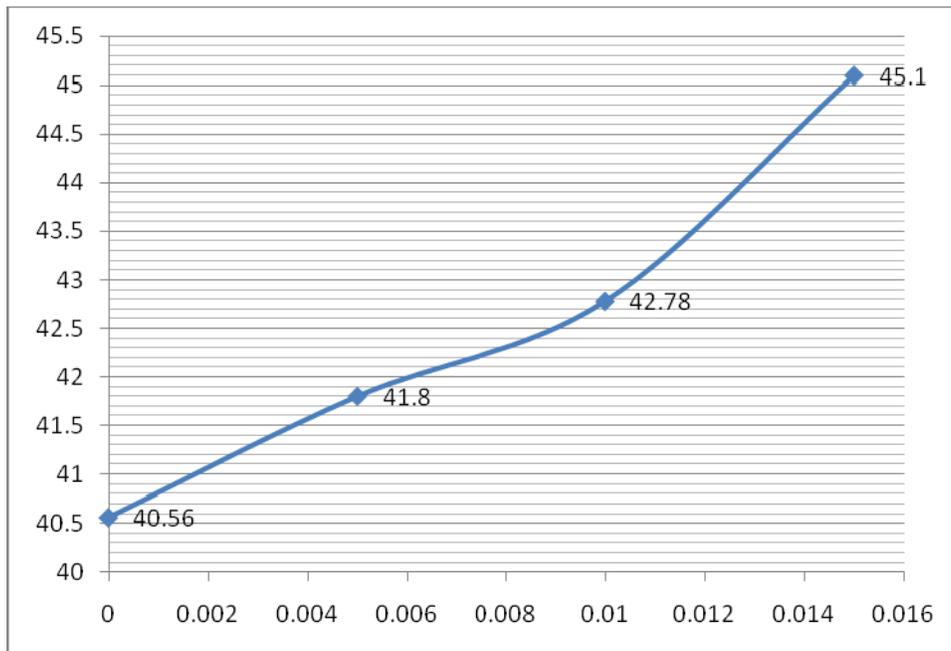


Figura 4.11 Dependencia de la temperatura de salida del agua en el condensador con respecto al fouling por el interior de los tubos.

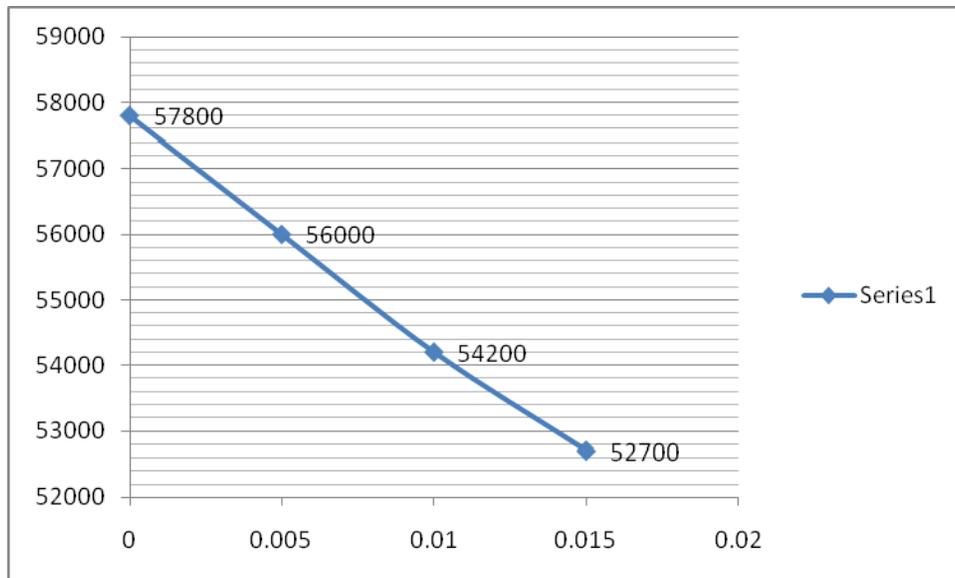


Figura 4.12 Dependencia de UA con respecto al fouling por el interior de los tubos.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Al terminar el presente proyecto se puede concluir lo siguiente:

1. Se realizó un simulador en HYSYS del condensador de amoniaco que puede ser utilizado en la Empresa tanto para la evaluación como para el diseño de este tipo de condensadores.
2. Esto permite evaluar el comportamiento de la transferencia de calor del Condensador de Amoniaco 127-C1, a partir de la medición de las temperaturas de los fluidos y de la Presión del amoniaco.
3. El simulador permite, si se evalúa con mayor número de datos, determinar el momento idóneo para aplicarle los servicios de mantenimiento.
4. Se caracterizó la influencia del ensuciamiento de lado agua de enfriamiento en la superficie de los tubos rectos en el condensador de amoniaco 127-C1, a partir de la respuesta de la temperatura de salida como se aprecia en la Figura 4.11 donde se observa que a mayores valores de fouling el valor de la temperatura de salida del agua aumenta de forma vertiginosa y por tanto el Pinch del cambiador.
5. En la Figura 4.12 se aprecia un decrecimiento del valor del coeficiente global de transferencia de calor en el equipo lo cual es lógico el aumentar el valor del fouling.
6. La aprobación del proyecto permite el uso del simulador para el personal técnico que realiza labores de mantenimiento.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

En esta tesis se realizó un simulador en HYSYS del condensador de amoniaco que puede ser utilizado en la empresa tanto para la evaluación como para el diseño de este tipo de condensadores, por lo que se recomienda evaluar los condensadores con un mayor número de datos a los utilizados en este proyecto para determinar el momento idóneo para aplicarle los servicios de mantenimiento.

