

24
24.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA



**"ANALISIS ENERGETICO AL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DE UNA REFINERIA DE PETROLEO"**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA QUIMICA
P R E S E N T A :
NURI CANDELARIA CERON

L



MEXICO, D.F.

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

Presidente:	Prof. Guerra Recasens José Francisco
Vocal:	Prof. López Torres Arturo
Secretario	Prof. Rangel Dávalos Humberto
1er. suplente:	Prof. Sierra Martínez Hermenegildo
2do. suplente:	Prof. Barcena Ibarra Vicente Agustín

Sitio donde se desarrolló el tema:

**Departamento de Intercambio Térmico
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO**

Asesor del Tema:

Ing. Humberto Rangel Dávalos

Humberto Rangel D.

Supervisor técnico:

Ing. Ma. Teresa Pérez Carbajal y Campuzano

Ma. Teresa Pérez C.

Sustentante:

Nuri Candelaria Cerón

Nuri

Agradezco a mis padres, Sara Nuri Cerón Candelaria y Lucio Noé Candelaria Vázquez por las oportunidades que con amor y esmero me han brindado.

A Guillermo Calva Martínez por su apoyo y amor durante la realización de mis estudios.

A mis hijas Natalia y Daniela.

A mis hermanas Adriana e Iris.

A mis compañeros del Departamento de Diseño Térmico del Instituto Mexicano del Petróleo, en especial a Mayte, Marco A. y Alberto por sus valiosa ayuda y comentarios durante la realización de este trabajo.

A mi asesor el Ing. Humberto Rangel D.

A mis amigos Sandra, Juan Carlos y Claudia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

INDICE

Introducción	i
I. Generalidades	1
I.1 Formas y fuentes de energía	1
I.2 Administración de la energía	3
I.3 Auditorías energéticas	4
I.4 Sistemas de enfriamiento	6
I.5 Torres de enfriamiento	10
I.6 Cambiadores de calor	24
I.7 Calidad del agua de enfriamiento	32
II. Descripción y estado actual del sistema de agua de enfriamiento de la refinería	42
II.1 Descripción del sistema de enfriamiento	42
II.2 Información de la operación del sistema	44
II.3 Balance de materia y energía	67
III. Propuestas de mejoramiento al sistema de agua de enfriamiento	72
III.1 Torres de enfriamiento	74
III.2 Sistema de distribución de agua	81
III.3 Cambiadores de calor	143
III.4 Tratamiento del agua	145

IV. Análisis económico	149
IV.1 Métodos de análisis de factibilidad económica	149
IV.2 Consideraciones para la elaboración del análisis	152
IV.3 Definición de propuestas de nula o mínima inversión	152
IV.4 Definición de propuestas para ahorro energético con inversión	154
IV.5 Análisis económico	163
IV.6 Inversiones adicionales	165
IV.7 Plan de acción	168
V. Conclusiones y Recomendaciones	170
Anexo 1	172
Bibliografía	184

INTRODUCCION

INTRODUCCION

El concepto más simple de energía es la capacidad de los cuerpos o sistemas para efectuar un trabajo, sin embargo, la transformación de la misma implica la degradación de su calidad, por lo tanto no toda la energía puede convertirse en trabajo. Desde un enfoque económico, la energía es una materia prima como cualquier otra, que se puede vender, transportar, almacenar y transformar, y su precio puede ser periódicamente revaluado [1].

Desde tiempos inmemoriales la energía está presente en todas las actividades del hombre. Las fuentes de energía y sus aplicaciones han cambiado desde el uso de la fuerza muscular del hombre y de los animales hasta el uso intensivo de hidrocarburos y la búsqueda de fuentes alternas de energía (nuclear, solar, eólica, geotérmica, etc.)

La primera crisis petrolera de 1973-1974 tuvo efectos muy importantes, elevándose hasta cuatro veces el precio internacional del petróleo. Tal situación, propició el planteamiento de interrogantes en relación a la forma de valorar mejor los recursos energéticos que se creían inagotables. Algunas de las reacciones más importantes fueron la creación de una política de ahorro de energía y la diversificación de fuentes de suministro en los países industrializados, logrando reducciones de un 20% en promedio en el consumo de energía primaria por unidad de producto, permitiendo incrementar su productividad [2].

La importancia del valor de los energéticos se ha visto incrementada por la creciente demanda de energía, la disminución de las reservas y el impacto ambiental ocasionado por su uso, siendo la disponibilidad de energía un factor importante para el desarrollo. Actualmente, los índices de consumo de energéticos per cápita son indicadores tan confiables como el producto interno bruto per cápita, del grado de desarrollo de una sociedad o de una nación.

México tiene una gran variedad de recursos energéticos, siendo los hidrocarburos el energético predominante. Las reservas totales de hidrocarburos se ubican en 67.6 mil millones de barriles, de los cuales 46.2 mil millones son de petróleo, 14.6 mil millones de gas y 6.8 mil millones de condensados [3].

En México durante el periodo 1960-1980, los precios de los principales productos petrolíferos tenían uno de los niveles más bajos del mundo, estimulando el consumo dispendioso de los combustibles.

Por lo anterior, en México se han realizado recientemente importantes esfuerzos para implementar una política de uso racional de la energía en todos los sectores. Dicha política se establece en el Programa Nacional para la Modernización Energética 1990 - 1994, donde se establece entre otras cosas, la creación de la Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía, CONAE, que constituye la instancia para la concertación de acciones en esta materia.

Los consumos de energía más importantes en nuestro país se tienen en ramas que por su naturaleza son imprescindibles, pero que producen efectos adversos como son la contaminación ambiental y el agotamiento de los recursos.

Las industrias con mayor potencial de ahorro energético son: la refinación de petróleo (15%), siderúrgica (37.5%), azucarera (50%), vidrio (33.0%), celulosa y papel (30%), cemento (18%), química y petroquímica (10.5%) y electricidad (10%). Dentro de estas industrias, los sistemas con mayor potencial de ahorro energético son la generación de vapor, el calentamiento mediante hornos, las redes de intercambio térmico, las torres de enfriamiento y el aislamiento térmico [4].

La importancia de capitalizar el potencial de ahorro existente en la industria de refinación del petróleo resalta por la contribución de los costos de la energía (del 46% aproximadamente) en los gastos de operación [5].

Por otra parte, el agua, al igual que la energía, se requiere en todas las instalaciones como materia prima, agua de enfriamiento y/o agua para servicios. Sin embargo, la disponibilidad, la contaminación ocasionada por su uso, la normatividad ambiental y el alto costo de su tratamiento limitan su uso, asignándole un valor agregado que cada vez se vuelve más importante en los costos de las empresas.

En la industria en general, y en particular en la refinación del petróleo, se tienen grandes consumos de agua de enfriamiento, el cual tiene asociado un alto contenido de energía.

El consumo típico de energía en los sistemas de enfriamiento (particularmente en las torres de enfriamiento) de las refinerías de México es del 27.3% aproximadamente [6]. Esto corresponde al 8.2% del consumo del sector energético, ya que de acuerdo al Balance Nacional de Energía 1994, el consumo nacional de energía fue de 1421.2×10^{15} calorías, de las cuales 29.9% correspondieron al consumo del sector energético. Lo anterior significa que cualquier reducción porcentual en el consumo de agua se traduce en importantes ahorros de energía a nivel nacional.

Por todo lo anteriormente mencionado, resulta importante y rentable promover y llevar a cabo programas de ahorro de energía en sistemas de enfriamiento en refinerías, racionalizando la explotación de un recurso natural, satisfaciendo además cuestionamientos éticos y morales del ingeniero químico.

El objetivo de este trabajo es analizar el sistema de enfriamiento de una refinería para reducir su consumo de energía y de agua de reposición, resaltando la importancia de los análisis energéticos como instrumento de la administración de la energía.

Este trabajo pretende además, ser una aportación informativa, para la comprensión y concientización de la importancia del uso racional de la energía y la preservación de los recursos.

El sitio seleccionado para la realización de este proyecto, es una refinería de petróleo localizada en el estado mexicano de Hidalgo, ya que debido a sus características climáticas se pueden esperar grandes potenciales de ahorro de energía. Así mismo, el ahorro de agua será una buena medida para preservar un recurso natural escaso en la región.

CAPITULO I

GENERALIDADES

- I.1 Formas y fuentes de energía**
- I.2 Administración de la energía**
- I.3 Auditorías energéticas**
- I.4 Sistemas de enfriamiento**
- I.5 Torres de enfriamiento**
- I.6 Cambiadores de calor**
- I.7 Calidad del agua de enfriamiento**

I. GENERALIDADES

Desde su origen, el desarrollo de los pueblos y de los países del mundo ha estado íntimamente ligado a la disponibilidad y consumo de energía y ésta se ha convertido en una medida de adelanto, civilización y nivel económico en que se encuentra cada país, ya que la energía permite al individuo mejores condiciones de vida [7].

La energía es, entonces, indispensable para satisfacer las necesidades de la humanidad y para progreso en todos los aspectos de su desarrollo, como la agricultura, la industria, el transporte, el comercio, los servicios públicos y las actividades individuales y familiares.

I.1 Formas y fuentes de energía [8], [9]

La energía del universo se manifiesta en diversas formas, como pueden ser:

- **Energía Mecánica.** Este tipo de energía se divide en energía cinética y energía potencial. La energía cinética es aquella que se origina debido al movimiento de un cuerpo. La energía potencial es la que se debe a la posición de un cuerpo con respecto a un punto de referencia.
- **Energía Térmica o Calorífica.** Es consecuencia del movimiento constante de las moléculas de un cuerpo, adquiriendo con esto un cierto nivel de temperatura.
- **Energía Química.** Es aquella que se manifiesta durante la reacción de dos ó más moléculas, donde se cede o absorbe calor (reacciones exotérmicas y reacciones endotérmicas)
- **Energía Radiante.** Es aquella que se manifiesta a través de ondas electromagnéticas, como son la luz, calor radiante, rayos infrarrojos, rayos X, rayos ultravioleta.
- **Energía Eléctrica.** Es la energía obtenida por el flujo de electrones

- **Energía Atómica o Nuclear.** Es la energía obtenida de reacciones nucleares de fisión y de fusión. Las reacciones de fisión consisten en la desintegración del núcleo de átomos pesados. Las reacciones de fusión se dan cuando los diferentes constituyentes de un átomo se unen para formarlo, liberando energía.

Las fuentes de energía aprovechable de acuerdo a su origen son:

- **Petróleo, gas y carbón.** La energía química de estos energéticos se convierte en calor (mediante la combustión) para transformarse en electricidad en centrales termoeléctricas y carboeléctricas; en energía cinemática y mecánica en máquinas de combustión, o bien en energía para servicios de calentamiento.
- **Hidráulica.** La energía mecánica (potencial y cinética) de caídas de agua, originadas por grandes diferencias de altura en terrenos, se convierte en energía eléctrica en centrales hidroeléctricas
- **Geotermia.** La energía calorífica del interior de la tierra es transformada en energía mecánica y eléctrica en turbogeneradores.
- **Nuclear.** La energía nuclear de elementos como el uranio, se transforma en energía calorífica y ésta a su vez, en energía eléctrica en las centrales nucleoeeléctricas.
- **Solar.** La energía radiante del sol se utiliza para producir calor o electricidad.
- **Energía eólica.** La energía cinética de los vientos se convierte en energía eléctrica.
- **Energía de la biomasa.** La energía química de materia viva y desechos orgánicos puede transformarse en cualquier tipo de energía. Como ejemplo tenemos el caso de la madera y del bagazo de caña, que es quemado transformando su energía química en calorífica.

Otra importante clasificación de las fuentes de energía, es de acuerdo a su duración, la cual puede ser:

- **Energía renovable.** Entre estas fuentes de energía se encuentra la solar y la eólica, dado que son fuentes inagotables de energía.
- **Energía no renovable.** Son aquellas cuya fuente terminará por agotarse después de cierto tiempo de explotación. Este es el caso de los combustibles fósiles, la energía geotérmica y la fisión nuclear.

Siendo las fuentes no renovables de energía las de mayor aplicación en la satisfacción de las necesidades del hombre, la preocupación por el mejor uso y administración de la energía, tiene una enorme importancia socioeconómica y ambiental.

1.2 Administración de la energía [2], [10], [11]

Debido al aumento en los precios de los energéticos, la energía ha pasado de ser un factor marginal en la estructura de costos en las empresas a ser un rubro importante en la misma. Con la finalidad de disminuir su participación o por lo menos, mantener su mismo nivel dentro de esta estructura, es necesario conocer el tipo y la cantidad de energía que se utiliza en cada uno de los procesos de la planta y determinar las acciones pertinentes para abatir sus consumos, sin afectar la calidad ni cantidad de la producción.

La administración de la energía es una actividad encaminada a la planeación, dirección y seguimiento de los esfuerzos de una empresa dirigidos hacia el mejor uso de los recursos energéticos de la misma [2]. Los objetivos generales de la administración de la energía son:

- a. Efectuar un análisis previo de los consumos globales.
- b. Formular un programa para el uso racional de la energía.
- c. Organizar, dirigir y supervisar el programa
- d. Integrar, controlar y evaluar las acciones emprendidas en el programa.

El ahorro de energía se puede definir como todas las acciones encaminadas al uso racional y eficiente de los energéticos. Estas acciones implican el uso adecuado de las formas de energía, la eliminación de los desperdicios y el aumento en la eficiencia de uso de la energía [10].

El ahorro y uso eficiente de la energía dentro de una empresa, produce efectos en dos rubros fundamentales:

1. Incremento en la productividad, al disminuir los costos de producción
2. Reducción de los impactos ambientales al disminuir las emisiones generadas en la combustión de combustibles fósiles, las cuales causan contaminación ambiental.

Estos aspectos proporcionan además una mejor imagen corporativa de la empresa, acorde con la problemática actual de preservación de los recursos naturales y el mejoramiento del medio ambiente.

1.3 Auditorías energéticas [2], [10], [12], [13]

Una de las actividades más importantes dentro de la administración de la energía, es la realización de auditorías energéticas, tanto para la formulación de estrategias como para el seguimiento y control de programas de ahorro de energía

Las auditorías energéticas son estudios que permiten hacer una caracterización energética de la empresa y determinar la participación de costos de los energéticos dentro de los costos de producción, calcular el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía, precisar los potenciales de ahorro y las medidas técnicas y económicas para lograrlo, así como la formulación del esquema general de un programa de ahorro de energía, así como el seguimiento y control del mismo [2].

Al implementar las recomendaciones que arroja una auditoría energética se pueden alcanzar ahorros del 10 al 40% o más, en los consumos actuales de la planta sin necesidad de disminuir la producción y, en algunas ocasiones, incrementándola, lo

que representa ganancias para la empresa, optimización del proceso, mejor funcionamiento y control de los equipos, así como la reducción en los impactos ambientales adversos [2].

Existen tantos tipos de auditorías como procesos industriales, variando en tamaño, enfoque, precisión y costo, dependiendo del tipo y dimensiones de la empresa, grado de avance de la administración energética, así como de los objetivos y ambiciones de mejoramiento energético de la alta dirección de la empresa. Sin embargo, se pueden clasificar en tres niveles:

- a. Auditoría de primer nivel. Es un diagnóstico preliminar del uso de energía en una planta y consiste en la inspección visual del estado físico de las instalaciones y en el análisis de los registros de operación y mantenimiento que rutinariamente se llevan en cada instalación. Al realizar este nivel de auditoría se deben considerar los detalles detectados visualmente y que se consideran como desperdicios de energía, tales como falta de aislamiento, fugas o purgas.

Cabe aclarar que en este tipo de estudio no se pretende efectuar un análisis exhaustivo del uso de la energía, sino precisar medidas de aplicación inmediata, cuya característica principal es su bajo costo, tanto de ejecución como de la inversión para la realización de las medidas de ahorro propuestas. También se determina la necesidad de estudios complementarios, como es el caso de equipo en mal estado, tecnología obsoleta, falta de sistemas de control, entre otros. La información recabada debe permitir la jerarquización de las medidas de ahorro y el desarrollo de estudios específicos, evaluándose en términos tanto técnicos como económicos.

- b. Auditoría de segundo nivel: Comprende la evaluación de la eficiencia energética en áreas y equipos con consumos intensivos de energía. La ejecución de este tipo de auditoría requiere de un análisis detallado de los registros históricos de las condiciones de operación de los equipos, lo que incluye la información sobre volúmenes manejados o procesados y consumos específicos de energía. La

información obtenida directamente en campo se compara con la de diseño, con objeto de obtener las variaciones de eficiencia.

- c. **Auditorías de tercer nivel:** Consiste en un análisis exhaustivo de las bases de diseño y condiciones de operación de una instalación mediante el uso de equipo especializado de medición y control. Debe realizarse con la participación de especialistas de cada área, auxiliados por personal de ingeniería.

Las recomendaciones derivadas de estas auditorías generalmente son de aplicación a mediano y largo plazo e implican modificaciones a los equipos y/o a los procesos.

En este nivel de auditorías es común el uso de técnicas de simulación de procesos, con la finalidad de estudiar diferentes esquemas de interrelación de equipos y procesos, además de que facilita la evaluación de los efectos por cambio de condiciones de operación y modificaciones en el consumo específico de energía. En estas auditorías el análisis es más profundo, por lo que se requiere información completa de los flujos de materiales, combustibles, energía eléctrica, etc., además de las variables de presión, temperatura y propiedades de las diferentes sustancias ó corrientes.

1.4 Sistemas de enfriamiento [14], [15], [16], [17]

Uno de los principales servicios auxiliares de la industria es el servicio de enfriamiento, que consiste en la eliminación de los excedentes energéticos de las corrientes de proceso con el fin de adecuarlas a condiciones necesarias de operación, así como para el almacenamiento seguro de productos. La remoción de calor se efectúa en corrientes cuya cantidad y/o calidad de su contenido energético no son económicamente recuperables dentro del proceso.

Los medios de enfriamiento más comunes son el agua, aire y fluidos refrigerantes, siendo el agua el medio más utilizado en la industria, debido a su disponibilidad.

alta capacidad calorífica y a los buenos coeficientes de transferencia de calor que pueden lograrse.

El enfriamiento con agua consiste en remover el calor de una corriente de proceso calentando el agua, que a su vez transmitirá calor al ambiente, ya sea a un cuerpo de agua o al aire.

Existen tres tipos básicos de sistemas de enfriamiento con agua:

a. De un solo paso

En los sistemas de un solo paso se bombea agua de una fuente natural (lago, río, océano, etc.), a un cambiador de calor (enfriadores y condensadores) regresándola directamente a la misma fuente.

La figura I.1 muestra un esquema simplificado de un sistema de este tipo.

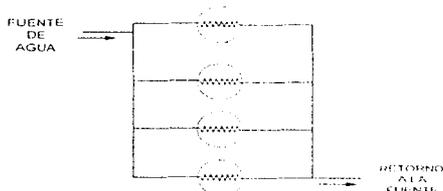


Figura No. I.1 Sistemas de enfriamiento de un solo paso

Es el método más barato y eficiente para remover una gran cantidad de calor cuando se dispone de la fuente natural de agua, sin embargo, en la actualidad el uso de estos sistemas está limitado, tanto por la disponibilidad de agua como por la normatividad relacionada con los impactos ambientales ocasionados por la descarga de agua caliente y en ocasiones contaminada a las fuentes naturales.

El tratamiento del agua en estos sistemas está limitado a la remoción de basura y desperdicios con mallas y a la adición de cloro para el control de la proliferación de microorganismos. El tratamiento químico para evitar ensuciamiento no es rentable por los grandes volúmenes manejados. Cuando el tratamiento de agua es importante se prefiere el uso de sistemas de un solo paso en cascada, en el cual el agua pasa de manera escalonada de los servicios de menor a mayor temperatura y a veces a otros servicios dentro de las instalaciones de la planta.

b. Abiertos de recirculación (evaporativos)

Los sistemas abiertos de recirculación toman el agua de una tina o fosa, la circulan a través del proceso para remover calor residual por medio de cambiadores de calor, después el agua caliente se pasa a través de un dispositivo enfriador y entonces regresa el agua a la tina. El agua no es descargada a un cuerpo natural de agua, reduciéndose en más del 90% los consumos del agua de la fuente. Con el objeto de mantener bajo el nivel de sólidos disueltos en el circuito, un pequeño porcentaje del flujo es regresado a la fuente (purga), alimentando al sistema la misma cantidad de agua fresca (reposición). La figura 1.2 muestra un esquema general de sistemas de enfriamiento de este tipo.

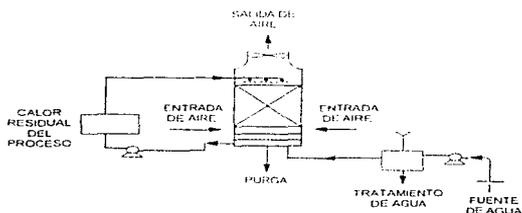


Figura No. 1.2 Sistemas de enfriamiento de recirculación (evaporativo)

Ya que estos sistemas reducen considerablemente el volumen de agua tomada de la fuente, se disminuyen los efectos en la misma, sin embargo se crean otros impactos ambientales, que dependen generalmente del clima del lugar, como formación de neblina, escarcha, bruma por arrastre de agua, etc.

Los dispositivos usados para descargar el calor del agua al ambiente en este tipo de sistema son: estanques de esparado, canales de esparado, lagunas de enfriamiento y torres de enfriamiento, siendo las últimas el equipo más utilizado para enfriamiento de agua en la industria.

c. Cerrados de recirculación (no evaporativos)

Se denominan cerrados porque no existe contacto entre el agua de enfriamiento y el aire, por lo tanto las pérdidas por evaporación y la exposición del agua de enfriamiento con la atmósfera son despreciables, con lo cual se evita afectar la química del agua.

Este sistema consiste de dos circuitos. En el primer circuito que es cerrado, el agua de enfriamiento absorbe calor del proceso a través de un cambiador de calor. El agua caliente es enfriada posteriormente en el segundo circuito de enfriamiento que puede ser de tipo evaporativo, de un solo paso o enfriado por aire. La figura 1.3 muestra un sistema de enfriamiento cerrado de recirculación (no evaporativo).

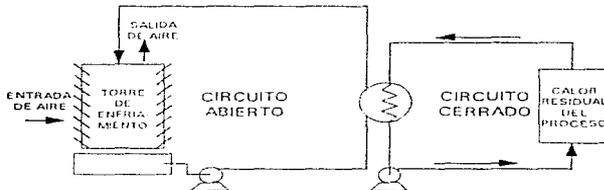


Figura No. 1.3 Sistema de enfriamiento cerrado de recirculación (no evaporativo)

Estos sistemas son de utilidad en aplicaciones críticas, donde se requiere tener un control seguro de los productos químicos, un ejemplo es la colada continua en la industria del acero, donde cualquier depósito puede causar daño en el equipo.

I.5 Torres de enfriamiento [16], [17], [18], [19], [20], [21]

Una torre de enfriamiento es un dispositivo para reducir la temperatura del agua por contacto directo con aire, disminuyendo la temperatura del agua a través de dos mecanismos, la transferencia de masa (evaporación) y transferencia de calor sensible al aire.

En general, sus principales partes son : un sistema de distribución de agua caliente, el empaque o relleno en donde se pone en contacto el agua con el aire, un ventilador que impulse el aire a través del interior de la torre y una estructura que soporte todas las partes.

Las torres de enfriamiento son el dispositivo más usado en la industria para disipar grandes cantidades de calor a un costo razonable. El agua está regularmente disponible, es barata y proporciona un excelente medio de transferencia de calor con ciertas limitaciones de temperatura.

I.5.1 Tipos de torres de enfriamiento

La clasificación más utilizada de las torres de enfriamiento es de acuerdo a la forma en que el aire es movido a través de la torre:

a. Torres de Enfriamiento de Tiro Natural

a.1 Atmosféricas

Las torres atmosféricas son relativamente sencillas. Consisten de un cuarto con relleno ó empaque con dos paredes de persianas expuestas a los vientos dominantes y un sistema de rociado de agua. El aire entra por una pared de persianas, pasa horizontalmente sobre el relleno ó empaque y sale por la pared

de persianas opuesta. La torre es relativamente angosta en la dirección del flujo de aire, de modo que la trayectoria del aire sea corta y de baja resistencia. El uso de las torres atmosféricas ha disminuido debido al elevado costo inicial de la estructura y sistemas de bombeo, la dependencia de la velocidad y dirección del viento, la dificultad de controlar la temperatura del agua y la necesidad de grandes espacios abiertos. La torre de enfriamiento atmosférica fue el primer diseño usado y actualmente es empleado sólo en pequeños sistemas de aire acondicionado. La figura 1.4 muestra una torre de este tipo.

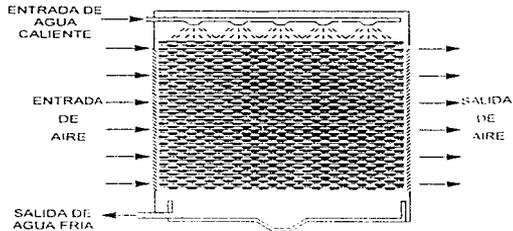


Figura No. 1.4 Torres de enfriamiento tipo atmosféricas

a.2 Chimenea o hiperbólicas

Este tipo de torres consisten de una estructura de acero reforzado y hormigón en forma de chimenea, una sección empacada y un sistema de distribución de agua.

Las torres hiperbólicas trabajan de manera muy parecida a una chimenea, con el flujo de aire inducido por convección como resultado de la diferencia de densidades. El diseño a contraflujo tiene relleno ocupando la porción más baja (3-9 m) del interior de la torre. La base de la torre es principalmente espacio abierto con piernas de soporte por donde entra el aire frío. El diseño a flujo

crucado tiene relleno en una unidad en forma de dona afuera y alrededor de la torre. El aire entra a través de esta sección a flujo cruzado y entonces pasa hacia arriba a través de la chimenea.

La figura 1.5 muestra los dos tipos de torre hiperbólica.

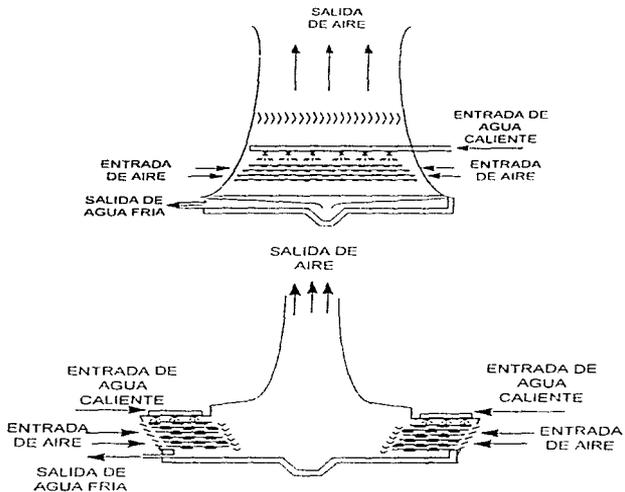


Figura No 1.5 Torre de enfriamiento tipo chimenea o hiperbólica

Ya que las torres hiperbólicas operan más eficientemente en condiciones ambientales de baja temperatura de bulbo húmedo y alta humedad relativa, son ampliamente usadas para servicio en plantas de potencia del norte de Europa,

Canadá y en el norte de Estados Unidos, donde la carga máxima ocurre en los meses de invierno.

a.3 Tiro natural asistido por ventilador

Son torres hiperbólicas diseñadas para operar con tiro natural bajo la mayoría de las condiciones atmosféricas, con asistencia de uno o más ventiladores para ayudar en su funcionamiento cuando se requiera. Pueden ser arregladas tanto para contraflujo con tiro forzado ó tiro inducido, como con flujo cruzado con tiro inducido, con uno o más ventiladores por unidad. Son generalmente de menor tamaño que las torres de tiro natural para la misma carga. La figura 1.6 muestra torres de este tipo.

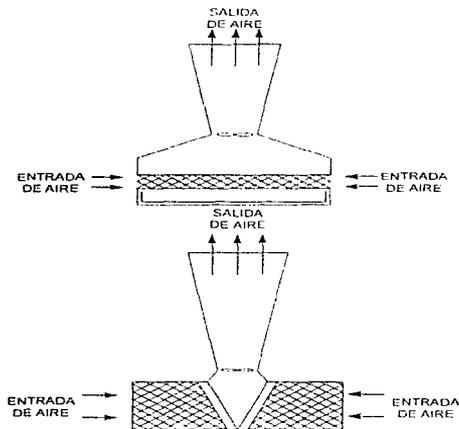


Figura No. 1.6 Torre de enfriamiento de tiro natural asistido por ventilador

b. Torres de enfriamiento de tiro mecánico

Las torres de tiro mecánico dependen de ventiladores para mover el aire a través del relleno de la torre de enfriamiento. Este mayor flujo de aire permite mejor enfriamiento bajo condiciones controladas y generalmente resultan menores los costos de instalación cuando se les compara con torres de tiro natural.

Las torres de tiro mecánico pueden estar equipadas con más de un ventilador para el control de la temperatura durante los periodos del año donde la temperatura de bulbo húmedo es menor que las condiciones de diseño. Normalmente el flujo de aire puede ser controlado por motores de velocidad variable, reductores de velocidad o ventiladores con ángulo de ataque ajustable. Las torres mecánicas están divididas en dos categorías:

b.1 Tiro forzado

Los ventiladores en la torre de tiro forzado están localizados a la entrada del aire y empujan el aire a través del relleno, del agua y de los eliminadores de arrastre hacia la atmósfera. Ya que el aire sale a una velocidad menor, frecuentemente se presenta recirculación de aire, lo cual reduce la eficiencia hasta en 20%. La figura 1.7 muestra un esquema de este tipo de torres.

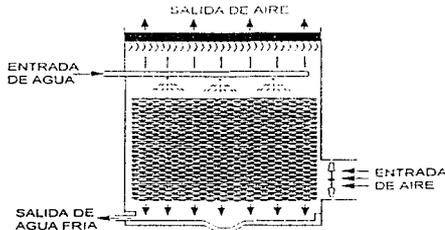


Figura No. 1.7 Torres de enfriamiento de tiro forzado

b.2 Tiro inducido

Los ventiladores en torres de tiro inducido están localizados en lo alto de la torre, donde el aire es succionado a través del relleno y del agua. Estas torres son clasificadas de acuerdo con la dirección de movimiento del aire y agua:

- Diseño a contraflujo

El aire y el agua fluyen en direcciones opuestas. El agua cae por gravedad desde la parte superior de la torre a través del relleno y el aire, que es introducido por la parte inferior, fluye hacia arriba a través del relleno y del agua. Este arreglo pone en contacto el agua más fría (por debajo del relleno) con el aire fresco, el cual está a la menor temperatura de bulbo húmedo. Este tipo de torres se ilustran en la figura I.8.

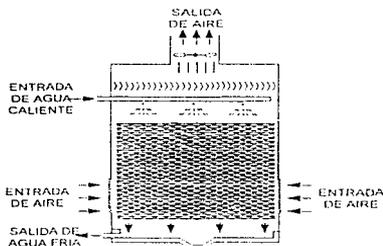


Figura No. I.8 Torre de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo

- Diseño a flujo cruzado

El agua cae por gravedad a través del relleno y el aire que entra a través de persianas localizadas en las paredes laterales, fluye horizontalmente a través del relleno y el agua. El flujo cruzado proporciona baja resistencia al flujo de aire en la dirección horizontal, lo cual permite pasar más aire por unidad de área y

potencia dadas, que en diseño a contracorriente. Este mayor movimiento de aire compensa la menor eficiencia de transferencia de calor. En la figura 1.9 se ilustra este tipo de torres.

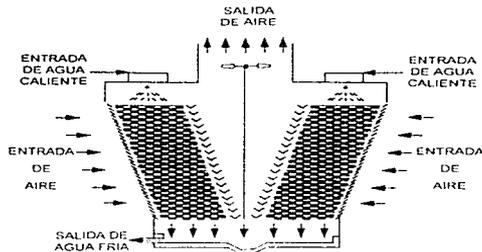


Figura No. 1.9 Torre de enfriamiento de flujo cruzado

Las torres de flujo cruzado sustituyeron a las de flujo a contracorriente en la década de los 70's porque presentan menor caída de presión en el aire y por lo tanto consumen menor potencia en los ventiladores para una torre de las mismas dimensiones. Sin embargo, en la actualidad, las torres de flujo a contraflujo han vuelto a usarse por el desarrollo tecnológico en el diseño del empaque tipo película y de materiales plásticos, así como por su mayor eficiencia para la transferencia de calor. Sin embargo para especificar una torre a contraflujo con empaque de película cuando la calidad del agua pueda causar problemas de ensuciamiento.

1.5.2 Partes principales de las torres de enfriamiento

Los elementos constructivos más importantes de las torres de enfriamiento se describen a continuación:

- **Sistema de distribución de agua.** Su función es distribuir en forma adecuada el agua caliente a través de toda la sección empacada de la torre. Incluye un cabezal distribuidor, válvulas, boquillas y charola de distribución. La forma de distribución puede hacerse en un patrón de chorro generado por gravedad (flujo cruzado) o atomizado generado por presión (flujo a contracorriente).
- **Relleno.** Es el material de la torre que permite retardar la caída del agua aumentando su área de contacto con el aire, con el propósito de favorecer la transferencia de masa y calor. Existen tres tipos básicos de relleno:

Rellenos de goteo, en el cual el flujo de agua se rompe en pequeñas gotas para aumentar el área de contacto con el aire. Existen diferentes diseños que cumplen con este objetivo, por ejemplo: barras de borde estrecho, barra cuadrada, barra desnivelada, rejilla empacada, etc.

Relleno de película, en donde el aumento del área superficial se crea mediante la formación de películas laminares de agua por la adherencia de ésta al material del empaque, por ejemplo: tablillas de madera, láminas de celulosa, láminas de asbesto cemento, lámina corrugada, etc.

Relleno de efecto combinado, en donde se generan los dos efectos anteriores, formándose la película por la inclinación de la placa o por la superficie vertical, y las gotas por el rompimiento de la película en las perforaciones, por ejemplo: placa inclinada perforada, "V" invertida perforada, "T" invertida perforada, etc.

La figura I.10 muestra ejemplos de los diferentes tipos de empaques.

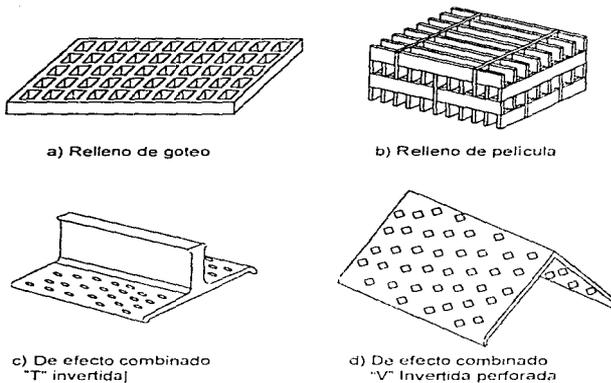


Figura No. 1.10 Tipos de empaques

- Soporte de empaque. Es la estructura formada normalmente de acero inoxidable que soporta el relleno dentro de la torre de manera adecuada para evitar canalizaciones que disminuyan la capacidad de la torre.

Eliminadores de rocío. Es un componente que sirve para retener las gotas arrastradas por el aire, antes de que éste salga de la torre. Básicamente todos los eliminadores actúan provocando cambios bruscos de dirección en la corriente de aire. El propósito de los eliminadores de rocío es evitar las pérdidas de agua por arrastre, limitar la formación de niebla y reducir posibles daños a equipo adyacente, además de favorecer la distribución uniforme del aire. Los materiales utilizados deben resistir atmósferas corrosivas y erosivas. Con los eliminadores celulares de PVC se ha logrado disminuir el arrastre de agua hasta 0.002%. La figura 1.11 muestra ejemplos de los diferentes tipos de empaques.

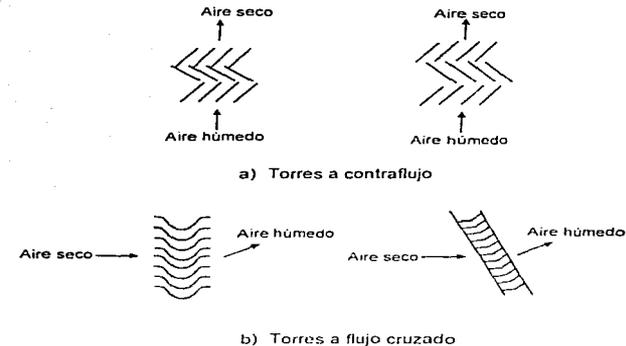


Figura No. 1.11 Tipos de eliminadores de rocío

- **Chimeneas.** Es una estructura cilíndrica que proporciona una cámara al ventilador, de tal forma que su comportamiento sea más efectivo. Al mismo tiempo, protege al ventilador y lanza lejos el aire húmedo, evitando problemas de recirculación. Las chimeneas en forma de venturi proporcionan una recuperación de velocidad que se traduce en recuperación de energía. Aproximadamente se tiene una reducción del 13% en el consumo de energía del ventilador cuando se usan chimeneas con recuperación de velocidad.
- **Ventiladores.** Se emplean en las torres de tiro mecánico para mover el aire a través de la torre. Existen dos tipos principales, axiales, en los que el aire mantiene la dirección del eje antes y después de su paso por el ventilador, y centrífugos, donde el aire descarga en dirección normal a la entrada.

Los ventiladores axiales son apropiados para mover grandes volúmenes de aire a una contrapresión estática pequeña y su uso es más frecuente en instalaciones industriales.

- **Bombas.** Los sistemas de bombeo de recirculación de agua a la torre consumen una fracción muy importante de la potencia requerida por el sistema de enfriamiento. Se emplean bombas verticales y horizontales dependiendo de la ubicación de la fosa de agua fría.
- **Motores.** Los motores eléctricos utilizados para mover los ventiladores en la torres de tiro mecánico deben operar en condiciones severas, ya que se encuentran expuestos a las inclemencias del tiempo, la atmósfera contaminada y la alta humedad, consecuencia del funcionamiento de la torre.

Se recomienda la colocación del motor fuera de la chimenea de la torre, ya que esto evita que el aire de refrigeración de la carcasa tenga un elevado contenido de humedad, facilitando además su mantenimiento.

Los motores de dos velocidades son especialmente convenientes en el caso de aire acondicionado, cuando existen problemas de niveles de ruido. Con este tipo de motores se pueden reducir considerablemente la potencia consumida en periodos fríos o durante la noche.

1.5.3 Conceptos de operación

Una torre de enfriamiento se especifica en términos de las siguientes variables:

- a) **Temperatura de bulbo húmedo:** Es la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de líquido que se evapora en una gran cantidad de una mezcla vapor-gas no saturada. Es una medida de la humedad de una mezcla y constituye un factor importante en el funcionamiento de las torres, ya que representa la mínima temperatura a la cual puede enfriarse el

agua por evaporación. En el diseño se utiliza la temperatura de bulbo húmedo que no exceda por más del 5% el promedio durante un verano normal.

- b) Rango de enfriamiento: Es la diferencia entre la temperatura del agua, medida en el sistema de distribución de agua caliente, y la temperatura del agua medida en el estanque de agua fría.
- c) Acercamiento: Es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre. Esta variable influye en las dimensiones de la torre, flujo de aire y potencia del ventilador.
- d) Flujo de recirculación de agua. Es la cantidad de agua caliente circulada en la torre y depende de la carga térmica que debe removerse en el proceso. Es una de las variables más importantes en el diseño y funcionamiento de las torres ya que está relacionada con la capacidad de la misma. Conocido el rango y el acercamiento se determina el flujo de agua de enfriamiento requerido en el proceso.

Otros variables importantes que determinan la eficiencia de una torre son:

- Evaporación, es la cantidad de agua en forma de vapor que sale de la torre. Las pérdidas por evaporación son 1% aproximadamente del agua de recirculación por cada 5.6°C de rango de enfriamiento.
- Arrastre, es el agua pérdida en forma de gotas, arrastrada por el aire saliente. Depende del tipo de torre y de las condiciones atmosféricas. Normalmente menor a 1% del agua recirculada.
- Purga, es la cantidad de agua descargada del sistema para controlar la concentración de sales o impurezas disueltas en el agua recirculada. Aproximadamente 1% del agua recirculada.
- Reposición, es la cantidad de agua fresca que se introduce al sistema para reponer las pérdidas de agua por evaporación, arrastre, purga y fugas.

- Localización de la torre dentro de la planta, la orientación de las torres de enfriamiento debe estar considerada de acuerdo a la dirección de los vientos dominantes y al plano de localización general de la planta, con la finalidad de asegurar la adecuada circulación del aire a través de la torre, así como evitar problemas de interferencia por la cercanía con otros equipos o instalaciones.

El principio de la operación de las torres de enfriamiento es relativamente sencillo comparado con otros equipos de proceso. Sin embargo, el análisis de su funcionamiento es complejo debido al número de variables involucradas. La reducción de temperatura es el resultado de dos mecanismos simultáneos. En el primero, hay un intercambio de calor sensible entre el agua caliente y el aire frío. El segundo y más importante, es la evaporación de una porción del agua caliente. El calor de evaporación es suministrado por el calor sensible del cuerpo principal de agua, causando disminución en su temperatura

En la sección superior de la torre el mecanismo predominante es la transferencia de calor sensible debido a que en este punto existe la mayor diferencia de temperaturas entre el agua caliente y la temperatura de bulbo seco del aire a la salida

En la parte inferior el mecanismo controlante es la transferencia de masa, debido a que el aire entrante, con humedad relativa menor a la de saturación se pone en contacto con agua fría, existiendo un potencial fijado por la diferencia entre la temperatura del agua y la temperatura de bulbo húmedo del aire, favoreciendo la evaporación del agua y por lo tanto su enfriamiento.

Las ecuaciones que describen el comportamiento termodinámico de las torres de enfriamiento son:

Balance simplificado de energía,

$$L C_p (T_2 - T_1) = G (H_2 - H_1) \quad (I.1)$$

y la ecuación característica de la torre:

$$\int dT/(H_s - H) = Ka V/L \quad (1.2)$$

donde :

L es el flujo de agua recirculada, kg/h

Cp es es la capacidad calorífica del agua, kcal/kg °C

T₂ es la temperatura del agua caliente, °C

T₁ es la temperatura del agua fría, °C

G es el flujo de aire, kg/h

H₂ es la entalpía del aire a la salida, kcal/kg

H₁ es la entalpía del aire a la entrada, kcal/kg

dT es el diferencial de temperatura en el rango de enfriamiento del agua, °C

H_s es la entalpía de saturación, kcal/kg

H es la entalpía actual de la mezcla aire-agua, kcal/kg

Ka es el producto del coeficiente global de transferencia de calor y el área superficial de transferencia.

V es el volumen empacado.

Las ecuaciones (1.1) y (1.2) se representan gráficamente en un diagrama temperatura contra entalpía, como el que se muestra en la figura I.12.

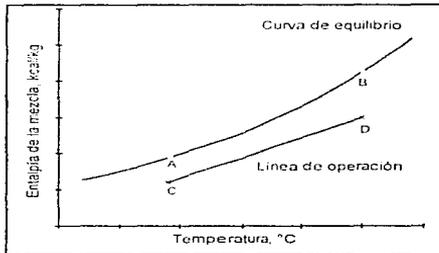


Figura No. I.12 Diagrama de operación de una torre de enfriamiento

La curva A-B representa la curva de equilibrio, entalpía del aire saturado a diferentes temperaturas dentro del rango de enfriamiento, y los puntos A y B están fijados por la temperatura del agua a la entrada t_1 y salida t_2 , respectivamente

La representación gráfica de la ecuación (I.1), línea C-D, es llamada línea de operación e indica la entalpía actual del aire graficada contra la temperatura del agua en el rango de enfriamiento. La temperatura de bulbo húmedo de cualquier punto de la línea C-D es encontrado proyectando el punto hacia la línea de saturación y después verticalmente a las abscisas del diagrama. Las líneas B-D y A-C representan la fuerza directriz inicial y final, respectivamente.

El área de la gráfica limitada por la curva de equilibrio y la línea de operación, puntos ABCD, es llamada la característica de la torre $(K_a V/L)^{-1}$, y representa el potencial que dirige la transferencia de calor total. A menor área, el valor de $K_a V/L$ es mayor, implicando mayor área o volumen de contacto para un flujo de agua dado, y por lo tanto, mayor costo de inversión. El incremento del área ABCD puede lograrse incrementando el acercamiento o reduciendo la relación L/G, sin embargo, la reducción de la relación L/G implica mayor consumo de potencia en los ventiladores.

1.6 Cambiadores de calor [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]

En todos los procesos industriales se requiere suministrar o eliminar energía de las corrientes, con el fin de adecuarlas a condiciones de proceso o almacenamiento necesarias. Los cambiadores de calor son los equipos donde se transfiere energía entre dos fluidos.

1.6.1 Clasificación de cambiadores de calor

Los cambiadores de calor pueden clasificarse de acuerdo a su servicio o de acuerdo a su construcción.

De acuerdo a su servicio se clasifican en:

- a. **Calentadores**, cuyo objetivo es calentar una corriente de proceso mediante un servicio auxiliar de calentamiento, por ejemplo, vapor, gases de combustión o fluidos térmicos.
- b. **Enfriadores**, se usan para enfriar una corriente de proceso mediante un servicio auxiliar de enfriamiento, por ejemplo, agua, aire o refrigerantes.
- c. **Intercambiadores**, en estos el objetivo es recuperar energía, intercambiando calor entre dos corrientes de proceso.