Se sugiere efectuar evaluaciones continuas al condensador para corroborar que se esté dando el mantenimiento correctamente y en el tiempo más óptimo.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. A.P.I. (American Petroleum Institute) Standard-660 Shell and Tube Heat Exchangers for General Refinery Service, Séptima Edición, Washington USA, 2003.
2. A.P.I. (American Petroleum Institute) Standard-661 Air-Cooled Heat Exchangers for General Refinery Service, Quinta Edición, Washington USA, 2002.
3. A.P.I. (American Petroleum Institute) Standard-662 Plate Heat Exchangers for General Refinery Service, Segunda Edición, Washington USA, 2002.
4. ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment Chapter 43 Heat Exchangers, USA, 2004, pp. 43.1-43.6.
5. A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) Section VIII Division 1 Appendix AA Rules for Construction of pressure vessels, New York USA, 2001, pp. 612-643.8.
6. A.S.M.E. (American Society of Mechanical Engineers) Section VIII Division 1 UHX - Part UHX Rules for Shell and Tube Heat Exchangers, New York USA, 2001, pp. 301.1-301.57.
7. Colman, J. P.: Transferencia de Calor Octava edición, McGRAW-HILL, España, 1999, 484 páginas.
8. Coordinación de Recursos Humanos y Organización. Manual de Organización. Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V. <http://coso.ptq.pemex.com>
9. Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. Metodología de la Investigación. McGRAW HILL. 2000. Ayuda del programa SFW.1993. (Statwind)
10. Entregable 4.1.3. Manual del Sistema de Administración de Mantenimiento para Pemex Petroquímica. Julio, 2004.
11. Intranet de Pemex Petroquímica. Sistema de Administración de Calidad. intranet.ptq.pemex.com

12. Kellogg and Brown, Manual de integración de retrofits de las plantas de Amoníaco 4, 5, 6 y 7, proyecto Q-171-41-13, 1998.
13. Kern, Donald Q.: Procesos de Transferencia de Calor Trigésima Primera reimpresión, CECSA, México, 1999, 980 páginas.
14. McCabe, Warren L.; Smith, Julián C.; Harriot, Setter: Operaciones Unitarias en Ingeniería Química Cuarta Edición, McGRAW-HILL, España, 1998, pp. 45-62.
15. M.W. Kellogg, Manual de Operación de las plantas de Amoníaco No. 6 y 7 JOB-5302 A/B, 1978.
16. Pega S. Hrnjak Ph.D.: ASHRAE Transactions Symposia AN-04-1-2 Flow Distribution Issues in Parallel Flow Heat Exchangers, USA, 2004, pp. 301-306.
17. Ramírez Mesa, Roberto. Metodología de la Investigación en la Energía. Apuntes para un Libro de Texto. ITM. 2003.
18. Shames, Irving H.: Mecánica de Fluidos Tercera Edición, McGRAW-HILL, Colombia, 1995, pp. 10-15.
19. T.E.M.A. (Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc.), Séptima edición, New York USA, 1988, 219 páginas.
20. Universidad Iberoamericana: Laboratorio de Operaciones Unitarias <http://200.13.98.241/~rene/operaciones/manuales/cambiadores.pdf>.
21. Campos Avella, Juan C. Dr., Santos Macías Leonardo Metodología para la evaluación termo económica en centrales termoeléctricas. Universidad de Cienfuegos, Cuba. <http://www.santiago.cu/>
22. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos subsidiarios. Calentadores a fuego directo para plantas de proceso. NRF-089-PEMEX-2004
23. Coordinación de Recursos Humanos y Organización. Manual de Organización. Petroquímica Cosoleacaque, S.A. de C.V. <http://coso.ptq.pemex.com>
24. Curbelo Alonso Alfredo Dr., Garea Moreda Bárbara Dra., Valdés Delgado Antonio Dr., Generación de electricidad a partir de bagazo en Cuba, <http://www.fao.org>
25. Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos, Baptista Lucio Pilar, Metodología de la Investigación, Editorial McGraw Hill Interamericana (tercera edición 2005).

26. Kellogg and Brown, Manual de integración de retrofits de las plantas de Amoníaco 4, 5, 6 y 7, proyecto Q-171-41-13, 1998.
27. M.W. Kellogg, Manual de Operación de las plantas de Amoníaco No. 6 y 7 JOB-5302 A/B, 1978.
28. Pérez DortaYunieskis Ing., Hernández Socorro Diana Rosa Ing., Desarrollo histórico de los Generadores de Vapor en las Centrales Nucleares, <http://www.accefyn.org.com>
29. Ramírez Mesa Roberto Dr., Monografía del curso Pruebas Termotécnicas en Calderas y Hornos, Maestría en Ingeniería Energética, 2006.
30. Secretaría de Energía, Norma oficial mexicana NOM-002-ENER-1995, Eficiencia térmica de calderas paquete. Especificaciones y método de prueba.
31. Secretaría de Energía, Norma oficial mexicana NOM-012-ENER-1996, Eficiencia térmica de calderas de baja capacidad (7,5 a 100 Kw.)- especificaciones y método de prueba.
32. Sin autor. Eficiencia térmica de caldera. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería química. Santa fe de Bogotá. <http://www.rincondelvago.com>