De acuerdo a su construcción se clasifican en:

- a. **Contacto Directo**
 - Condensadores de contacto
 - Torres de enfriamiento

- b. **Contacto Indirecto**
 - Doble tubo
 - Multitubo
 - Tubos y envolvente
 - De placas
 - Serpentines
 - Tipo bayoneta
 - De chaqueta
 - Calentadores a fuego directo
 - Enfriadores con aire

En este trabajo se hace una breve descripción únicamente de los cambiadores tipo **tubos y envolvente** y de los enfriadores con aire, debido a que son los más usados para el servicio de enfriamiento en la refinería en estudio.

1.6.2 Cambiadores de tubos y envolvente

Estos equipos son los de mayor uso porque proporcionan mayor área de transferencia por área ocupada, pueden construirse en una amplia gama de tamaños, se adaptan a diferentes servicios y fenómenos, facilitan el mantenimiento, así como por su relación de costo por unidad de área, entre otras razones.

Este tipo de equipo consiste de un haz de tubos fijado en un espejo (rolados o soldados) en diferentes arreglos (triangular, cuadrado) dentro de una coraza, equipada básicamente con cabezales de distribución de flujo, mamparas o soportes de tubos y boquillas de entrada y salida de los fluidos. En la figura 1.13 se muestra un esquema de este tipo de cambiadores.



Figura No. 1.13 Cambiador de calor de tubos y envoltorio

Los cambiadores de tubos y envoltorio se denominan de acuerdo al estándar TEMA¹, con letras que indican el tipo de cabezal de admisión, tipo de envoltorio y el tipo de cabezal de retorno. La figura 1.13 muestra los diferentes tipos de equipos establecidos en el TEMA.

1.6.3 Enfriadores con aire o aeroenfriadores

Un aeroenfriador (conocido también como enfriadores solo-aire) consiste de un banco de tubos, por dentro del cual se hace pasar un fluido de proceso que se desea enfriar o condensar. Por fuera de dicho banco se hace pasar una corriente de aire, mediante un ventilador, reduciendo la temperatura del fluido de proceso hasta algún punto cercano a la del bulbo seco del aire.

El haz de tubos está constituido por camas o hileras de tubos en arreglo triangular o cuadrado, en posición horizontal, inclinada o vertical. El haz de tubos cuenta con cabezales de distribución de flujo, estructuras laterales y soportes de tubos.

¹ TEMA es la Asociación de Fabricantes de Cambiadores Tubulares, (Tubular Exchanger Manufacturers Association), encargada de emitir normas para unificar criterios de diseño y construcción entre fabricantes de cambiadores de calor de tubos y envoltorio.

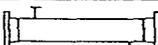
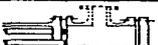
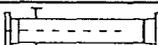
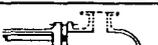
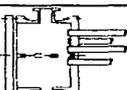
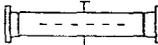
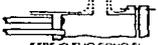
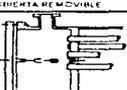
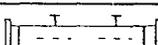
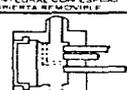
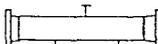
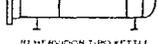
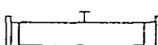
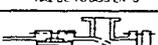
TIPO DE CABEZAL ESTACIONARIO DE ADMISION		TIPO DE CORAZA	TIPO DE CABEZAL DE RETORNO		
A	 CUBIERTA Y CANAL REMOVIBLES	E	 CORAZA DE UN PASO	L	 ESPEJO FLUJO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO TIPO "1A"
B	 NON-REMOVIBLE INTEGRAL	F	 CORAZA DE DOS PASOS CON MANIFRA LONGITUDINAL	M	 ESPEJO FLUJO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO TIPO "1B"
C	 CANAL INTEGRAL CON ESPEJO Y CUBIERTA REMOVIBLE	G	 FLUJO PARTIDO	N	 ESPEJO FLUJO COMO EL CABEZAL ESTACIONARIO TIPO "1C"
N	 CANAL INTEGRAL CON ESPEJO Y CUBIERTA REMOVIBLE	H	 FLUJO DOBLEMENTE PARTIDO	P	 CABEZAL FLOTANTE EMPACADO EXTERNAMENTE
D	 CABEZAL ESPECIAL DE ALTA PRESION	J	 FLUJO PARTIDO	S	 CABEZAL FLOTANTE CON CONTRABRIDA DE APOYO
		K	 RENERACION TIPO KETTEL	T	 CABEZAL FLOTANTE
		X	 FLUJO CRUZADO	U	 HAZ DE TUBOS EN "U"
				W	 ESPEJO FLOTANTE SELLADO EXTERNAMENTE

Tabla No. I.14 Normalización del TEMA

Los tubos de un aerorefrigerador pueden ser aletados, generalmente en forma helicoidal, para proporcionar superficie extra compensando la deficiente capacidad del aire para transferir calor. En la figura 1.15 se presenta un esquema de un aerorefrigerador, señalando la estructura general del mismo.

Los aerorefrigeradores pueden ser de tiro forzado, con los ventiladores colocados por debajo del haz de tubos, de tal manera que empujen el aire a través de los tubos, o de tiro inducido, donde el ventilador está colocado arriba del haz de tubos para succionar el aire a través de éste. La figura 1.15 muestra los dos tipos de aerorefrigeradores arriba mencionados.

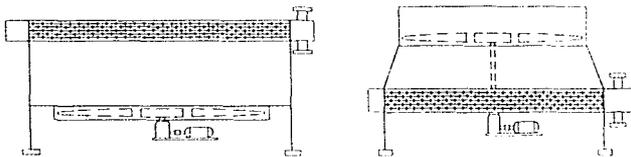


Figura 1.15 Esquema de un aerorefrigerador

Los aerorefrigeradores son usados para ahorrar agua cuando existen limitaciones en la disponibilidad de agua para enfriamiento y la temperatura del fluido de proceso es alta. Las desventajas de este equipo son la limitación en la temperatura de salida del fluido de proceso, el alto costo de inversión y el peligro de fuga para fluidos tóxicos, explosivos o inflamables.

Uno de los factores más importantes a considerar para seleccionar la temperatura de diseño del aire, es la temperatura de bulbo seco del lugar. Un valor práctico para la temperatura de diseño es la temperatura ambiente máxima del aire menos 5 a 11 °C, dependiendo de la localización y las condiciones de proceso.

En general, un acercamiento mínimo del orden de 22 °C entre la temperatura de salida de proceso y de entrada del aire, resulta altamente competitivo y

recomendable, ya que se tiene un correcto balance entre eficiencia-economía y operación estable.

1.6.4 Ecuaciones básicas de intercambio térmico

En un cambiador de calor se presentan los tres mecanismos básicos de transferencia de calor : conducción, convección y radiación, sin embargo el que predomina es el de convección, siendo la ecuación de diseño de los cambiadores de calor la siguiente :

$$dq = U (T - t) dA \quad (1.3)$$

donde:

dq = diferencial de calor

U = coeficiente global de transferencia de calor

$(T-t)$ = diferencia de temperaturas entre el fluido caliente y frío

dA = diferencial de área de transferencia

Para la integración y simplificación de la ecuación (1.3) se consideran las siguientes suposiciones :

1. El sistema está en régimen estacionario.
2. El coeficiente global de transferencia de calor es constante a lo largo de toda la trayectoria.
3. La gráfica de temperatura vs. Liberación de calor es lineal.
4. La temperatura de ambos fluidos es uniforme en cualquier sección a lo largo de la trayectoria, independientemente de la disposición de los flujos.
5. El calor perdido en los alrededores es despreciable.

Integrando la ecuación (1.3):

$$A = \int_0^Q \frac{1}{U(T-t)} dq \quad (1.4)$$

La integración de la ecuación proporciona la solución elemental para la diferencia media de temperaturas, la cual resulta ser función de la media logarítmica de las diferencias terminales, quedando como siguen:

$$A = \frac{Q}{U \text{ LMTD}} \quad (1.5)$$

donde:

Q es la carga térmica transferida en el equipo, calculada por balance de calor entre la corriente fría y caliente.

A es el área de transferencia de calor (m²).

LMTD es la diferencia media logarítmica de temperaturas, la cual puede calcularse dependiendo de las disposición de flujos en el equipo:

- Flujo en contracorriente, es decir que uno de los fluidos circule en sentido opuesto al otro, esto se lleva a cabo en un cambiador 1-1, (un paso por tubos y un paso por envolvente) :

$$\text{LMTD} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (1.6)$$

- Flujo en paralelo, cuando los fluidos circulan en el mismo sentido :

$$\text{LMTD} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \quad (1.7)$$

Sin embargo, sólo en casos limitados se presentan arreglos de flujo en paralelo o contracorriente puros, los cambiadores con dos o más pasos por tubos presentan una combinación de flujo en paralelo y flujo a contracorriente. Esto representa una pérdida en la eficiencia térmica del equipo con respecto al flujo en contracorriente. Esta pérdida se toma en consideración aplicando un factor de corrección Ft de la siguiente manera:

$$\Delta T = LMTD \times Ft \quad (1.8)$$

donde :

ΔT es la diferencia media de temperaturas corregida

LMTD es la correspondiente a flujo a contracorriente

Ft es el factor de corrección por tipo de flujo, el cual se calcula analítica o gráficamente, a partir del arreglo de flujo y de los parámetros P y R, los cuales se definen a partir de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, como sigue:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (1.9)$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (1.10)$$

En el caso de los aerofriadores, la dirección del aire es perpendicular a la dirección del flujo por dentro de tubos, es decir flujo cruzado, y la ΔT para este caso se calcula aplicando la LMTD un factor de corrección F_{FC} , similar al Ft.

Las gráficas para la determinación del Ft se pueden ver en el estándar TEMA y las gráficas para obtener el factor F_{FC} se pueden ver en el manual HEDH².

El coeficiente global de transferencia de calor (U), se obtiene de la siguiente forma:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{io}} + \frac{1}{h_o} + R_w + R_{di} + R_{do}} \quad (1.11)$$

donde :

h_{io} representa el coeficiente de película por dentro de tubos referido al área externa de los tubos

h_o es el coeficiente de película por fuera de tubos

R_w es la resistencia del material en función del espesor del tubo

R_{di} es la resistencia por ensuciamiento del fluido del lado interno de los tubos

² HEDH, Heat Exchanger Design Handbook.

Rdo es la resistencia por ensuciamiento del fluido del lado externo de los tubos
 Los coeficientes de película se obtienen mediante correlaciones empíricas como las siguientes:

- Para régimen laminar sin cambio de fase y por dentro de tubos se tiene la ecuación de Sieder y Tate ($Re < 2100$) :

$$Nu = 1.86 (Re Pr \frac{D}{L})^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (I.12)$$

- Para régimen turbulento sin cambio de fase y por dentro de tubos se tiene la ecuación de Sieder y Tate ($Re \geq 10,000$) :

$$Nu = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (I.13)$$

donde :

Nu es el número de Nusselt

Pr es el número de Prándtl

Re es el número de Reynolds

μ es la viscosidad en el seno del fluido y μ_w es la viscosidad del fluido en la pared del tubo.

1.7 Calidad del agua de enfriamiento [19], [20], [29], [30] [31]

La calidad del agua es un factor importante en la operación de los sistemas de enfriamiento con agua, afectando su eficiencia, confiabilidad y la vida del sistema. La calidad del agua empleada en los sistemas de enfriamiento varía de acuerdo a la fuente de suministro y se modifica por su paso a través del sistema de enfriamiento. Algunos de los contaminantes disueltos, suspendidos y arrastrados por el agua son fuentes de problemas tales como incrustación, corrosión, sedimentación, crecimiento biológico y reducción del flujo de agua. En esta sección se mencionan las causas de estos problemas y las medidas para reducir su afectación como son las consideraciones de diseño del equipo y el tratamiento físico-químico del agua.

1.7.1 Análisis del agua

Un análisis completo de cualquier agua de reposición puede resultar con sólidos y gases disueltos, sólidos coloidales y sólidos suspendidos, sin embargo sólo algunos compuestos afectan la operación y vida de los sistemas de enfriamiento, una análisis típico de agua de enfriamiento reporta los siguientes parámetros:

- pH
- Alcalinidad Total, ppm
- Dureza Total, ppm
- Dureza de Calcio, ppm
- Dureza de Magnesio, ppm
- Sílice, ppm
- Conductividad, m mohos/cm
- Temperatura, °C
- Fe, ppm

La calidad del agua cambia durante la operación del sistema de enfriamiento, por lo tanto los efectos potenciales causados por el agua son función de la composición del agua de recirculación.

Los procesos que cambian la composición del agua recirculada son:

- Cambios de temperatura. El incremento de temperatura en los cambiadores de calor cambia la composición del agua cuando están presentes sales con solubilidad inversa, es decir que disminuye su solubilidad al aumentar la temperatura.
- Evaporación. La evaporación de agua pura en la torre de enfriamiento causa el incremento en la concentración de los contaminantes del agua recirculada.
- Contacto con el aire. Al estar en contacto el agua con aire dentro de la torre de enfriamiento, los contaminantes del aire pasan hacia el agua, aumentando la concentración de oxígeno, gases y partículas, así como la formación y adherencia de organismos aeróbicos
- Contaminación con el proceso. Los cambios en la composición del agua de

enfriamiento pueden ser causados por fugas de las corrientes de procesos en los cambiadores de calor.

Para la predicción del comportamiento del agua se utilizan índices que nos ayudan a determinar el tipo de tratamiento a realizarse.

Langelier desarrolló un método para predecir la estabilidad del agua, en donde si el pH real del agua está por debajo del nivel de pH a saturación, el agua tiene un índice de saturación negativo y disolverá al carbonato de calcio (CaCO_3). Generalmente esto también se interpreta indicando que el agua puede corroer el acero en presencia de oxígeno. Si el índice de saturación es positivo, $\text{pH} > \text{pH}_s$, la tendencia del agua es a formar incrustaciones por la precipitación del CaCO_3 . Cuanto mayor es la desviación del pH real del pH_s , más pronunciada es la inestabilidad. El índice de saturación también es conocido como índice de Langelier.

$$\text{Índice de saturación} = \text{IL} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

El índice de estabilidad y también llamado índice de Ryznar es una modificación del índice de Langelier que predice de forma más segura la tendencia a la corrosión o a la formación de incrustación

$$\text{Índice de estabilidad} = \text{IE} = 2 \text{pH}_s - \text{pH}$$

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

donde:

pH_s = pH de saturación

pH = pH actual del agua

A, B, C y D son parámetros que dependen de la dureza por calcio, alcalinidad total, concentración de sólidos disueltos y temperatura máxima del agua, los cuales se muestran en la tabla I.1.

Sólidos totales ppm		A	Dureza de calcio ppm CaCO ₃	C	Alcalinidad total ppm CaCO ₃	D
50-350		0.1	10	0.6	10	1.0
400-1100		0.2	12	0.7	12	1.1
			14	0.8	14	1.2
Temperatura		B	18	0.9	18	1.3
°C	°F		23	1.0	23	1.4
0	32	2.6	28	1.1	28	1.5
2	36	2.5	35	1.2	36	1.6
7	44	2.4	44	1.3	45	1.7
10	50	2.3	56	1.4	56	1.8
14	58	2.2	70	1.5	70	1.9
18	64	2.1	88	1.6	88	2.0
22	72	2.0	111	1.7	111	2.1
28	82	1.9	139	1.8	140	2.2
32	90	1.8	175	1.9	177	2.3
38	100	1.7	230	2.0	230	2.4
44	112	1.6	280	2.1	280	2.5
51	124	1.5	350	2.2	360	2.6
57	134	1.4	440	2.3	450	2.7
64	148	1.3	560	2.4	560	2.8
72	162	1.2	700	2.5	700	2.9
82	180	1.1	870	2.6	880	3.0
			1050	2.7		

Tabla No. 1.1 Parámetros para el cálculo del Índice de Riznar

Para un índice de estabilidad IE > 6.5, el agua tiene tendencia a corroer.

Para un índice de estabilidad IE < 6.0, el agua tiene tendencia a formar incrustación.

1.7.2 Problemas causados por los contaminantes del agua

Existen cinco tipos principales de problemas en los sistemas de enfriamiento: formación de incrustación, corrosión, crecimiento orgánico (algas y lama), sedimentación y reducción del flujo de agua.

a. Incrustación

La incrustación es la formación de depósitos causada por la cristalización de sales disueltas cuando su concentración excede su solubilidad. Muchos de los

compuestos que forman depósitos en los sistemas de agua de enfriamiento tienen la inusual propiedad de ser menos solubles con el incremento de la temperatura. Estos depósitos se adhieren a las superficies de los equipos, disminuyendo la transferencia de calor.

En los sistemas de enfriamiento la deposición del sulfato de calcio sigue a la del carbonato de calcio, particularmente en los sistemas tratados con ácido sulfúrico para ajustar el pH como control de la formación de depósitos de carbonato de calcio. Sin embargo, el carbonato de calcio es más de 20 veces más soluble que el sulfato de calcio bajo las mismas condiciones de temperatura. Los ciclos de concentración en el agua de enfriamiento pueden estar limitados por el potencial para la formación de incrustaciones de sulfato de calcio.

Cuando el contenido de sílice en el agua de reposición excede los 40 a 50 mg/l de SiO_2 , pueden formarse depósitos de sílice por lo que este puede ser el factor para la determinación de los ciclos de concentración máximos en el agua recirculada. De igual forma los depósitos de fosfato de calcio pueden causar problemas cuando hay presentes fosfatos ya sea en el agua de reposición o como parte del programa de tratamiento

b. Corrosión

La corrosión es probablemente la principal causa de daño en los equipos. La corrosión es la destrucción de un metal por la reacción química o electroquímica que tiene lugar cuando están presentes agua y un agente polarizante tal como el oxígeno disuelto en el agua durante la operación de una torre de enfriamiento. La corrosión en los sistemas de enfriamiento ocurre principalmente de dos formas: General, en la cual se reduce uniformemente la superficie metálica y, Picaduras, en la cual el metal se perfora por la formación de celdas de concentración localizadas. La velocidad de la corrosión se incrementa con la temperatura y con valores de pH bajos, además la velocidad del agua y la formación de depósitos y sedimentos influyen en la corrosión localizada

acelerando sus efectos destructivos. Esta es una de las causas más comunes de corrosión en los sistemas de enfriamiento. Por otra parte, velocidades excesivas pueden producir erosión, la cual es particularmente rápida en cobre y en muchas de sus aleaciones.

c. Crecimiento biológico

El ensuciamiento biológico o bio-ensuciamiento se refiere al crecimiento excesivo de bacterias, algas y hongos, así como a la interacción de estos microorganismos con el volumen de agua y sus contaminantes.

El bioensuciamiento retarda la transferencia de calor por un efecto de aislamiento, sirve como aglutinador de material suspendido productos de la corrosión, etc., genera obstrucciones en el sistema de distribución de torres, causando la reducción del contacto aire-agua y por lo tanto el efecto evaporativo y puede causar corrosión aeróbica y anaeróbica.

d. Sedimentación

La sedimentación de sólidos suspendidos pueden producir depósitos a lo largo de la parte inferior de tubos horizontales en las torres de enfriamiento o en cualquier punto donde una velocidad menor a la normal permita la sedimentación.

La cantidad y rapidez de deposición depende de la naturaleza y tamaño de los sólidos suspendidos, así como de la hidráulica del sistema. Regularmente los depósitos de sólidos suspendidos son suaves y no se adhieren fuertemente a la superficie.

e. Reducción del flujo de agua

La acumulación de sedimentos, productos de la corrosión, depósitos o bio-ensuciamiento, pueden reducir el flujo de agua en el sistema de enfriamiento, disminuyendo la eficiencia del mismo. Por ejemplo, el elevado crecimiento de algas en la charola de distribución de una torre puede tapar las boquillas de

distribución de agua, reduciendo el flujo de agua a través de la torre y modificando el patrón de flujo en la misma.

I.7.3 Medidas de reducción y control de los problemas

La prevención de los problemas potenciales causados por el agua de enfriamiento en el sistema requiere atención en la etapa de diseño del sistema y el control de los problemas requiere acciones correctivas (tratamiento de agua) durante la operación, ya que estas medidas nos proporcionan los siguientes beneficios: protección de tubería y equipo de intercambio térmico, menores costos de mantenimiento, químicos y agua de reposición.

a. Diseño del sistema (torres de enfriamiento, cambiadores de calor y tubería)

En las torres de enfriamiento, la correcta selección del tipo y arreglo de empaque puede evitar problemas de canalizaciones y obstrucciones. En el dimensionamiento de los enfriadores, debe optimizarse la velocidad del agua para reducir el problema de sedimentación pero evitando la erosión del material. Ensuciamientos permisibles altos generan áreas de transferencia excesivas, llevando a condiciones que fomentan el ensuciamiento por encima del especificado en el diseño por bajas velocidades.

Otro aspecto importante para prevenir problemas en la operación de un sistema de enfriamiento es la correcta selección de los materiales de construcción de tuberías y equipo, de acuerdo a la calidad del agua disponible y a las condiciones de operación.

b. Tratamiento de agua

El agua de enfriamiento, independientemente de su fuente, siempre requiere de tratamiento con el propósito de reducir su tendencia a ensuciar cuando está en contacto con una superficie de transferencia de calor. Existe una gran variedad de tratamientos, que se aplican dependiendo de la calidad del agua disponible.

A continuación se mencionan algunos tipos de tratamientos recomendados de acuerdo al problema presente:

b.1 Incrustación

El control de la incrustación consiste en limitar el potencial para la formación de depósitos a una concentración menor a la saturación y/o prevenir la aglomeración de partículas suspendidas, dispersando los depósitos formados. Dentro de los compuestos utilizados para la prevención de las incrustaciones destacan los polifosfatos, polímeros polielectrolíticos, fosfatos orgánicos y ésteres fosfatos. Su habilidad para prevenir las incrustaciones de carbonato y sulfato de calcio han dado lugar a los programas de pH alto, con un rango de 8 a 8.5., evitando problemas de corrosión por la adición de ácidos.

El uso de agua de reposición con elevada concentración de sílice provoca la formación de incrustaciones de sílice difíciles de remover. Estas incrustaciones pueden evitarse limitando el contenido de sílice a un máximo de 150-200 ppm (como SiO_2).

b.2. Corrosión

El control de la corrosión en los sistemas de enfriamiento debe ser considerado en la etapa de diseño. La selección del material, la velocidad del agua en el cambiador y la temperatura de operación son factores tan importantes como el tipo de inhibidor usado.

La función de los inhibidores de corrosión es crear una barrera protectora entre el metal y el medio corrosivo.

Los cromatos son normalmente efectivos en los sistemas de enfriamiento. Las formulaciones de estos inhibidores pueden incluir sales de zinc, fosfonatos, poliácridamidas o mezclas.

b.3 Sedimentación

La sedimentación de partículas suspendidas puede reducirse previniendo su entrada al sistema, limitando su acumulación en el agua de recirculación o manteniéndola dispersa en el agua. La prevención de la entrada de sólidos acumulables en el agua de reposición por coagulación y filtración es practicada en muchas instalaciones.

El material suspendido puede mantenerse en niveles aceptables pasando una porción del agua recirculada (1-5%) a través de filtros o hidrociclones.

Los dispersantes basados en polímeros aniónicos (poliacrilatos, polioarilamida, ácido polimaléico, copolímeros, terpolímeros, lignosulfonatos), o no iónicos (nonil fenol etoxilado), funcionan para estabilizar partículas coloidales y formadoras de incrustación en suspensión. Los polímeros aniónicos previenen además la aglomeración de partículas suspendidas, ya sea por repulsión de cargas o distorsión de cristales, mientras que los polímeros no iónicos reducen la tensión superficial de las partículas y redispersan el material sedimentado.

b.4 Crecimiento biológico

La reducción de algas y lama bacteriana es importante porque éstas reducen la transferencia de calor, disminuyen el flujo de agua de enfriamiento por taponamiento, producen corrosión localizada y sirven como aglutinadores para el rápido crecimiento de sedimentos, productos de la corrosión y depósitos. La selección del biocida está basada en un número de variables que incluyen: el tipo de crecimiento microbiano, la química del agua, el diseño del sistema, la compatibilidad con otros productos, consideraciones de costo, seguridad en el manejo y regulaciones ecológicas y de medio ambiente.

Muchos de los químicos disponibles para el control microbiológico en los sistemas de enfriamiento incluyen cloro, dióxido de cloro, compuestos oxidantes, una variedad de compuestos de amonio, compuestos estano-orgánicos, clorofenatos y tiocianatos orgánicos. Algunos de estos compuestos tienen una

efectividad de amplio espectro y otros son específicos para un limitado rango de organismos. El cloro y otros microbiocidas oxidantes, tal como el sulfato y pentaclorofenato de cobre, tienen amplia efectividad y son muy usados.

CAPITULO II

DESCRIPCION Y ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERIA

- II.1 Descripción del sistema de enfriamiento**
- II.2 Información de la operación del sistema**
- II.3 Balance de materia y energía**
- II.4 Índices energéticos**

II. DESCRIPCIÓN Y ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE LA REFINERÍA.

II.1 Descripción del sistema de enfriamiento

La Refinería "Miguel Hidalgo" se encuentra dividida en los siguientes sectores:

- Sector 1:** Planta de Destilación Combinada
Planta Reductora de Viscosidad
- Sector 2:** Planta de Desintegración Catalítica FCC-1 (con dos racks de tuberías: rack poniente y rack oriente)
Planta Recuperadora de Azufre No. 1
Planta Recuperadora de Azufre No. 2
- Sector 3:** Planta Hidrodesulfuradora de Naftas U-401
Planta Reformadora de Naftas U-501
Planta Fraccionadora de Ligeros y Pesados U-601
Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios U-701
Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios U-801
Planta de Regeneración Continua de Catalizador No. 1
- Sector 4:** Área de Almacenamiento
- Sector 5:** Servicios Auxiliares
- Sector 5A:** Pretratamiento y Almacenamiento de Agua Cruda
- Sector 6:** Área de Efluentes y Crogénica
- Sector 7:** Planta Estabilizadora No. 1
Planta Estabilizadora No. 2
Planta de Destilación Atmosférica No. 2

Planta de Destilación al Vacío No. 2

Planta de Tratamiento Oximer de Turbosina

Sector 8: Planta Hidrodesulfuradora de Naftas U-402

Planta Reformadora de Naftas U-502

Planta Fraccionadora de Ligeros y Pesados U-602

Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios U-702

Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios U-802

Planta de Regeneración Continua de Catalizador No. 2

Sector 9: Planta de Desintegración Catalítica FCC-2 (con dos racks de tuberías: rack norte y rack sur)

Sector 10: H-Oil

El sistema de agua de enfriamiento es del tipo abierto de recirculación y está constituido por 6 torres de enfriamiento moduladas con celdas de capacidad de 10,000 GPM cada una, con una capacidad total de 490,000 GPM, que dan servicio de acuerdo a la distribución de la tabla I.1.

TORRE	No. Celdas	Capacidad Total	Distribución a:	Flujo de Diseño
CT-500	6	60,000	Sector 1	43,860
CT-501	5	50,000	Sector 5	-
CT-501A	5	50,000	Sector 5	-
CT-502	13	130,000	Sector 2 Sector 3	106,948
CT-503	12	120,000	Sector 7 Sector 9	111,589
CT-506	8	80,000	Sector 8	55,350

Tabla No. II.1 Distribución de agua de enfriamiento en la refinería

El agua de reposición es suministrada por una red de 8 pozos profundos ubicados en las áreas de Teocalco y Mangas, situados a 15 km aproximadamente de la refinería y con pretratamiento para disminuir sólidos disueltos. En las figuras II.1 se presentan esquemas de la distribución por torre del agua de enfriamiento en la refinería.

II.2 Información de la operación del sistema

La información de diseño del sistema se obtuvo de los siguientes documentos:

- Listas de equipo
- Diagramas de flujo de proceso
- Hojas de datos de cambiadores de calor
- Hojas de datos de bombas
- Hojas de datos de
- Diagramas de tubería e instrumentación
- Diagramas de balances de servicios
- Isométricos de tuberías
- Planos de fabricación de torres de enfriamiento
- Hojas de datos de torres de enfriamiento
- Curvas de operación de las bombas de suministro de agua
- Bitácoras de operación de torres de enfriamiento
- Balance general de agua de enfriamiento de la refinería
- Reportes de análisis químicos del agua
- Planos de localización general de la refinería y plantas
- Reportes de condiciones climatológicas del lugar

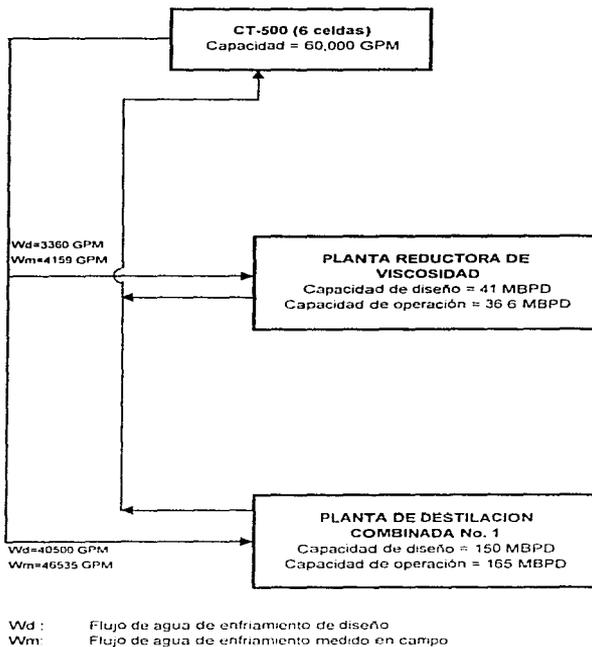
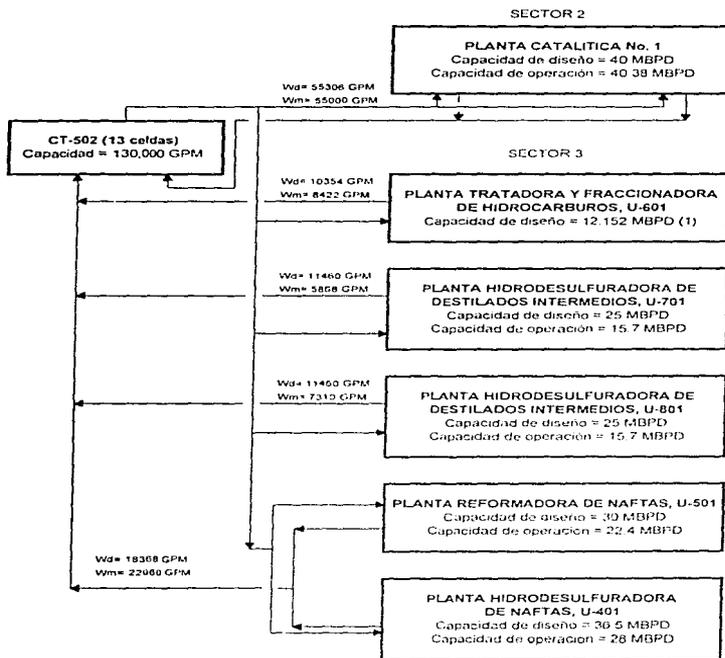
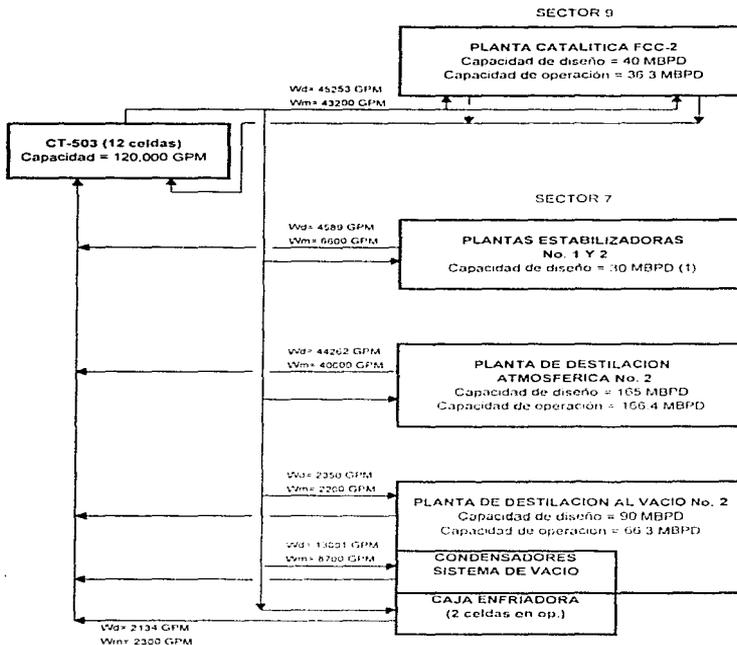


Figura No. II.1a Diagrama de distribución de la torre CT-500



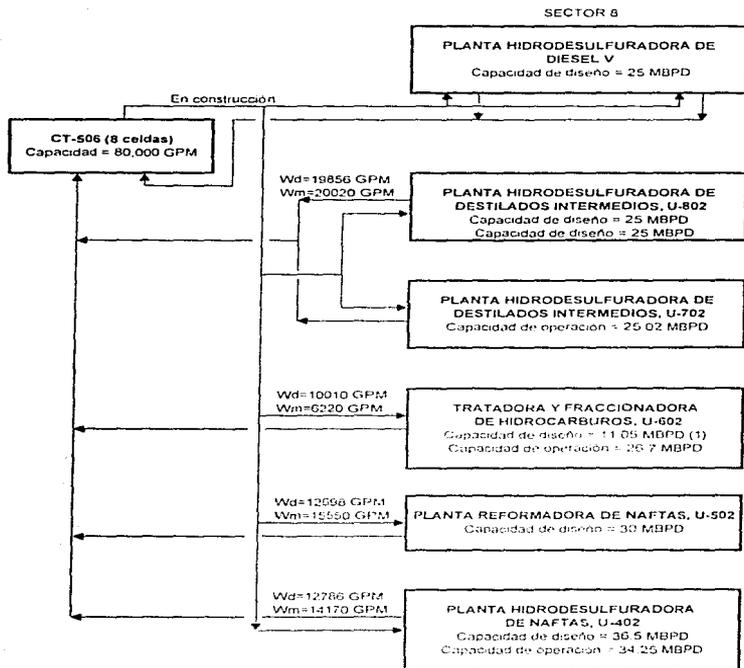
(1) No se dispone del dato de la capacidad de operación
Wd : Flujo de agua de enfriamiento de diseño
Wm: Flujo de agua de enfriamiento medido en campo

Figura No. II. 1b Diagrama de distribución de la torre CT-502



(1) No se dispone del dato de la capacidad de operación
 Wd: Flujo de agua de enfriamiento de diseño
 Wm: Flujo de agua de enfriamiento medido en campo

Figura No. II.1c Diagrama de distribución de la torre CT-503



(1) No se dispone del dato de la capacidad de operación
Wd : Flujo de agua de enfriamiento de diseño
Wm: Flujo de agua de enfriamiento medido en campo

Figura No. II.1d Diagrama de distribución de la torre CT-506

Para la información de la operación actual del sistema se consideraron los datos promedios obtenidos de las bitácoras de los meses de agosto de 1994 a julio de 1995, complementando la información con mediciones realizadas en campo.

Las características de las torres de enfriamiento del sistema se muestran en la tabla II.2.

Torre	CT-500	CT-501	CT-501A	CT-502	CT-503	CT-506
Tiro	Inducido	Inducido	Inducido	Inducido	Inducido	Inducido
Flujo	Cruzado	Cruzado	Cruzado	Cruzado	Cruzado	Cruzado
Material	Madera	Madera	Concreto	Madera	Concreto	Concreto
No. de celdas	6	5	5	13	12	8
Flujo/celda, GPM	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Tac, °C	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1
Taf, °C	29.4	29.4	32.2	29.4	32.2	32.2
Tbh, °C	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
Rango, °C	16.67	16.67	13.89	16.67	13.89	13.89
Aproximación, °C	11.11	11.11	13.89	11.11	13.89	13.89
Qt/celda, MM kcal/h	37.9	37.8	31.5	37.8	31.5	31.5
Tipo de relleno	PVC "M"	PVC "M"	PVC "V"	PVC "M"	PVC "V"	PVC "V"
Arreglo, pulg.	Δ 12 x 8	Δ 12 x 8	8 x 16	Δ 12 x 8	8 x 24	Δ 8 x 16
Volumen emp., m ³	91.8	91.8	75.8	91.8	130	114.9
Potencia vent., kW	74.57	74.57	93.21	74.57	93.21	93.21

Tabla No. II.2 Características constructivas de las torres de enfriamiento

donde:

Tac = Temperatura de agua caliente

Taf = Temperatura de agua fría

Tbh = Temperatura de bulbo húmedo

La tabla II.3 muestra el flujo de diseño y operación actual de agua de recirculación y reposición en torres de enfriamiento.

Torre	Recirculación, GPM		Reposición, GPM	
	Diseño	Actual	Diseño	Actual
CT-500	60,000	49,087.5	1929.3	1416.6
CT-501	50,000	22,843.8	1607.7	605.8
CT-501A	50,000	24,437.5	1569.4	605.3
CT-502	130,000	87,125.0	4180.1	1933.7
CT-503	120,000	108,375.0	3410.9	3309.7
CT-506	80,000	49,087.5	2273.9	1058.7

Tabla No. II.3 Flujos de recirculación y reposición en torres de enfriamiento

La tabla II.4 muestra la potencia de diseño y de operación actual consumida por las bombas de agua y los ventiladores de torres de enfriamiento.

Torre	Bombas, kW		Ventiladores, kW	
	Diseño	Actual	Diseño	Actual
CT-500	2,742.3	2,179.6	447.4	386.0
CT-501	2,285.3	599.6	372.9	293.8
CT-501A	2,285.3	960.9	466.1	450.6
CT-502	5,941.7	4,269.7	969.4	764.5
CT-503	5,484.7	5,510.4	1,118.5	847.1
CT-506	3,656.4	1,797.8	745.7	493.6
Total	22,395.7	15,318.0	4,119.9	3,235.6

Tabla No. II.4 Potencia consumida en bombas de suministro y ventiladores

Las tablas II.3 y II.4 nos indican que las torres se encuentran operando por debajo de los requerimientos de diseño, situación que se analizará en el siguiente capítulo.

La tabla II.5 muestra los análisis realizados al agua de reposición y el promedio de los análisis al agua de recirculación de las torres de enfriamiento.

Parámetro	Reposición	Recirculación
Dureza Total, ppm	420	1135
Dureza de calcio	220	600
Cloruros, ppm	210	505
Silice (SiO ₂), ppm	65	171
Turbidez	2	2
Hierro, ppm	0	0.13
Alcalinidad "M"	330	150
pH	7.1	7.5
Sólidos Totales	1190	3150

Tabla No. II.5 Análisis químicos de agua de recirculación

Se realizó el levantamiento físico de la distribución del agua de enfriamiento de cada torre a las plantas de proceso, corroborando y complementando información que no aparece en isométricos y ubicando equipos en planos y/o isométricos.

La tabla III.6 muestra los flujos de diseño y actuales de agua de enfriamiento por planta. En ella se puede observar que actualmente 10 plantas manejan 20.2% más flujo que el de diseño (28,285 GPM) y 9 plantas presentan un déficit de 19.9% (34,822 GPM), situación que puede afectar la capacidad y operación de las plantas de acuerdo a las condiciones de diseño.

Cabe mencionar que debido a la ampliación de la refinería existe un requerimiento adicional de agua para plantas nuevas de 122,000 GPM.

Planta	Flujo de agua de enfriamiento	
	Diseño	Actual
Sector 1		
Destilación combinada	40500	48490
Reductora de viscosidad	3360	4159
Sector 2		
Catalítica 1	55306	55000
Sector 3		
Tratadora y fraccionadora de hidrocarburos, U-601	10354	8422
Hidrosulfuradora de destilados intermedios, U-701	11460	5868
Hidrosulfuradora de destilados intermedios, U-801	11460	7310
Hidrosulfuradora de naftas, U-401	18368	22960
Reformadora de naftas, U-501	(1)	(1)
Sector 7		
Estabilizadora 1 y 2	4589	6800
Destilación primaria 2	44262	40600
Destilación al vacío 2	2350 (2)	2200 (2)
Condensadores de vacío	13001	8700
Caja enfriadora	2134 (3)	2300 (3)
Sector 8		
Hidrosulfuradora de destilados intermedios, U-802	19856	20020
Hidrosulfuradora de destilados intermedios, U-702	(4)	(4)
Tratadora y fraccionadora de hidrocarburos, U-602	10010	6228
Reformadora de naftas, U-502	12698	15550
Hidrosulfuradora de naftas, U-402	12785	14170
Sector 9		
Catalítica 2, rack sur	16589	11870
Catalítica 2, rack norte	28564	31330

NOTAS:

- (1) El flujo de agua de la Reformadora de Naftas U-501 está considerado en el flujo de la Hidrosulfuradora de Naftas U-401
- (2) Incluye el flujo de agua de los condensadores de vacío y de la caja enfriadora de vacío
- (3) Flujo considerado para la operación de dos celdas de la caja enfriadora
- (4) El flujo de agua de la Hidrosulfuradora de Destilados Intermedios U-702 está considerado en el flujo de la Hidrosulfuradora de Destilados Intermedios U-802

Tabla No. II.6 Distribución de agua de enfriamiento por planta

II.2.1 Inspección física de las torres de enfriamiento.

Se realizó la inspección física en cada celda de las torres de enfriamiento, para verificar el estado de las mismas y corroborar la información mostrada en los planos. Los aspectos más relevantes son los siguientes:

Torre CT-500

- Paredes finales en buenas condiciones, sólo se requiere sellar algunas juntas.
- Puertas de acceso en mal estado, se requiere cambiar en ambos lados.
- Persianas, son de placa de asbesto cemento y soportes de madera tratada. 5% de las placas se encuentran rajadas, se requiere cambiar y sellar bien.
- Escalera de rampa. La escalera se mueve por falta de fijación adecuada a la torre. Se requiere asegurar, cambiar algunos escalones y una rampa
- Piso de ventiladores. Está en malas condiciones en las primeras cinco celdas. Se recomienda cambiar totalmente. La sexta celda está en regular estado.
- Barandales. Se encuentran en buenas condiciones.
- Cabezal de distribución de agua caliente, de acero al carbón galvanizado. En las celdas 1, 2, 4, 5 y 6 se encuentra en estado de corrosión avanzada. En la celda 3 se encuentra en regulares condiciones, sólo requiere limpieza y pintura.
- Puerta de acceso de depósito de agua caliente, de madera tratada. En malas condiciones, se recomienda cambiar en todas las celdas.
- Cajas de salpiqueo. Están en condiciones regulares, se requiere reparar y sellar, y cambiar totalmente en las celdas 1, 4 y 6.
- Depósito de agua caliente, de madera tratada con boquillas de polipropileno. Se encuentra tapada con lodo, orificios tapados, falta el 80% aprox. de las boquillas, 20% aprox. de duelas en mal estado y toda la tornillería deteriorada. En las celdas 1, 2, 3, 4 y 5, la cantidad de orificios es de 936; y en la celda 6 es de 1224, es necesario balancear

- Válvulas de control de flujo de agua caliente. En condiciones regulares, se requiere mantenimiento y reponer algunas. En la celda 6 se tienen instaladas válvulas tipo mariposa, con una de ellas atascada.
- Chimeneas, de fibra de vidrio. Algunas secciones dañadas en las celdas 1 y 5, cambiar tornillería, en algunos casos reponer los templadores y en la celda 6 cambiarlos.
- Relleno, de P V C. Se tienen 4 tipos de relleno, lo cual no es conveniente, ya que no hay uniformidad en el enfriamiento.

Celda 1: Perfil de PVC tipo "M" en 80%, perfil de PVC tipo "V" en 5%, parrilla de PVC híbrida en 10% y perfil de PVC tipo canaleta en 5%.

Celda 2: Perfil tipo "M" en 80%, perfil tipo "V" en 10%, parrilla híbrida 5% y perfil tipo canaleta 5%.

Celda 3: Perfil tipo "M" 90% y perfil tipo "V" 10%.

Celda 4: Perfil tipo "M" 80% y perfil tipo "V" 20%.

Celda 5: Perfil tipo "M" 50%, perfil tipo "V" 50%.

Celda 6: Perfil tipo V 100%.

En las celdas 1 a 5 (originales) la malla es de fibra de vidrio del fabricante original y el relleno está arreglado a 20.3 cm (8") en sentido horizontal y 30.5 cm (12") en sentido vertical, en la celda 6 tiene 22.9 cm (9") en sentido horizontal y 38.1 cm (15") en sentido vertical.

Es conveniente que en una reparación se uniformice todo el relleno a tipo "V" y al arreglo que resulte de un análisis térmico.

- Estructura. La cámara plena en las 5 celdas originales se encuentran en malas condiciones. Es necesario cambiarla totalmente, considerando que puede afectar al funcionamiento del equipo mecánico.

- Particiones, de madera tratada. Presenta tableros fabricados con tablilla de eliminadores que provoca paso de aire entre celdas. Se requiere reparar secciones y aplicar tratamientos.

- Eliminadores de rocío.

Celdas 1 a 5:

Diseño de dos pasos tipo espina de pescado. Es indispensable cambiarlos al 100% por el avanzado estado de deterioro.

Celda 6:

Aunque el material PVC está en buenas condiciones el diseño es inadecuado ya que carece de inclinación adecuada, los soportes separadores no tienen holgura y hay acumulación de agua. Lo anterior junto con la excesiva concentración de agua en esta zona (por falta de mantenimiento del depósito de agua caliente) ocasiona el arrastre excesivo de agua.

- Ventiladores. Se encuentran en buenas condiciones, requieren el mantenimiento normal, cambiar aspas dañadas, reponer las cubiertas de la maza y ajustar el claro entre aspas y la garganta del ventilador. Estos dos últimos detalles ocasionan disminución de la eficiencia del ventilador y consecuentemente de la cantidad de aire manejada y la eficiencia total de la torre.
- Reductores de velocidad. Los reductores de cinco celdas son originales. La placa de este último indica factor de servicio (FS) 1.0, no cumpliendo con el estándar correspondiente del CTI que establece un FS mínimo de 2. Es necesario dar mantenimiento a las líneas de llenado de aceite.
- Flechas de transmisión, de acero inoxidable. Se requiere dar mantenimiento, colocar insertos, balancear y alinear nuevamente para evitar vibración. Se requiere instalar protección de la flecha.
- Soportes del equipo mecánico, de acero protegido. En las celda 1 a 5, se encuentra en avanzado estado de corrosión, se requiere cambiar totalmente.

- Interruptor de vibración. No se pudieron comprobar por encontrarse cerrados. Es importante que operen por seguridad, cuidando que no operen en caso de sismo trepidatorio.
- Motores eléctricos para ventiladores. Motores de dos velocidades, de 100 HP. 3/60/440v. Requieren su mantenimiento normal y aprovechar las dos velocidades para ahorrar energía.

Torre CT-501 y CT-502

- Paredes finales, de asbesto cemento corrugado. En condiciones regulares, requieren correcciones mínimas y sencillas, que corresponden a un 40% en promedio de este componente.

Se presentan fugas de agua en los traslapes que es necesario limpiar y sellar, ya que se tienen incrustaciones que van separando las láminas.

Se han instalado láminas de asbesto cemento de diferentes ondas que es conveniente uniformizar para evitar fugas.

Se recomienda limpiar las láminas y cambiar o instalar el 100% de tornillería y pijas por estar en mal estado

- Puertas de acceso, es necesario instalar el 100% de las puertas, ya que una no se tiene y otra está en mal estado
- Persianas, de lámina de asbesto cemento corrugado. Se requiere sellar juntas entre láminas, cambiar las láminas rotas por nuevas, sellando las uniones e instalando tornillería y pijas nuevas. Es necesario limpiar la incrustación que presenta en los soportes de madera, sin cepillarlos.
- Escaleras de rampa. Están en buenas condiciones y sólo por seguridad se recomienda cambiar los escalones y las secciones de los barandales que se encuentren en mal estado usando metal galvanizado.

- **Piso de ventiladores.** Se han mantenido en buenas condiciones. Se requiere clavar las duelas de algunas zonas.
- **Barandales.** En buenas condiciones.
- **Cabezal de distribución de agua caliente,** tubo de 45.7 cm (18") de diámetro en acero al carbón galvanizado. Se encuentra en regulares condiciones y sólo es necesario limpiar y pintar. Aplicable a todas las celdas.
- **Puerta de acceso a depósito de agua caliente.** Se encuentran en condiciones regulares.
- **Cajas de salpiqueo,** de madera tratada. Se encuentran en buenas condiciones, solo es necesario sellar alrededor de la entrada de la válvula. En las celdas 8, 9 y 10 de la torre CT-502, se encuentra muy deteriorada, es necesario cambiar su tapa.
- **Depósito de agua caliente,** de madera tratada con boquillas de polipropileno. En condiciones regulares, se requiere limpiar de todos los depósitos, destapar orificios, teniendo cuidado de no romper las rosetas y reponer las faltantes, cambiar duelas en mal estado, sellar perimetralmente la unión entre pretiles y piso del depósito. Orificios de distribución deteriorados o sin calibrador, se requieren cambiar. Los pretiles se encuentran en regulares condiciones.
- **Balancear la cantidad de orificios entre celdas.**

Esta serie de deficiencias provocan que el nivel del agua en los depósitos suba y derrame el agua del lado de persianas y eliminadores ocasionando problemas similares a la torre CT-500.

- **Valvulas de control de flujo,** de hierro fundido. Se encuentran en condiciones regulares, los cuerpos de las válvulas requieren limpieza y pintura, los husillos de encuentran pegados, despegar y lubricar y reponer las palancas faltantes. En la celda 1 y 4 de la torre CT-502 reponer dos valvulas rotas.

- **Chimeneas o difusores.** Es necesario reponer los segmentos dañados, especialmente las puertas de acceso. Asimismo, es importante reponer los cables templadores para evitar deformación.
- **Relleno:**

Torre CT-501: mallas en fibra de vidrio y barras de salpiqueo de PVC tipo "M".
Celdas 1, 2 y 3:

- a) Mallas y barras se encuentran en buenas condiciones.
- b) Existen concentraciones de agua en la zona del relleno del lado de persianas, debido al desbordamiento del agua sobre los pretiles del lado de persianas. Esta concentración de agua disminuye la eficiencia de entriamiento y aumenta el arrastre.
- c) Existe mala distribución de agua en el relleno en la zona de diluvio, debido a orificios de distribución tapados por lodos, provocando disminución de la eficiencia.
- d) El relleno barra en "M" de PVC se encuentra instalado en sentido horizontal a cada 30.5 cm (12") y en sentido vertical a cada 20.3 cm (8"), con las barras alternadas.

Celdas 4 y 5:

- a) Mallas en fibra de vidrio y barras de salpiqueo tipo "V" de PVC.
- b) Mallas y barras de salpiqueo se encuentran en buenas condiciones.
- c) La instalación de las barras "V" en las mallas es en sentido horizontal 20.3 cm (8") y en sentido vertical 40.6 cm (16"). Esto representa menos del 22% del relleno de las celdas originales.

Torre CT-502:

Celdas No. 1 a 8 y Celda 10, mallas de fibra de vidrio y barras tipo "M" de PVC.

- a) Mallas en buenas condiciones.
- b) Relleno: No se encuentra amarrado a las mallas, razón por la cual existe 5% caído. Es necesario amarrar. Se recomienda reinstalar relleno tipo "V" de PVC.
- c) Existen concentraciones de agua del lado de las persianas y del lado del eliminador, debido a que el agua en los depósitos de distribución desborda sobre los pretilas ; esta concentración de agua produce baja de eficiencia en el enfriamiento del agua.

Celda No. 9, mallas de fibra de vidrio y rejillas de PVC.

- a) La rejilla se encuentra instalada soportada en las mallas de fibra de vidrio. En niveles espaciados a 34.3 cm (13 ½ ")
 - b) Existe 2% de rejillas caídas y dobladas .
 - c) Celdas 11, 12 y 13, mallas de fibra de vidrio, barras de salpiqueo en "V" de PVC.
 - d) Mallas y barras "V" se encuentran en buenas condiciones.
 - e) La instalación de las barras en "V" es de 22.9 cm (9") en sentido horizontal y de 38.1 cm (15") en el sentido vertical en forma alternada.
- Estructura, construida de madera tratada. Se encuentra en buenas condiciones, aunque presenta ataque superficial, el cual es necesario eliminar lavando y limpiando las columnas, largueros, etc. sin cepillarlos, aplicando posteriormente tratamiento químico, dando tiempo para su acción. En las secciones en donde se presentan incrustaciones si no se tiene ataque a la madera no es necesario limpiarlas. En la torre CT-502 es necesario cambiar columnas, largueros, diagonales y tornillería galvanizada al 100% de la cámara plena.
 - Particiones. En la torre CT-501 están en buenas condiciones. En la torre CT-502 es necesario reparar las celdas 7, 8, 9 y 10, así como instalar las puertas que

prácticamente faltan en todas las celdas, provocando disminución de eficiencia en el ventilador.

- Eliminadores de rocío:

Torre CT-501:

Celdas 1, 2 y 3: Tablillas y soportes de tablilla se encuentran en regulares condiciones, presentan lodo incrustado, lo cual baja la velocidad de salida de aire, se requiere lavar; existe arrastre notable, debido al desbordamiento del agua de los depósitos de distribución de agua caliente sobre el eliminador, las tablillas del eliminador se encuentran mal instaladas, es necesario desmontar e instalar correctamente; los sellos de eliminadores están deteriorados, es necesario reparar.

Celdas 4 y 5: Con soportes de canaletas y tablillas de PVC. Este diseño es muy ineficiente y se recomienda cambiar totalmente.

Torre CT-502:

Celdas 1 a 7:

Se encuentran en malas condiciones, es necesario cambiar:

- a) El 50% de soportes de tablilla en triplay.
- b) El 50% de tablillas de madera instaladas.
- c) Existe 50% de soportes de tablillas en PVC que se encuentran mal fabricadas debido a que el ángulo de las ranuras no es el correcto, ocasionando arrastre de agua.
- d) No hay sellos en paso de largueros, necesarios para evitar arrastre de agua.

Celdas 8 a 10:

El eliminador es original a base de soportes de tablillas de triplay y tablillas de madera tratada. Se encuentra muy deteriorado, por lo que es necesario cambiarlo.

Celdas 11 a 13:

Este eliminador es del tipo normalizado con los problemas de mal diseño ya comentados por lo que se recomienda cambiarlos al 100%.

- Ventiladores marca Marley de 8.5 m (28 pies) de diámetro y 8 aspas de fibra de vidrio. En términos generales están en buenas condiciones. Es necesario instalar las cubiertas centrales en la torre CT-502, para evitar disminución en la eficiencia del ventilador y consecuentemente, de la capacidad de la torre. Es necesario limpiar, pintar y reparar aspas.
- Reductores de velocidad. Requieren el mantenimiento normal. Algunas celdas tienen reductor C. E. A. que aunque no son de la calidad de los originales, requieren el mantenimiento normal.
- Flechas de transmisión de potencia. Requieren mantenimiento normal como limpiar, colocar insertos, protecciones, alinear, etc.
- Soportes del equipo mecánico. Se encuentra en condiciones regulares, es necesario limpiar, pintar y cambiar tornillería de fijación.
- Interruptores de vibración. Se encuentran fuera de operación, por seguridad es necesario que funcionen, cuidando que no operen en caso de sismo trepidatorio.
- Motores eléctricos, equipos de 74.6 kW (100 HP) y 2 velocidades. Requieren mantenimiento normal y se recomienda aprovechar las 2 velocidades para ahorrar energía.
- En términos generales, la torre CT-501 está en buenas condiciones, requiriendo una reparación menor con especificaciones adecuadas.

La torre CT-502 requiere mucho más atención y reparación adecuada con las correcciones enumeradas, incluyendo mejoras y modernización. Requiere atención inmediata, ya que tiene muchas fallas.

Torres CT-501A, CT-503 y CT-506:

- Persianas, son de concreto precolado. Están instaladas con ángulos de 45° hasta 60°. El ángulo normal debe ser 30° y debe tener la mayor abertura posible sin que se produzcan salpicaduras. Esta deficiencia se puede corregir en una reparación que incluya la ingeniería de detalle, con objeto de evitar su flexión o combamiento.
- Charola de agua caliente. Están desniveladas por haber sido precoladas en vez de coladas en sitio. La charola tiene demasiadas boquillas, ya que están espaciadas a 25 cm en lugar de a 30 cm, que es el espaciamiento normal y su diámetro es más grande de lo necesario, lo que produce que no se alcance la columna de 5 a 10 cm (2 a 4") que se requiere para la operación adecuada del sistema de distribución por gravedad. Se requiere colocar restrictores de acuerdo al desnivel de cada charola.
- Cajas de salpiqueo. Por su diseño no adecuado el agua se carga hacia los lados produciendo cascadas en forma de chorros, ayudados por la falta de boquillas en muchas secciones. Es necesario corregir este grave problema rediseñando las cajas de salpiqueo.
- Chimeneas. Las chimeneas de recuperación de velocidad son normalmente de 4.3 m (14') de altura. Las chimeneas de estas torres son de 5.5 m (18') sin beneficio alguno, aumentando el peso de la torre y originando que se exceda la separación recomendada (de 0.9 a 0.6 cm (3/8 a 1/4")) para diámetros de ventiladores de 28 pies) entre la punta del aspa y la garganta de la chimenea. La separación actual que se tiene entre las chimeneas de concreto y el ventilador es hasta de 10.2 cm (4") en algunos casos, disminuyendo notablemente la eficiencia del ventilador. Esta situación tiene solución mediante el diseño de un cincho adecuado, alrededor de la chimenea.
- Pasillos de inspección. Las torres cuentan con pasillos de concreto a lo largo de toda la torre en la parte inferior, lo que sirve para inspeccionar la zona de

eliminadores, principalmente. Estos pasillos no cuentan con barandales de protección y por el tipo de agua, se forma un limo muy resbaloso, con peligro latente, que evita que se lleve acabo la inspección de esta sección impidiendo advertir fugas de agua en los eliminadores, las cuales afectan la operación y producen un consumo excesivo de agua de repuesto.

- Relleno: El relleno usado es de PVC del tipo "V" y "T".

Torre CT-501A:

- a) El relleno está espaciado 20.3 cm (8") horizontal x 40.6 cm (16") vertical.
- b) Las mallas están separadas 90 cm aproximadamente.

Torre CT-503:

- a) El relleno está espaciado 20.3 x 61 cm (8" x 24")
- b) Las mallas están separadas 90 cm aproximadamente.

Torre CT-506:

Esta torre presenta una variación con respecto al diseño tradicional "V", perpendicular al flujo del arre. El relleno instalado es un perfil tipo "T", arreglado a 20.3 x 40.6 cm (8" x 16"). Este tipo de relleno presenta las siguientes ventajas:

- a) Está soportado a cada 60 cm (23.6"), evitando que el perfil se doble como en las torres CT-503 y CT-501 en donde va separado a 88 - 110 cm.
- b) En la parte de apoyo entre la malla y el empaque no tiene perforaciones. Esto también aumenta un poco el costo por requerir un herramienta especial.
- c) El empaque cuenta con muescas donde se introducen los alambres de las mallas de tal manera que el empaque tiene una posición única.

El sistema de soportes de mallas permite que cada cortina de malla se pueda subir o bajar de tal manera que el relleno se puede dejar nivelado.

El poder tener las mallas niveladas y el empaque en una posición única mediante los aditamentos antes mencionados permite que no se requiera tensar las mallas.

Este sistema está fallando debido a los problemas de distribución de agua similares a los de las torres CT-501A y CT-503 que como ya se mencionó, está produciendo concentraciones excesivas de agua en ciertas zonas, de tal manera que están rompiendo el empaque que no está diseñado para esta carga excesiva de agua.

Se recomienda corregir los problemas del depósito de agua caliente y de las cajas de salpiqueo.

- Mallas de soporte de relleno. La separación normal de las mallas de estas torres es de 88 cm, esta separación es muy grande (en algunos casos llega hasta 1.1 m), propiciando que el relleno se doble perdiendo eficiencia. La separación recomendada es de 60 cm (23.6"), de acuerdo a los estándares de los fabricantes.
- Eliminadores de rocío. En las torres CT-501A y CT-502, los eliminadores son hojas sencillas de PVC instaladas casi sin inclinación, con el problema adicional de que el soporte separador tiene igual forma que la hoja, por lo que el agua recolectada no tiene salida y vuelve a ser arrastrada al acumularse en la parte baja de la hoja recolectora del eliminador. En la torre CT-506 son de tipo hueco con refuerzos que ayudan a evitar que se doblen y se separen. Los separadores de PVC tiene un hueco por donde escurre el agua recolectada evitando su acumulación y el ser arrastrada nuevamente al exterior de la torre. Esto junto con la correcta inclinación permite que esta torre sea la que menos o casi nulo arrastre presente. Los soportes separadores de PVC van fijos a la estructura por medio de un soporte-uniión estructural de acero inoxidable que va entre cada juego de paneles. Esto aumenta el costo de la torre, pero evita que se cuelguen los soportes de PVC y debido a lo delgado de la hoja eliminadora, se vayan

doblando y aumentando la separación entre la hojas, permitiendo que se logre el arrastre especificado.

- **Equipo mecánico.** Los equipos mecánicos usados en algunos casos son obsoletos.

Las principales comentarios en forma general para el equipo mecánico son:

- a) Ventiladores. Con aspas de fibra de vidrio pre-balanceadas por momento.
- b) Reductores de velocidad. Diseñados según el CTI y la AGMA. Se requiere mantenimiento normal.
- c) Flechas de transmisión de potencia. Fabricadas en fibra carbono de alta resistencia.
- d) Interruptores de vibración fuera de operación. Por seguridad se recomienda operar.

La torre CT-506 de reciente operación, requiere el mantenimiento normal y la instalación de la cubierta de los ventiladores para que operen eficientemente.

II.2.2 Problemas operativos relacionados con equipos usuarios de agua de enfriamiento

En campo, se realizaron entrevistas con los jefes de sectores con objeto de detectar problemas con equipos que manejan agua de enfriamiento. Se visitaron las diversas plantas de la refinería revisando físicamente los equipos.

De acuerdo a entrevistas con personal operativo de la refinería, se reportaron los siguientes problemas relacionados con el suministro y la distribución de agua de enfriamiento:

Sector 1, Planta Combinada 1

En el Condensador Atmosférico del Domo de la Torre DA-102, EA-116 A/B, los Condensadores de la Torre Despuntadora EA-115 A/D y Condensadores Barométricos, Sistema de Vacío EA-205A/F, se presenta el problema de que el

agua de enfriamiento sólo alcanza una presión de 0.5 kg/cm², aunque fueron diseñados para una presión de 3.5 kg/cm². Se mencionó que se estrangula la válvula a la salida de dichos equipos para asegurarse estén inundados.

La calidad de la agua manejada en la torre CT-500 ocasiona ensuciamiento en los tubos de los equipos, en forma de carbonatos.

Sector 2:

No se reportaron problemas con la operación de agua de enfriamiento.

Sector 3:

No se reportaron problemas con la operación de agua de enfriamiento.

Sector 7:

Durante la operación normal de los condensadores AEA-17 (con arreglo 5 paralelo - 2 serie) de la Planta de Destilación Atmosférica No. 2, no llega suficiente agua. Los equipos son elevados. Tienen que cerrar las válvulas de retorno para inundarlos.

En los condensadores AEA-14/15/16 de la torre fraccionadora de la Planta de Destilación Primaria No. 2 se presenta el mismo problema. Además es excesivo el ensuciamiento en los cambiadores de calor

En los condensadores del sistema de vacío de la Planta de Destilación a Vacío No. 2 no llega suficiente agua. Se instalaron bombas en el disparo del cabezal que alimenta a la planta para solucionar el problema, pero no resultó. Está en proceso la compra de bombas booster. Este problema repercute en la baja capacidad de operación de la planta.

Sector 8:

No se reportaron problemas con la operación de agua de enfriamiento.

Sector 9:

En la Planta Catalítica FCC-2 se presentan problemas en los siguientes equipos: 102-CA-1/2, 102-CB-1/2, 113-C1/2, 118-CA/CB y 122-CA/CB1/2. Aunque los equipos no están elevados, no proporcionan el servicio de condensación.

De los equipos anteriormente mencionados se efectuaron mediciones de agua de enfriamiento y se recopiló la información correspondiente a las condiciones de operación, para su simulación y análisis.

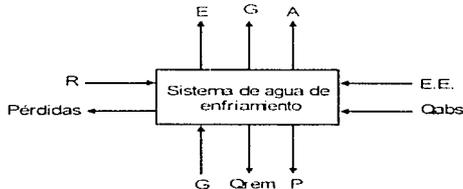
II.3 Balances de materia y energía

La ley de conservación de materia y energía establece que para los procesos la materia y la energía no pueden ser generadas o destruidas, únicamente cambian de forma; y a partir de esto se desarrollan balances de materia y energía para cualquier sistema.

$$\text{Entradas de Materia} = \text{Salidas de Materia}$$

$$\text{Entradas de Energía} = \text{Salidas de Energía}$$

Para un proceso sin reacción química como es el sistema de agua de enfriamiento, el balance de energía es:



Balance de materia:

$$\text{Agua: } R = P + E + A \quad (II.1)$$

$$E = G(Y_2 - Y_1) \quad (II.2)$$

$$\text{Sales (SiO}_2\text{): } RC_R = (P + A)C_p \quad (II.3)$$

Balance de Energía:

$$Q_{abs} = Q_{rem} \quad (II.4)$$

$$Q_{rem} = G(H_2 - H_1) \quad (II.5)$$

$$EE - G(H_2 - H_1) + Q_{abs} - PCp(t_1 - t_0) + RCp(t_3 - t_0) - ACp(t_2 - t_0) - \text{Pérdidas} = 0 \quad (II.6)$$

$$Q_{abs} = G(H_2 - H_1) + RCp(t_3 - t_1) - PCp(t_1 - t_0) - ACp(t_2 - t_0) = L Cp(t_2 - t_1) \quad (II.7)$$

donde:

R = Flujo de agua de reposición

P = Purga

E = Evaporación

A = Arrastre

G = Flujo de aire

Y_2, Y_1 = Humedad del aire a la salida y entrada, respectivamente

C_R = Concentración de SiO_2 en el agua de reposición

C_p = Concentración de SiO_2 en el agua de recirculación

Q_{abs} = Carga térmica absorbida por el sistema de enfriamiento

Q_{rem} = Carga térmica removida en la torre de enfriamiento

EE = Energía eléctrica suministrada

ΔH_{vap} = Calor latente de vaporización

H_2, H_1 = Entalpia de aire a la salida y entrada, respectivamente

L = Flujo de agua recirculada

t_2 = Temperatura del agua caliente

t_1 = Temperatura del agua fría

t_3 = Temperatura del agua de reposición

t_0 = Temperatura de referencia

Pérdidas= Este término incluye pérdidas por fricción en tuberías, cambio en masa velocidad del aire, etc.

Se realizaron los balances de materia y energía del sistema de enfriamiento con la información recopilada de las bitácoras de 1994 y 1995 y las mediciones realizadas en campo. Los valores obtenidos se comparan contra las condiciones de diseño obtenidas de hojas de datos de intercambiadores de calor y motores de bombas de suministro de agua y ventiladores de las torres. En la tabla II.7 se muestran los balances de materia y energía.

Torre	CT-500		CT-501		CT-501A		CT-502		CT-503		CT-506	
	Diseño	Actual	Diseño	Actual	Diseño	Actual	Diseño	Actual	Diseño	Actual	Diseño	Actual
Tbs °C	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Tbh °C	18.3	11	18.3	10.85	18.3	11	18.3	11	18.3	11	18.3	8.75
Yent	0.0144	0.0049	0.0144	0.0049	0.0144	0.0049	0.0144	0.0049	0.0144	0.0049	0.0144	0.0025
Hent, J/kg	61894	37776	61894	37776	61894	37776	61894	37776	61894	37776	61894	31678
Taf, °C	29.4	26.6	29.4	21.2	32.2	22.5	29.4	24.5	32.2	20.9	32.2	22.9
Tad, °C	45.1	55.7	45.1	30.7	45.1	31.6	45.1	32.3	45.1	33.4	45.1	30.7
LG	2	2	2	2	2.41	1.37519	1.53	2.69042	2.41	3.43459	2.41	3.92
Gs, kg/s	379	244	379	185	282	235	379	165	392	170	392	114
L, kg/s	630	523	580	340	631	325	580	530	944	594	944	445
Hsal, J/kg	168876	134321	168876	112351	202155	90115	168876	125979	202155	217955	202155	158455
Ysal	0.0472	0.0376	0.0472	0.0318	0.0501	0.0227	0.0472	0.0365	0.0501	0.0720	0.0501	0.0499
E, kg/s	74.70	44.82	62.25	20.60	59.61	19.95	161.84	64.46	214.77	133.46	143.18	37.45
A, kg/s	1.74	15.26	1.45	5.10	5.31	6.02	15.08	17.82	22.65	8.27	3.77	0.15
CC	3.00	2.94	3.00	2.94	3.00	2.92	3.00	2.92	3.00	2.98	3.00	2.89
P, kg/s	35.61	29.20	29.57	12.50	23.60	12.20	65.84	39.67	84.74	66.99	67.82	22.08
R, kg/s	112.05	99.30	93.37	35.20	69.72	38.17	242.77	121.95	322.16	208.72	214.77	59.68
Q, kcal/h	209.4	113.1	174.5	49.1	157.9	50.5	453.7	155.0	566.9	308.5	378.0	86.2
EE, kW	447.4	366.0	372.9	293.8	465.1	450.6	969.4	764.5	1118.5	847.1	745.7	493.6

Tabla No. II.7 Balance de materia y energía en torres de enfriamiento

Torre	Bombas, kW		Ventiladores, kW	
	Diseño	Actual	Diseño	Actual
CT-500	2,742.3	2,179.6	447.4	386.0
CT-501	2,285.3	599.6	372.9	293.8
CT-501A	2,285.3	960.9	466.1	450.6
CT-502	5,941.7	4,269.7	969.4	764.5
CT-503	5,484.7	5,510.4	1,118.5	847.1
CT-506	3,656.4	1,797.8	745.7	493.6
Total	22,395.7	15,318.0	4,119.9	3,235.6

Tabla No. II.8 Cargas térmicas y potencias suministradas al sistema de enfriamiento

Se calcularon estos índices para las condiciones de diseño, tomando a éste como la referencia de comparación para la operación actual del sistema. La tabla II.9 muestra los índices energéticos calculados

Torre	IE ₁ , kW/MMkcal/h		Diferencia respecto al diseño	Potencial de Ahorro SDIIs/año
	Diseño	Actual		
CT-500	2.14	3.41	1.28	35,826
CT-501	2.14	5.98	3.84	46,825
CT-501 A	2.05	8.93	5.98	74,803
CT-502	2.14	4.93	2.80	107,494
CT-503	1.97	2.76	0.77	59,141
CT-506	1.97	5.75	3.76	80,225
GLOBAL	2.12	4.24	2.12	401,024

Torre	IE ₂ , SDIIs/año/MMkcal-h × 10 ⁻³		Diferencia respecto al diseño	Potencial de Ahorro SDIIs/año
	Diseño	Actual		
CT-500	0.53	0.85	0.32	35,826
CT-501	0.53	1.48	0.95	46,825
CT-501 A	0.73	2.21	1.48	74,803
CT-502	0.53	1.22	0.69	107,494
CT-503	0.49	0.68	0.19	59,141
CT-506	0.49	1.42	0.93	80,225
GLOBAL	0.53	1.05	0.53	401,024

Tabla No. II.9 Índices energéticos

La comparación entre los índices a condiciones actuales IE1 e IE2 contra los índices de diseño, nos indica que existe un potencial de ahorro energético en el sistema de enfriamiento de agua de esta refinería, que puede expresarse en un ahorro económico de 401,024 \$Dlts/año, considerando un costo de la energía eléctrica de 0.031 \$Dlts/kW-h y 8000 horas de operación anuales.

CAPITULO III

PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO AL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

- III.1 Torres de enfriamiento**
- III.2 Sistema de distribución de agua**
- III.3 Cambiadores de calor**
- III.4 Tratamiento del agua**

III. PROPUESTAS DE MEJORAMIENTO AL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO

En este capítulo se identifican las desviaciones con respecto a las condiciones de diseño y se proponen las medidas correctivas para aprovechar el potencial de ahorro encontrado, para lo cual, el sistema de enfriamiento se divide en cuatro partes: torres de enfriamiento, sistema de distribución de agua, enfriadores con agua y tratamiento del agua.

III.1 Torres de enfriamiento

Para proponer mejoras en las torres de enfriamiento, es necesario conocer la capacidad real de éstas, compararla con la capacidad de diseño e identificar las causas de las desviaciones. Para determinar la capacidad de las torres de enfriamiento se realizaron los siguientes análisis.

III.1.1 Análisis a condiciones de diseño

La determinación de la capacidad de las torres de enfriamiento a condiciones de diseño es el resultado de simulaciones teóricas, elaboradas por los fabricantes de estos equipos, mediante programas de computadora basados en correlaciones empíricas experimentales. Las condiciones de diseño se refieren al tipo y dimensiones físicas de las torres, el equipo mecánico instalado, tipo y arreglo del relleno, volumen empacado y en general todos los componentes con los que fueron diseñadas, obteniendo el flujo de recirculación que la torre puede manejar a temperatura de bulbo húmedo, rango y acercamiento de diseño.

La tabla III.1 presenta el resultado de la simulación teórica de las torres CT-100, CT-101 y CT-102, y la de las torres CT-101A, CT-103 y CT-105, donde se puede observar que la capacidad de acuerdo a las condiciones de diseño es menor a los 10,000 GPM para las torres CT-500, CT-501 y CT-502 y casi 150% mayor en la torre CT-506.

	CT-500		CT-501		CT-501A		CT-502		CT-503		CT-506	
	Fabricante	Simulación										
T _{top} °C	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1
T _{af} °C	29.4	29.4	29.4	29.4	32.2	32.2	29.4	29.4	32.2	32.2	32.2	32.2
T _{bh} °C	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
Rango °C	16.67	16.67	16.67	16.67	13.89	13.89	16.67	16.67	13.89	13.9	13.89	13.9
Apex °C	11.11	11.11	11.11	11.11	13.89	13.89	11.11	11.11	13.89	13.9	13.89	13.9
Relevo	PVC 1M	PVC 1M	PVC 1M	PVC 1M	PVC 1/2	PVC 1/2	PVC 1M	PVC 1M	PVC 1/2	PVC 1/2	PVC 1/2	PVC 1/2
Arreglo	Δ 12 x 8	8 x 16	8 x 16	Δ 12 x 8	Δ 12 x 8	8 x 24	Δ 8 x 16	Δ 8 x 16	Δ 8 x 16			
V empacado m ³	91.8	91.8	91.8	91.8	75.8	75.8	91.8	91.8	130.0	130.0	114.9	114.9
Pot. vent. kW	74.57	71.7	74.57	71.7	93.21	63.12	74.57	71.7	93.21	93.13	93.21	93.13
Carga Térmica	37.8	34.77	37.8	34.77			37.8	34.77	31.5	47.13	31.5	47.13
Capacidad %	100	92	100	92	100	100	100	92	100	149.62	100	149.62

Tabla No. III 1 Resultado de las simulaciones termohidráulicas a torres de enfriamiento

III.1.2 Análisis a condiciones actuales

Las pruebas de comportamiento permiten determinar la capacidad real de las torres, tomando las condiciones actuales de operación y proyectándolas en las curvas de comportamiento (gráficas de temperatura de bulbo húmedo contra la temperatura de agua fría con rango como parámetro) generadas por el fabricante.

Las pruebas de comportamiento realizadas de acuerdo al procedimiento ATC-105 II-A-(b) "Método de curva de comportamiento" del CTI¹ consistieron en:

- Tomar mediciones de las temperaturas de agua caliente, de agua fría, de bulbo húmedo, del flujo recirculado y de la potencia consumida por los ventiladores.

Las mediciones de temperaturas se realizaron por medio de termómetros de mercurio con graduaciones de 0.2°F, permitiendo una exactitud de $\pm 0.1^\circ\text{F}$.

La temperatura de agua caliente se midió colocando un cople en la línea de purga de agua de retorno. La temperatura de agua fría se midió directamente en ambos lados de la piletta, con objeto de tener un valor representativo de esta variable.

La temperatura de bulbo húmedo se midió utilizando dos psicrómetros de aspiración mecánica, colocados en la entrada de las persianas en ambos lados de la celda probada, localizados aproximadamente a 1.5 m de distancia de las persianas y a 1.5 m de altura, tomando como referencia la altura de la persiana más baja.

Todas las mediciones de temperatura se realizaron tomando lecturas sucesivas cada 5 minutos durante una hora, para cada torre.

El flujo de agua recirculado se midió en la línea de retorno, utilizando el medidor de flujo ultrasónico con precisión promedio de $\pm 5\%$.

La potencia de los ventiladores fue medida utilizando un multimetro tipo gancho.

La velocidad del viento se estimó en menos de 16 km/h durante las pruebas.

¹ CTI, Cooling Towers Institute

- A partir de las curvas de comportamiento se genera una gráfica de rango contra temperatura de agua fría a la temperatura de bulbo húmedo de prueba, quedando ahora como parámetro la capacidad de la torre.
- De éstas gráficas se obtienen los valores de temperatura de agua fría para el rango de prueba a las diferentes capacidades, generándose con ellos una gráfica de temperatura de agua fría contra % de capacidad, de donde se puede leer el % de flujo esperado a la temperatura de agua fría de prueba.

Las curvas de comportamiento de las torres a 80%, 90%, 100% y 110% de capacidad y las gráficas generadas se encuentran en el Anexo 1

Con este valor y aplicando la ecuación (III.1), se obtiene el porcentaje de la capacidad real de la torre

$$\% \text{ Capacidad} = \left(\frac{\text{Flujo de prueba}}{\text{Flujo esperado}} \right) \left(\frac{\text{BHP diseño}}{\text{BHP prueba}} \right)^{0.333} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

donde:

BHP diseño es la potencia de diseño del ventilador

BHP prueba es la potencia de prueba del ventilador

La tabla III 2 presenta un resumen de los resultados de las pruebas de comportamiento

Torre	CT-500	CT-501	CT-502	CT-506
W, GPM	8300	9643	7200	8881
Tac, °C	33.35	28.14	34.03	29
Taf, °C	21.7	21.65	23.81	20.13
Tbh, °C	7.13	10.85	12.76	8.75
R, °C	11.49	6.49	10.16	8.87
Ap, °C	14.57	10.8	11.04	11.38
Pot. vent., kW	68.5	79.2	69.62	69.52
%Flujo Esperado	100.5	104	120	56
% Capacidad	83.9	89.8	60.7	175

Tabla No. III 2 Resumen de las pruebas de comportamiento

donde:

W = Flujo de prueba

Tac = Temperatura de agua caliente
Taf = Temperatura de agua fría
Tbh = Temperatura de bulbo húmedo
R = Rango
Ap = Aproximación
Pot. Vent. = Potencia de prueba del ventilador

La comparación entre las capacidades de diseño contra las capacidades actuales, se muestra en la tabla III 3, donde se puede observar que los resultados de las torres CT-500 y CT-501 son parecidos. La simulación teórica indica que la capacidad máxima posible a condiciones de diseño es del 92%, o sea 9,200 GPM por celda.

La prueba de comportamiento de la torre CT-502 muestra que hay una disminución considerable en la capacidad de la torre, respecto de la teórica, lo que se explica por el estado actual de la torre y por las desviaciones desfavorables que presentan las celdas adicionales con respecto al diseño de las celdas originales.

En las torres CT-501A y CT-503 no se desarrolló la prueba de comportamiento por no contar con las curvas de comportamiento de estas torres, sin embargo, los resultados de la simulación de la CT-506 pueden aplicarse a las torres CT-501A y CT-503, por ser de características similares (normalizadas).

Del análisis de la simulación práctica de la torre CT-506 se determina que poseen una capacidad real muy superior a la capacidad de diseño (10,000 GPM por celda). De acuerdo a las opciones analizadas, se encontró que existe un potencial considerable para manejar un flujo adicional (150% aproximadamente), a las condiciones de diseño original, sin realizar modificaciones, únicamente llevando a cabo las acciones correctivas que sugiere la inspección física de esta torre.

Torre	% Capacidad	
	Diseño	Actual
CT-500	92	83.9
CT-501	92	89.8
CT-501A	100	(1)
CT-502	92	60.7, (2)
CT-503	150	(1)
CT-506	150	175

Tabla No. III.3 Capacidad de diseño y actual

III.1.3 Propuestas de mejoramiento y modernización

De acuerdo a la problemática descrita en el punto II.2.1 "Inspección física de las torres de enfriamiento" y a los análisis realizados a condiciones de diseño y actuales se encuentran los siguientes puntos de mejoramiento:

- Sistema de distribución de agua caliente.

El las torres de madera el estado de deterioro de las duelas de la charola de distribución, la falta de las boquillas rompedoras de chorro, el ensuciamiento de las mismas y el mal estado de las cajas de salpiqueo causan mala distribución a través de la torre, que conduce a la baja transferencia de masa y calor o bien a la formación de concentraciones excesivas (chorros) que dañan al relleno, provocan caídas de presión adicionales en el aire y aumentan el consumo de potencia en los ventiladores. Para resolver estos problemas es necesario sellar las paredes del depósito de agua caliente, reponer las boquillas rompedoras de chorro y sellar y reparar la cajas de salpiqueo.

En las torres de concreto el mayor diámetro y número de boquillas provocan que no se alcance la columna necesaria de 2 a 4 pulg para la operación adecuada del sistema de distribución por gravedad, que aunado con el desnivel de la charola, el deficiente diseño de las cajas de salpiqueo y el deterioro de las boquillas rompedoras de chorro (rosetas) provoca canalización o formación de chorros dañando el relleno de la torre y disminuyendo la eficiencia de ésta. Para resolver este problema, es necesario cancelar una hilera de boquillas del lado

de la cámara plena y una del lado de las persianas, rediseñar y reconstruir las cajas de salpiqueo, incluyendo un pretil cerrado de desborde y reponer las boquillas rompedoras de chorro dañadas.

- Espaciamiento entre chimeneas y ventiladores.

En las torres donde el claro entre aspas y chimeneas es mayor de 1/2 pulgada, causa ineficiencia en la operación del ventilador lo que repercute en el flujo de aire a través de la torre y la potencia consumida por el ventilador. Este problema puede resolverse en las torres de concreto, instalando un cinturón de fibra de vidrio que se adaptaría prácticamente a la medida interna de cada chimenea.

- Cámara plena.

Es necesario colocar las puertas de acceso en la parte superior de la cámara plena, ya que se está presentando una entrada directa de aire al ventilador y de agua al pleno, con aumento de arrastre.

- Relleno.

El relleno es de diferentes tipos en algunas torres y con arreglos no adecuados. Se recomienda normalizar el relleno a un solo tipo, con una separación óptima recomendada por fabricantes, de 8" x 8" en arreglo triangular

- Eliminadores de rocío.

Existe un problema importante de arrastre en las torres, lo que provoca efectos ambientales como lluvia que daña a equipos y materiales cercanos. Se recomienda usar un diseño similar al instalado en la torre CT-506 (no normalizado, en PVC), con el que se puede lograr un arrastre entre 0.008% y 0.05%, o eliminadores de rocío del tipo celular que garantizan entre un 0.002% y 0.005% de arrastre máximo. Para el buen funcionamiento de los eliminadores de rocío es importante contar con soportes adecuados de acero inoxidable o galvanizado y sellos de aire con la menor caída de presión posible.

- Divisiones entre celdas.

Las paredes divisorias dañadas producen intercomunicación de aire entre celdas con la formación de turbulencias inadecuadas, disminuyendo la eficiencia de la torre. Es necesario reparar las paredes divisorias entre celdas.

- **Persianas.**

En las torres de concreto las persianas están demasiado inclinadas, entre 45° y 60°, lo cual cierra la entrada de aire produciendo una caída de presión adicional por el lado del aire, lo que disminuye la eficiencia de la torre porque pasa menos flujo de aire. Se recomienda remover una persiana de cada 3 alternadamente.

- **Cabezales de distribución.**

En general están en buenas condiciones de operación aunque en las celdas más antiguas se requiere cambiar o reparar.

Las válvulas de control de flujo, aunque cumplen su función son endebles y de fácil descompostura. Se recomienda cambiarlas por válvulas de tipo mariposa, de mayor resistencia.

- **Mallas.**

Se recomienda que las mallas sean con paso de 4"x 8", de acuerdo al arreglo propuesto en el relleno.

Las mejoras propuestas incrementan la capacidad de las torres, lo que puede verse en las simulaciones técnicas considerando la aplicación de las medidas correctivas mostrada en la tabla III.4.

	CT-500	CT-501	CT-501A	CT-502	CT-503		CT-506	
	Simulación	Simulación	Simulación	Simulación	Simulación	Propuesta	Simulación	Propuesta
Tac. °C	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1	46.1
Taf. °C	29.4	29.4	32.2	29.4	32.2	32.2	32.2	32.2
Tbh. °C	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
Rango. °C	16.67	16.67	13.89	16.67	13.9	13.9	13.9	13.9
Aprox. °C	11.11	11.11	13.89	11.11	13.9	13.9	13.9	13.9
Relleno	PVC "M"	PVC "M"	PVC "V"	PVC "M"	PVC "V"	PVC "V"	PVC "V"	PVC "V"
Arreglo	Δ 12 x 8	Δ 12 x 8	8 x 16	Δ 12 x 8	Δ 8 x 16	Δ 8 x 8 (2)	Δ 8 x 16	Δ 8 x 8 (2)
Vempacado, m3	91.8	91.8	75.8	91.8	130.0	114.9 (3)	114.9	114.9
Pot. vent., kW	71.7	71.7	60.12	71.7	93.13	93.43	93.13	93.43
Carga Térmica, Mnkcal/h	34.77	34.77		34.77	47.13	53.36	47.13	53.36
Capacidad %	92	92	100	92	149.62	169.40	149.62	169.40

Tabla No. III.4 Resultado de las simulaciones con modificaciones propuestas

En la tabla III.5 se realiza una comparación entre la capacidad actual y la capacidad considerando las propuestas de mejoramiento, observando que existe una disponibilidad adicional total de agua de enfriamiento de 138,800 GPM, a las condiciones de temperatura de bulbo húmedo, acercamiento y rango de diseño.

Torre	Capacidad, GPM		
	Diseño	Máxima	Adicional
CT-500	55,200	55,200	0
CT-501	46,000	46,000	0
CT-501A	50,000	50,000	0
CT-502	119,600	119,600	0
CT-503	179,544	203,280	83,280
CT-506	119,696	135,520	55,520
Total	570,040	609,600	138,800

Tabla No. III.5 Capacidad adicional de agua de enfriamiento

III.2 Sistema de distribución de agua de enfriamiento

Debido a la problemática descrita en el punto II.2.2, se analizó la red de distribución de agua comparando los flujos actuales contra los flujos de diseño y las caídas de presión actuales en tubería y equipos contra los criterios de diseño, detectando las causas de las desviaciones y proponiendo medidas correctivas para mejorar la operación de los equipos usuarios y reducir el consumo innecesario de agua.

La metodología aplicada para llevar a cabo este análisis es la siguiente:

1. Analizar la topología del sistema de distribución con la siguiente información: Isométricos, Hojas de Datos de Cambiadores de Calor, Diagramas de Balance de Servicios Auxiliares e información recopilada en campo.
2. Generar diagramas de distribución de líneas de agua de enfriamiento
3. Simular el sistema de distribución, a las siguientes condiciones:
 - a) Con flujos de diseño y topología de diseño
 - b) Con flujos máximos medidos y topología actual

4. Identificar los puntos con desviaciones en la distribución de agua respecto al diseño, mediante la relación de flujo de simulación contra flujo de diseño, a las siguientes condiciones:
 - a) Con flujos de diseño y topología de diseño
 - b) Con flujos máximos medidos y topología actual
5. En los casos con desviaciones considerables respecto al diseño, proponer la colocación de restricciones de flujo, cambio de diámetro en tubería, cambio de número de pasos en cambiadores de calor, etc. con el objetivo de lograr la distribución de agua necesaria.

La simulación de las redes de distribución se realizó con el programa INPLANT de SIMSCI², el cual es un simulador de flujo de fluidos en múltiple fase, ya sea para diseñar sistemas nuevos o evaluar sistemas existentes. Este programa calcula flujos y caídas de presión en tuberías y redes de cualquier topología. La operación del simulador está de acuerdo a las siguientes bases [32]:

- Dispositivos de flujo
- Tipo de fluido
- Métodos de cálculo para caída de presión
- Modelos de cálculo

Los dispositivos de flujo se utilizan para simular fluidos de una o múltiples fases a través de cualquier combinación de tuberías, accesorios y equipos de proceso. El programa cuenta con base de datos que incluye más de 10 accesorios y más de 10 tipos de equipo de proceso.

El método utilizado para el cálculo de la caída de presión es el de Beggs & Brill-Moody High Velocity, el cual es aplicable y recomendado para tuberías horizontales o con inclinación, consistiendo de tres componentes: fricción, elevación y

² SIMSCI, Simulation Science Incorporate

aceleración. En general, el gradiente de presión friccional, puede ser expresado como:

$$\left[\frac{dP}{dL} \right]_f \propto \frac{f \rho q^2}{d^5}$$

donde:

ρ = densidad del fluido

q = flujo volumétrico

d = diámetro de la tubería

El factor de fricción, f , es inversamente proporcional al número de Reynolds para flujo laminar. Para flujo turbulento, f es una función no lineal del número de Reynolds y la rugosidad de la tubería.

En general, el gradiente de presión por la elevación puede ser expresado por:

$$\left[\frac{dP}{dL} \right]_e \propto \rho \sin(\Theta)$$

donde:

ρ = densidad del fluido

Θ = ángulo de inclinación de la tubería

El gradiente de presión por aceleración es generalmente pequeño, excepto cuando el fluido es compresible, y la velocidad y gradientes de velocidad en la tubería son altas. En general, el gradiente de presión por aceleración puede ser expresado como:

$$\left[\frac{dP}{dL} \right]_a \propto \rho v \frac{dv}{dx}$$

donde:

v = velocidad del fluido

La forma general de la ecuación para calcular la caída de presión en accesorios es:

$$\Delta P = \frac{kG^2\phi}{2g\rho}$$

donde:

ΔP = caída de presión a través del accesorio
 k = coeficiente de resistencia
 G = masa velocidad (flujo másico/área de flujo)
 ϕ = multiplicador de caída de presión a dos fases
 g = aceleración debido a la gravedad
 ρ = densidad del fluido

La convergencia se logra cuando se igualan las presiones en los nodos (unión de líneas) dentro de una tolerancia aceptable (+/- 0.5 psi).

En las figuras III.1 a III.11 se presentan los diagramas de distribución de líneas de agua de enfriamiento, con las identificaciones usadas en las simulaciones.

El resumen de los resultados de las simulaciones hidráulicas se presentan en las tablas III.6 a la III.16, las cuales están compuestas por cuatro partes. En la primera se encuentra la identificación de las secciones (la cual corresponde a los diagramas de distribución de líneas de agua de enfriamiento) y el flujo de diseño correspondiente, las siguientes son el resultado de las simulaciones realizadas a los diferentes casos propuestos en la metodología (corrida con flujo original y geometría original, corrida con flujo máximo medido y corrida con placas de orificio adicionales). Cada una de éstas presenta el flujo de convergencia, la presión de entrada, la caída de presión en esa sección y la relación de flujo de convergencia contra flujo de diseño.

A continuación se presentan los resultados de la simulación de la distribución de agua en las plantas, la relación con los problemas presentes en campo y las medidas propuestas para mejorar la operación de la red de distribución de agua de enfriamiento.

Planta Reductora de Viscosidad, Sector No. 1

El diagrama de distribución se encuentra en la figura III.1.

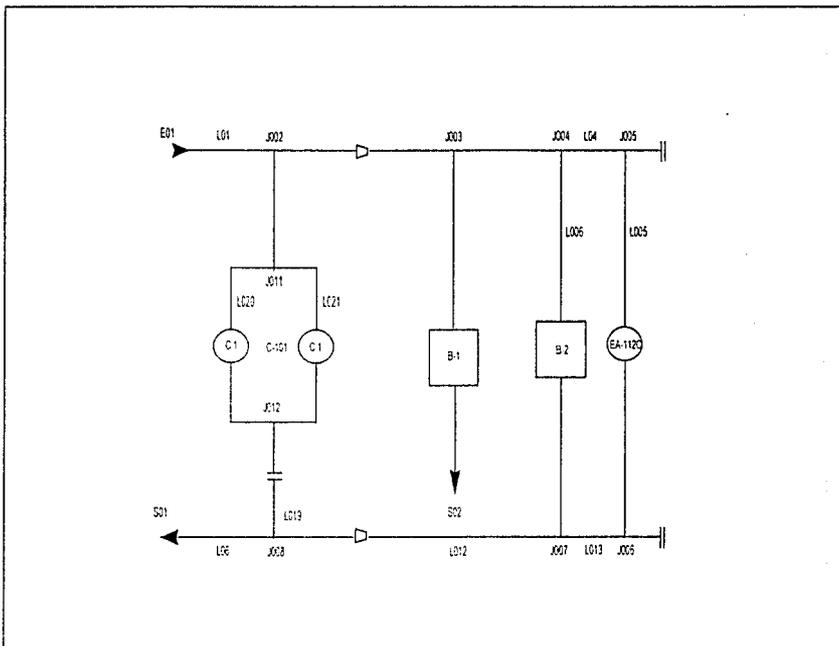
La simulación de esta planta, con geometría y flujos de diseño, muestra algunas desviaciones, que se hacen muy notorias en los equipos pequeños, ver la tabla III.6. Esta planta tiene la particularidad de contar con una línea de agua que no regresa a la torre de enfriamiento, es decir, el circuito de agua de enfriamiento es abierto.

De acuerdo a la simulación a condiciones originales, el enfriamiento de la bomba B2 presenta la mayor deficiencia en agua, 79% menos, mientras que al equipo C-101 le llega 2.2% más del flujo de diseño, que corresponden a 15,000 kg/h aproximadamente.

De la simulación con flujo máximo medido resultó que aún con el 23% más de flujo, algunos equipos continúan presentando déficit de agua.

Para lograr la distribución de acuerdo a diseño, se propone colocar una placa de orificio a la salida del equipo C-101, evitando el uso de sobreflujo a la planta. La ubicación de la placa de orificio se indica en la figura III.1. La placa de orificio tiene las siguientes características:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP (kg/cm ²)
471	16.00 pulg.	9 pulg.	0.24



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.1 Diagrama de distribución,

Planta Reductora de Viscosidad, Sector 1

Diseño		Convergencia				Con flujo máximo medido				Con modificaciones al flujo					
Entrada	Del modo	Al modo	Flujo M kg/h	Flujo M Kg/h	Presión ent	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h	Presión ent	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1	Flujo M kg/h	Presión ent	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 4/1
			(1)	(2)				(3)				(4)			
L001	E001	J002	761.94	761.94	4.97	0.02	1.000	938.55	4.97	0.03	1.232	761.94	4.97	0.02	1.000
L002	J002	J003	99.27	78.40	4.95	0.03	0.835	99.09	4.94	0.03	0.765	99.27	4.95	0.03	1.000
L003	J003	J004	75.30	69.43	4.95	0.03	0.869	54.11	4.94	0.03	0.719	75.30	4.95	0.03	1.000
L004	J004	J005	61.69	49.67	4.95	0.03	0.805	41.29	4.94	0.03	0.669	61.69	4.94	0.03	1.000
L005	J005	J006	61.69	49.67	4.95	0.03	0.805	41.29	4.94	0.03	0.669	61.69	4.94	0.03	1.000
L006	J006	J007	13.61	10.76	4.95	0.05	0.781	12.82	4.94	0.05	0.942	13.61	4.94	0.02	1.000
L010	J006	J007	61.69	49.67	4.24	0.03	0.909	41.29	4.21	0.03	0.609	61.69	4.00	0.03	1.000
L005	J002	J011	671.67	686.94	4.95	0.03	1.022	669.47	4.21	0.05	1.294	671.67	4.95	0.03	1.000
L020	J011	J012	335.84	343.95	4.92	0.03	1.024	436.16	4.63	0.07	1.299	335.84	4.92	0.03	1.000
L021	J011	J012	335.84	342.95	4.92	0.03	1.023	433.32	4.63	0.07	1.290	335.84	4.92	0.03	1.000
L012	J007	J005	75.30	69.43	4.28	0.03	0.803	54.11	4.07	0.03	0.719	75.30	4.00	0.03	1.000
L019	J012	J009	671.67	686.94	4.33	0.03	1.022	669.47	4.09	0.05	1.294	671.67	4.32	0.03	1.000
L011	J008	S001	746.97	746.97	4.08	0.02	1.000	929.59	4.07	0.03	1.236	746.97	4.00	0.02	1.000
L007	J003	S002	14.67	14.67	4.95	0.05	1.092	14.57	4.94	0.05	1.090	14.57	4.95	0.05	1.000

*Placa de orificio

Tabla No. III 6 Resultados de la simulación hidráulica
Planta Reductora de Viscosidad, Sector 1

Planta de Destilación Combinada, Sector No. 1

En campo se ha reportado que a los condensadores del sistema de vacío les llegaba menos agua que la requerida por diseño, problema que solucionaron sacando un nuevo disparo que sale del cabezal principal de entrada del agua a la planta y mediante una bomba (GA-805) envían el agua hacia los equipos EA-205E y F. Adicionalmente, se cerró la alimentación original a la caja de enfriamiento y se alimentó el flujo indicado en el diseño. Actualmente el servicio de enfriamiento en la caja EB-101 es dado por una corriente de agua procedente de la Planta Reductora de Viscosidad, en este mismo sector.

Esta planta fue corrida con dos casos de geometría, que corresponden al arreglo de diseño y al arreglo actual, que presenta modificaciones elaboradas en la planta para resolver los problemas de suministro de agua a los condensadores del sistema de vacío. En las figuras III.2 se encuentran los esquemas de diseño y actual de la distribución de agua.

La simulación con el arreglo original y flujo de diseño confirmó que los condensadores EA-205E y F presentan deficiencias en el flujo de agua, así como los equipos EA-205AB, EA-109, EA-201AB, EA-114, EA-203 y EA-114. Para solucionar esta situación, se colocaron placas de orificio en aquellas líneas que reciben más flujo que el esperado. Estas líneas son principalmente las correspondientes a los condensadores EA-115 y EA-116, que reciben el 2% más del flujo requerido, esta cantidad representa aproximadamente 129.000 kg/h, cantidad superior a la requerida por varios servicios. Los resultados de esta simulación se encuentran en la tabla III.7a.

Las características de las placas de orificio colocadas son las siguientes:

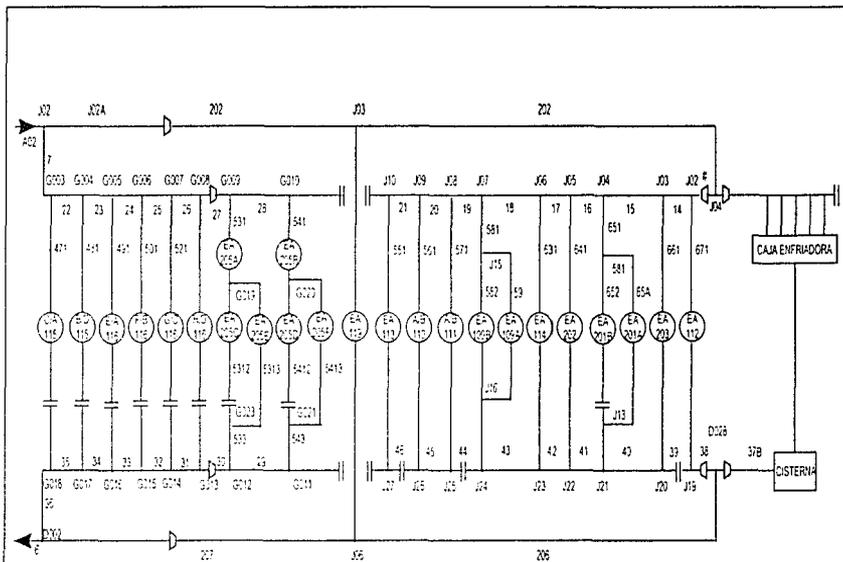
LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP Placa (kg/cm ²)
471	14.00 pulg.	6.8 pulg.	0.75
481	14.00 pulg.	6.8 pulg.	0.74

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP Placa (kg/cm ²)
491	16.00 pulg.	8.5 pulg.	0.75
501	16.00 pulg.	8.5 pulg.	0.76
511	16.00 pulg.	8.5 pulg.	0.76
521	16.00 pulg.	8.5 pulg.	0.76
64	16.00 pulg.	3.5 pulg.	0.23
209	6.00 pulg.	3.2 pulg.	0.66
65	24.00 pulg.	3.0 pulg.	0.15
5312	6.00 pulg.	3.8 pulg.	1.01
5412	6.00 pulg.	3.8 pulg.	0.98
39	20.00 pulg.	12 pulg.	0.36
44	20.00 pulg.	7 pulg.	0.17
46	20.00 pulg.	7 pulg.	0.12

En la simulación con el arreglo actual, se tomó en cuenta que la bomba GA-805 envía 340,650 kg/h de agua a una presión de descarga de 7.7 kg/cm² man., que ya no hay alimentación a la caja enfriadora EB-101 y que por consecuencia, el flujo de agua a la planta aumenta aproximadamente el 12%.

Los resultados obtenidos, mostrados en la tabla III.7b, indican que ya no se presentan problemas en los condensadores del sistema de vacío y en la planta en general, consumiendo mayor potencia y mayor cantidad de agua de enfriamiento. Sin embargo, al colocar la bomba se reduce el flujo de agua a los condensadores EA-205A y B.

A partir de los resultados de las simulaciones anteriores, se sugiere la colocación de las placas de orificio con el arreglo original, es decir eliminando el uso de la bomba GA-805 y por lo tanto eliminando el sobreflujo de agua y el consumo de energía eléctrica adicional.



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.2b Diagrama de distribución.

Planta de Destilación Combinada, Sector 1. Arreglo Original

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/in (1)	Flujo M ³ /g/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 3/1
201	E01	J02	6594.83	6594.88	4.965	0.704	1.000	6594.88	4.966	0.663	1.000
202	J02	J03	2520.03	2391.65	4.303	0.641	0.949	2520.03	4.303	0.051	1.000
203	J03	J04	2366.25	2183.21	4.263	0.651	0.923	2366.25	4.252	0.051	1.000
13	J04	J02	1555.65	1372.62	4.212	0.651	0.882	1555.65	4.201	0.082	1.000
14	J02	J03	1469.01	1366.67	4.160	0.620	0.890	1469.01	4.120	0.090	1.000
15	J03	J04	1227.48	1105.13	4.150	0.610	0.891	1227.48	4.110	0.010	1.000
16	J04	J05	1084.00	993.64	4.140	0.630	0.806	1084.00	4.110	0.010	1.000
17	J05	J05	984.14	978.01	4.140	0.610	0.690	984.14	4.099	0.000	1.000
18	J05	J07	920.34	822.98	4.130	0.610	0.694	920.34	4.099	0.010	1.000
19	J07	J08	317.42	331.91	4.120	0.600	1.046	317.42	4.089	0.000	1.000
20	J08	J09	302.07	318.13	4.120	0.600	1.053	302.07	4.089	0.000	1.000
7	J2	G003	6174.85	6303.22	4.303	1.081	1.021	6174.85	4.303	1.081	1.000
21	J59	J10	259.57	279.14	4.120	0.600	1.075	259.57	4.089	0.000	1.000
22	G003	G004	5512.10	5518.19	3.222	0.610	1.019	5512.10	3.222	0.010	1.000
23	G004	G005	4849.33	4930.14	3.212	0.600	1.017	4849.33	3.212	0.050	1.000
24	G005	G005	3789.12	3930.79	3.212	0.610	1.011	3789.12	3.212	0.010	1.000
25	G006	G007	2728.91	2734.31	3.202	0.600	1.032	2728.91	3.202	0.000	1.000
26	G007	G008	1669.70	1639.47	3.202	0.600	0.982	1669.70	3.202	0.000	1.000
27	G008	G009	698.49	545.05	3.202	0.641	0.695	698.49	3.202	0.051	1.000
28	G009	G010	304.24	275.24	3.161	0.600	0.905	304.24	3.151	0.000	1.000
541	G010	G020	304.24	275.24	3.161	0.704	0.905	304.24	3.151	0.744	1.000
5412	G020	G021	191.87	199.47	2.469	0.122	1.042	191.87	2.407	0.418	1.000
5413	G020	G021	122.37	25.77	2.469	0.631	0.701	122.37	2.407	0.438	1.000
543	G021	G011	534.24	275.24	2.690	0.052	0.905	304.24	1.988	0.082	1.000
551	J19	J27	259.57	279.14	4.120	0.235	1.075	259.57	4.089	0.194	1.000
651	J04	J11	133.48	112.49	4.140	0.641	0.843	133.48	4.110	0.010	1.000
581	J37	J15	602.92	491.07	4.120	0.651	0.814	602.92	4.099	0.020	1.000
46	J27	J26	259.57	279.14	3.865	0.600	1.075	259.57	3.695	0.122	1.000

Tabla No. III.7a Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Destilación Combinada No. 1, Sector 1

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos Z11	Flujo M kg/h (3)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos Z11
551	J09	J26	42.50	39.60	4.12	0.30	0.918	42.50	4.09	0.36	1.000
531	G009	G019	304.24	269.60	3.15	0.69	0.857	304.24	3.15	0.74	1.000
45	J26	J25	302.07	318.13	3.69	0.60	1.053	302.07	3.77	0.00	1.000
571	J06	J25	15.359	13.774	4.12	0.30	0.897	15.35	4.09	0.37	1.000
5312	G019	G023	181.87	160.71	2.47	0.15	0.954	181.87	2.41	0.42	1.000 (*)
6313	G019	G023	122.37	85.10	2.47	0.65	0.728	122.37	2.41	0.43	1.000
29	G011	G012	304.24	275.24	2.60	0.01	0.925	304.24	2.07	0.02	1.000
583	G023	G012	304.24	269.60	2.62	0.08	0.887	304.24	1.99	0.08	1.000
582	J15	J16	301.45	282.45	4.17	0.15	0.672	301.45	4.11	0.22	1.000
59	J15	J16	301.45	288.59	4.17	0.13	0.957	301.45	4.11	0.14	1.000
44	J25	J24	317.42	331.91	3.89	0.00	1.045	317.42	3.77	0.17	1.000 (*)
501	J16	J24	602.92	451.07	4.07	0.21	0.814	602.92	3.59	0.27	1.000
55A	J11	J13	65.74	50.67	4.18	0.22	0.609	65.74	4.12	0.44	1.000
652	J11	J13	65.74	51.51	4.18	0.34	0.776	65.74	4.12	0.49	1.000 (*)
43	J24	J23	920.34	822.58	3.89	0.01	0.994	920.34	3.60	0.01	1.000
331	J06	J23	63.80	53.03	4.13	0.35	0.831	63.80	4.10	0.52	1.000
30	G012	G013	608.49	545.05	2.65	0.00	0.895	608.49	2.05	0.01	1.000
521	G009	G013	1650.21	1084.42	3.20	0.38	1.032	1650.21	3.20	1.15	1.000 (*)
31	G013	G014	1658.70	1639.47	2.65	0.00	0.982	1658.70	2.06	0.00	1.000
511	G007	G014	1650.21	1094.84	3.20	0.39	1.033	1650.21	3.20	1.15	1.000 (*)
32	G014	G015	2728.91	2734.31	2.65	0.00	1.002	2728.91	2.05	0.01	1.000
601	G006	G015	1650.21	1636.49	3.20	0.35	1.034	1650.21	3.20	1.15	1.000 (*)
33	G015	G019	3789.12	3320.79	2.65	0.00	1.011	3789.12	2.05	0.00	1.000
491	G005	G016	1650.21	1059.35	3.21	0.39	1.037	1650.21	3.21	1.15	1.000 (*)
42	J23	J22	984.14	876.01	3.88	0.00	0.850	984.14	3.59	0.01	1.000

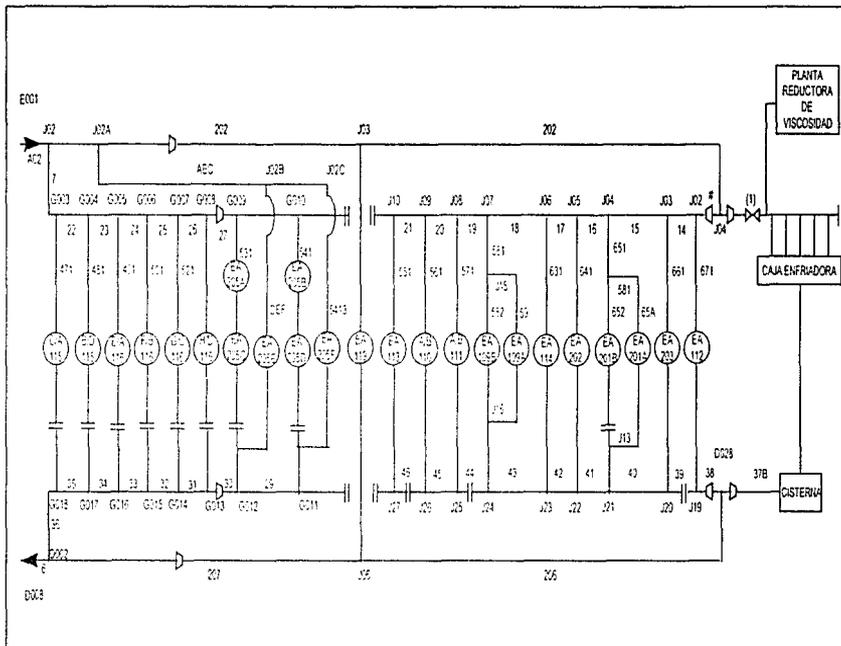
* Placa de orificio

Tabla No. III 7a. Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Destilación Combinada No. 1, Sector 1

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nado	Al nado	Flujo M kg/h (1)	Flujo M/kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
641	J05	J22	109.87	117.64	4.14	0.27	1.071	109.87	4.10	0.50	1.000
41	J22	J21	1094.00	993.64	3.89	0.01	0.966	1094.00	3.58	0.00	1.000
6451	J13	J21	132.48	112.49	3.95	0.08	0.843	133.48	3.68	0.08	1.000
651	J03	J26	241.53	200.74	4.15	0.40	0.831	241.53	4.12	0.59	1.000
39	J20	J19	1469.01	1305.87	3.86	0.61	0.850	1469.01	3.57	0.38	1.000 (*)
571	J02	J19	86.85	65.95	4.15	0.51	0.759	66.65	4.12	0.93	1.000
34	G016	G017	4849.33	4330.14	2.65	0.61	1.017	4849.33	2.05	0.01	1.000
481	G004	G017	662.77	628.05	5.21	0.40	1.038	662.77	3.21	1.15	1.000 (*)
35	G017	G019	5512.10	5018.19	2.64	0.02	1.019	5512.10	2.04	0.02	1.000
471	G003	G018	662.76	665.03	3.22	0.40	1.034	662.76	3.22	1.16	1.000 (*)
37B	E02	D028	810.39	810.39	3.76	0.00	1.000	810.39	3.16	0.00	1.000
38	J19	D028	1555.65	1372.82	3.85	0.02	0.882	1555.66	3.19	0.03	1.000
205	D028	J08	2365.25	2183.21	3.76	0.04	0.923	2365.25	3.16	0.05	1.000
217	J06	D002	2620.03	2391.66	3.72	0.09	0.949	2520.03	3.11	0.00	1.000
35	G016	D002	6174.65	6303.22	2.62	-1.02	1.021	6174.85	2.02	1.03	1.000
37A	J04	SAL2	810.39	810.39	4.21	0.00	1.020	810.39	4.20	0.00	1.000
268	D002	D008	6694.87	6694.86	3.72	-0.69	1.050	6694.88	3.11	0.59	1.000

* Placa de orificio

Tabla No. III.7a Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Destilación Combinada No. 1, Sector 1



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.2b Diagrama de distribución,

Planta de Destilación Combinada, Sector 1. Arreglo Actual

Diseño		Arreglo actual hasta convergencia					Arreglo actual con placas de orificio			
Enlace	Flujo M kg/h (1)	Enlace	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
201	6694.88	ABC	340.65	7.29	2.56		455.69	9.05	3.18	
202	2520.03	GHI	170.48	4.68	0.01		222.88	5.80	0.02	
203	2366.25	201	9726.94	5.61	0.66	1.119	9611.68	5.61	0.66	1.119
13	1555.85	202G	2017.91	4.84	0.04		2061.44	4.94	0.04	
14	1469.01	203	1734.14	4.89	0.02	0.733	1758.18	4.89	0.03	0.733
15	1227.48	13	1734.14	4.87	0.10	1.115	1758.18	4.86	0.10	1.115
16	1094.00	14	1663.05	4.77	0.01	1.132	1687.22	4.76	0.01	1.132
17	994.14	15	1430.63	4.76	0.01	1.166	1449.08	4.75	0.00	1.166
18	920.34	16	1281.63	4.75	0.01	0.470	1302.91	4.75	0.01	0.470
19	317.42	17	1135.58	4.74	0.00	1.154	1151.10	4.74	0.01	1.154
20	302.07	18	1072.64	4.74	0.02	1.165	1086.90	4.73	0.01	1.165
7	6174.85	19	415.62	4.72	0.00	1.309	432.72	4.72	0.00	1.309
21	259.57	20	398.64	4.72	0.00	1.320	415.66	4.72	0.00	1.320
22	5512.10	7	7709.03	4.94	1.09	1.248	7550.24	4.94	0.08	1.248
23	4849.33	21	351.98	4.72	0.00	1.356	368.38	4.72	0.01	1.356
24	3789.12	22	6810.69	3.82	0.01	1.236	6669.33	3.83	0.01	1.236
25	2728.91	23	5953.50	3.81	0.01	1.228	5816.89	3.82	0.01	1.228
26	1658.70	24	4566.15	3.80	0.00	1.210	4478.60	3.81	0.01	1.210
27	608.49	25	3223.71	3.80	0.01	1.181	3147.30	3.80	0.00	1.181
28	304.24	26	1853.69	3.79	0.00	1.120	1819.57	3.80	0.00	0.384
541	304.24	27	504.46	3.79	0.03	0.829	493.24	3.80	0.03	0.829
5412	181.87	28	241.43	3.76	0.00	0.794	243.41	3.77	0.01	0.794
5413	122.37	541	241.43	3.76	0.64	0.794	243.41	3.76	0.64	0.794
543	304.24	5412	241.43	3.11	0.05	1.327	243.41	3.11	0.07	1.327

Tabla No. III.7b Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Destilación Combinada No. 1, Sector 1

Diseño		Arreglo actual hasta convergencia					Arreglo actual con placas de orificio			
Enlace	Flujo M kg/h (1)	Enlace	Flujo M kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
551	259.57	5413	170.48	4.67	0.05		222.88	5.78	0.15	
651	133.48	543	411.91	3.05	0.07	1.354	466.28	3.04	0.07	1.354
581	602.92	551	351.98	4.72	0.42	1.356	368.38	4.71	0.46	1.356
46	259.57	651	149.00	4.75	0.01	1.116	146.17	4.75	0.01	1.116
561	42.50	581	657.02	4.72	0.01	1.090	654.18	4.72	0.00	1.090
531	304.24	46	351.98	4.29	0.00	1.356	368.38	4.24	0.01	1.356
45	302.07	561	46.67	4.72	0.04	1.098	47.29	4.72	0.02	1.098
571	15.35	531	263.03	3.75	0.67	0.865	249.84	3.77	0.02	0.865
5312	181.87	45	398.64	4.29	0.00	1.320	415.66	4.23	0.00	1.320
5313	122.37	571	16.99	4.72	0.06	1.106	17.06	4.72	0.02	1.106
29	304.24	DEF	170.17	4.68	1.64		232.81	5.80	0.70	
533	304.24	5312	263.03	3.08	0.08	1.446	249.84	3.11	0.03	1.446
582	301.46	29	411.91	3.12	0.02	1.354	466.28	3.11	0.03	1.354
59	301.46	533	433.20	3.01	0.01	1.424	482.65	3.05	0.03	1.424
44	317.42	582	306.77	4.73	0.23	1.018	303.36	4.72	0.22	1.018
601	602.92	59	350.25	4.73	0.02	1.162	350.83	4.72	0.01	1.162
55A	66.74	44	415.62	4.29	0.00	1.309	432.72	4.23	0.00	1.309
652	66.74	601	657.02	4.50	0.09	1.090	654.18	4.50	0.03	1.090
43	920.34	65A	79.50	4.74	0.46		80.81	4.74	0.48	
631	63.80	652	69.50	4.74	0.06	1.041	65.37	4.74	0.03	1.041
30	608.49	43	1072.64	4.29	0.02	1.165	1086.90	4.23	0.01	1.165
521	1060.21	631	62.94	4.74	0.04	0.103	64.19	4.73	0.01	0.103
31	1668.70	30	845.11	3.10	0.00	1.389	948.93	3.08	0.00	1.389

Tabla No. III.7b Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Desalación Combinada No.1, Sector 1

Diseño		Arreglo actual hasta convergencia					Arreglo actual con placas de orificio			
Enlace	Flujo M kg/h (1)	Enlace	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
511	1060.21	521	1359.23	3.79	-0.09	1.282	1326.33	3.60	-0.02	1.282
32	2728.91	31	2204.34	3.10	0.00	1.321	2275.26	3.08	0.00	1.321
501	1060.21	511	1360.02	3.79	-0.09	1.283	1327.73	3.80	-0.02	1.283
33	3789.12	32	3564.36	3.10	0.01	1.306	3602.99	3.08	0.00	1.306
491	1060.21	501	1362.44	3.60	-0.09	1.285	1331.30	3.80	-0.02	1.285
42	994.14	33	4926.80	3.09	0.00	1.300	4934.28	3.08	0.01	1.300
641	109.87	491	1367.35	3.80	-0.09	1.290	1339.29	3.81	-0.02	1.290
41	1094.09	42	1135.58	4.27	0.00	1.154	1151.10	4.22	0.01	1.154
64B1	133.48	641	146.04	4.74	0.00	1.329	151.82	4.74	0.01	1.329
661	241.53	41	1291.63	4.27	0.01	1.172	1302.91	4.21	0.00	1.172
39	1469.01	64B1	149.00	4.27	-0.07	1.116	146.17	4.25	-0.04	1.116
671	66.85	40	1430.63	4.26	0.01		1449.08	4.21	0.01	
34	4849.33	661	232.42	4.76	-0.03	0.962	238.14	4.75	-0.01	0.962
481	662.77	39	1663.05	4.25	0.01	1.132	1687.22	4.20	0.01	1.132
35	5512.10	671	71.09	4.77	-0.08	0.819	70.96	4.76	-0.03	0.819
471	662.76	34	6294.15	3.09	0.02	1.298	6272.57	3.07	0.01	1.298
37B	810.39	481	857.19	3.81	-0.06	1.293	852.44	3.82	-0.03	1.293
38	1555.85	35	7151.34	3.07	0.03	1.297	7125.01	3.06	0.03	1.297
206	2366.25	471	869.34	3.62	-0.11	1.355	880.91	3.83	-0.05	1.355
209	163.78	37B	944.51	4.14	0.01	1.166	944.51	4.08	0.00	1.166
207	2520.03	38	1734.14	4.24	0.07	1.115	1758.18	4.19	0.07	1.115
36	6174.85	206	2678.65	4.13	0.06	1.132	2702.69	4.08	0.07	1.132
37A	810.39	209	283.77	4.89	0.14	1.845	303.27	4.89	0.11	1.845
208	6694.87	207	2862.42	4.07	0.00	1.176	3005.96	4.01	-0.01	1.176
		36	8049.68	3.04	-1.00	1.304	8005.92	3.03	0.02	1.304
		208	11012.10	4.07	-0.57	1.267	11011.88	4.02	-0.56	1.267

*Placa de orificio

Tabla No. III.7b Resultados de la simulación hidráulica
Planta de Destilación Combinada No.1, Sector 1

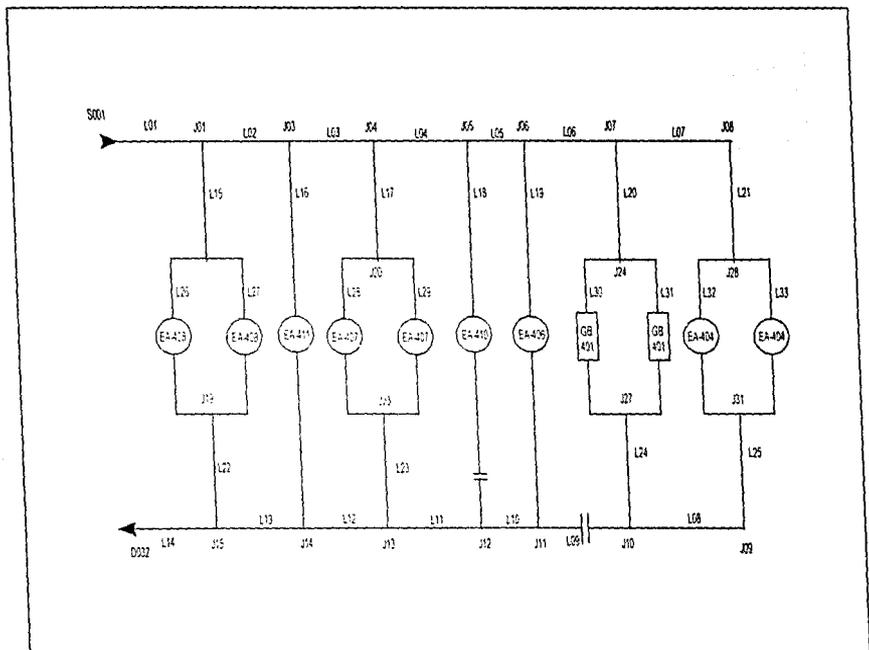
Planta Hidrodesulfuradora de Naftas No. 1, U-401, Sector No. 3

En esta planta se tiene un disparo del cabezal principal al enfriador del equipo GB-401, del cual se desconoce la caída de presión, sin embargo, este equipo maneja únicamente, el 1.5% del flujo total de agua de enfriamiento de la planta, por lo que no hay afectación apreciable en los cálculos, el esquema de distribución de agua se muestra en la figura III.3.

Esta red se simuló con flujos y geometría de diseño, presentando la mayor deficiencia de agua en el equipo EA-406 con 26% menos aproximadamente y sobreflujos en los equipos EA-410, EA-404 y Gb-401.

Como puede verse en la tabla de resultados III.8, las desviaciones encontradas en la distribución de agua en esta planta no son grandes, sin embargo, se recomienda la colocación de las siguientes placas de orificio para tener la distribución de agua de diseño.

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
CABEZAL RETORNO A SALIDA EA-410	3.00 plg	1.53 plg.	0.14
DESPUES DEL RETORNO GB-401SALIDA	24.00 plg.	8.57 plg.	0.2



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.3 Diagrama de distribución,

Planta Hidrosulfuradora de Naftas, U-401. Sector 3

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	S001	J002	2506 03	2506 03	4 971	0 015	1 000	2506 03	4 971	0 015	1 000
L002	J002	J003	1215 94	1239 91	4 955	0 006	1 019	1215 94	4 955	0 006	1 000
L003	J003	J004	1158 74	1181 71	4 949	0 003	1 020	1158 74	4 950	0 003	1 000
L004	J004	J005	759 51	775 24	4 946	0 002	1 021	759 51	4 947	0 002	1 000
L005	J005	J006	737 93	748 33	4 944	0 001	1 014	737 93	4 945	0 001	1 000
L006	J006	J007	522 46	569 05	4 943	0 001	1 127	522 46	4 943	0 001	1 000
L007	J007	J008	485 23	549 22	4 943	0 037	1 132	485 23	4 943	0 029	1 000
L021	J008	J028	485 23	549 22	4 905	0 161	1 132	485 23	4 915	0 127	1 000
L032	J028	J031	242 62	265 13	4 745	0 364	1 093	242 62	4 756	0 303	1 000
L033	J028	J031	242 62	284 09	4 745	0 370	1 171	242 62	4 788	0 322	1 000
L015	J032	J016	1290 09	1267 12	4 955	0 115	0 992	1290 09	4 955	0 119	1 000
L017	J004	J020	399 23	405 47	4 945	0 089	1 018	399 23	4 947	0 086	1 000
L020	J007	J024	37 23	39 83	4 943	0 007	1 070	37 23	4 943	0 005	1 000
L025	J031	J009	465 23	549 22	4 391	0 079	1 132	465 23	4 485	0 063	1 000
L026	J016	J019	645 04	645 79	4 841	0 572	1 021	645 04	4 837	0 570	1 000
L027	J016	J019	645 04	621 34	4 841	0 586	0 963	645 04	4 837	0 598	1 000
L028	J020	J023	199 61	203 50	4 658	0 555	1 019	199 61	4 661	0 532	1 000
L029	J020	J023	199 61	202 97	4 658	0 559	1 017	199 61	4 661	0 539	1 000
L030	J024	J027	18 61	19 92	4 936	0 650	1 070	18 61	4 937	0 564	1 000
L031	J024	J027	18 61	19 91	4 636	0 650	1 070	18 61	4 937	0 562	1 000
L003	J009	J010	465 23	549 22	4 301	0 037	1 132	485 23	4 422	0 029	1 000
L024	J027	J010	37 23	39 83	4 286	0 004	1 070	37 23	4 375	0 064	1 000
L009	J010	J011	522 46	589 05	4 265	0 031	1 127	522 46	4 394	0 198	1 000
L019	J006	J011	215 47	159 29	4 943	0 776	0 739	215 47	4 943	0 832	1 000
L010	J011	J012	737 93	748 33	4 264	0 001	1 014	737 93	4 196	0 001	1 000
L018	J005	J012	21 58	26 91	4 944	0 616	1 247	21 58	4 945	0 742	1 000
L011	J012	J013	759 51	775 24	4 263	0 001	1 021	759 51	4 195	0 002	1 000
L023	J023	J013	399 23	405 47	4 303	0 046	1 018	399 23	4 329	0 045	1 000
L012	J013	J014	1158 74	1181 71	4 261	0 004	1 020	1158 74	4 193	0 003	1 000
L016	J003	J014	57 20	57 19	4 849	0 709	1 000	57 20	4 950	0 711	1 000
L013	J014	J015	1215 94	1238 91	4 259	0 006	1 019	1215 94	4 190	0 006	1 000
L022	J019	J015	1260 09	1257 12	4 269	0 043	0 982	1290 09	4 266	0 044	1 000
L014	J015	D032	2506 03	2506 03	4 252	0 015	1 000	2506 03	4 184	0 015	1 000

* Placa de orificio

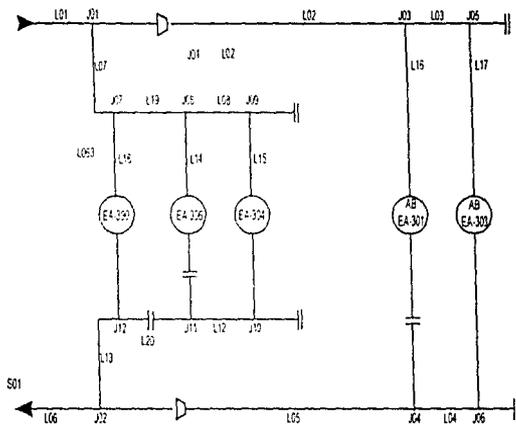
Tabla No. III 8 Resultados de la simulación hidráulica.
Planta Hidrosulfuradora de Naftas, U-401, Sector 3

Planta Estabilizadora No. 2, Sector No. 7

El esquema de distribución de agua se muestra en la figura III.4.

Los resultados de la simulación con flujos y geometría originales muestra serios problemas en la distribución del agua de enfriamiento, principalmente en los equipos EA-390 y EA-304, con 98% y 89% menos flujo, respectivamente, mientras que al equipo EA-301 se va 9% más del flujo de diseño, equivalente a 60,000 kg/h, ver la tabla III.9. Para solucionar este problema se propone colocar placas de orificio en las líneas de los equipos EA-306 y EA-301, como se indica en la figura III.4, con las características que se indican a continuación:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
CABEZAL RETORNO A LA SALIDA EA-306	6.00 plg.	3.7 plg.	0.08
SALIDA EA-306	4.00 plg.	1.8 plg.	0.38
CABEZAL RETORNO A LA SALIDA EA-301	14.00 plg.	9.0 plg.	0.47



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.4 Diagrama de distribución,

Planta Estabilizadora No. 2, Sector 7

Diseño				Convergencia				Con modificaciones al flujo			
Enlace	Def nod	Al nodo	Flujo M Kg/h (1)	Flujo M Kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 2/1	Flujo M Kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	E1	J001	1081.65	1081.65	5.598	0.071	1.000	1081.65	5.527	0.110	1.000
L007	J001	J007	116.83	44.59	5.527	0.000	0.382	116.69	5.496	0.110	0.999
L019	J007	J008	61.25	43.25	5.527	0.000	0.706	63.38	5.486	0.110	1.035
L002	J001	J003	954.82	1037.06	5.527	0.082	1.075	964.97	5.456	0.110	1.000
L003	J003	J005	328.17	341.77	5.445	0.000	1.041	380.30	5.456	0.110	1.159
L017	J005	J006	328.17	341.77	5.445	0.184	1.041	380.30	5.160	0.100	1.159
L016	J003	J04A	636.65	695.29	5.445	0.377	1.092	584.67	5.241	0.100	0.918
L004	J006	J04A	328.17	341.77	5.262	0.000	1.041	380.30	5.160	0.100	1.159
L008	J008	J009	31.89	3.63	5.527	0.000	0.114	32.80	5.486	0.110	1.029
L015	J009	J010	31.89	3.63	5.527	0.438	0.114	32.80	4.895	0.100	1.029
L012	J010	J011	31.89	3.63	5.069	0.000	0.114	32.80	4.885	0.100	1.029
L014	J008	J011	29.37	39.62	5.527	0.377	1.349	30.58	4.925	0.100	1.041
L018	J007	J012	55.58	1.34	5.527	0.377	0.024	53.31	4.803	0.090	0.959
L020	J011	J012	61.25	43.25	5.089	0.010	0.706	63.38	4.803	0.090	1.035
L013	J012	J002	116.83	44.59	5.150	0.000	0.382	116.69	4.762	0.090	0.999
L005	J04A	J002	954.82	1037.06	5.066	0.031	1.075	964.97	4.742	0.090	1.000
L006	J002	S1	1081.65	1081.65	5.150	0.071	1.000	1081.65	4.701	0.090	1.000

* Placa de orificio

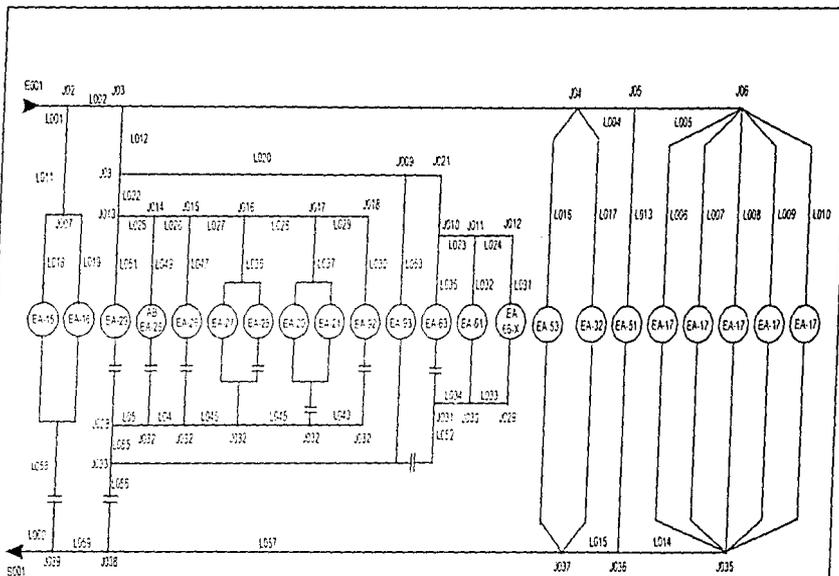
Tabla No. III.9 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Estabilizadora No. 2, Sector 7

Planta de Destilación Atmosférica, Sector No. 7

La planta se simuló con geometría y flujos de diseño, confirmando los problemas presentados en campo en los equipos AEA-17 A/J, además a los equipos AEA-15 y AEA-16 les llega 80% más del agua necesaria, coincidiendo con las mediciones realizadas en campo, que arrojan un flujo 85% mayor al de diseño. Los resultados se muestran en la tabla III.10, en donde se puede apreciar que existen otros equipos con sobreflujo: AEA-29, AEA-25A/B, AEA-26, AEA-28, AEA-92, AEA-63, AEA-66X.

Para lograr la distribución de agua de acuerdo al diseño, se propone colocar placas de orificio con las siguientes características, figura III.5

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
Salida AEA-29	6.00 pulg.	2.2 pulg.	0.54
Salida AEA-25A/B	12.00 pulg.	9.2 pulg.	0.16
Salida AEA-26	6.00 pulg.	2.8 pulg.	0.20
Salida AEA-28	6.00 pulg.	3.0 pulg.	0.22
Salida AEA-53	10.00 pulg.	4.7 pulg.	0.94
Salida AEA-63	4.00 pulg.	1.7 pulg.	0.89
Salida AEA-92	6.00 pulg.	3.4 pulg.	0.13
Salida AEA-66X	2.00 pulg.	1.00 pulg.	0.15
L015	30.00 pulg.	19.0 pulg.	0.45
L04	48.00 pulg.	4.1 pulg.	0.25
L05	26.00 pulg.	3.1 pulg.	0.31
L058	18.00 pulg.	7.9 pulg.	0.40
L056	16.00 pulg.	10.5 pulg.	0.40



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.5 Diagrama de distribución,
Planta de Destilación Atmosférica, Sector 7

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M Kg/h (1)	Flujo M Kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M Kg/h (3)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	S001	J002	8969.30	8969.30	5.25	0.03	1.000	8969.30	5.25	0.04	1.000
L002	J002	J003	7513.16	6347.01	5.22	0.02	0.845	7513.16	5.22	0.02	1.000
L003	J003	J004	5682.43	4458.35	5.20	0.72	0.785	5682.43	5.19	0.81	1.000
L004	J004	J005	5235.36	4099.37	4.48	0.60	0.783	5235.36	4.38	0.61	1.000
L005	J005	J005	4598.42	3591.32	3.88	0.74	0.781	4598.42	3.77	0.75	1.000
L006	J006	J035	919.68	713.18	3.14	0.05	0.775	919.68	3.02	0.23	1.000
L007	J006	J035	919.68	755.50	3.14	0.04	0.821	919.68	3.02	0.18	1.000
L008	J006	J035	919.68	683.22	3.14	0.05	0.743	919.68	3.02	0.20	1.000
L009	J006	J035	919.68	708.31	3.14	0.05	0.770	919.68	3.02	0.25	1.000
L010	J005	J035	919.68	731.11	3.14	0.05	0.795	919.68	3.02	0.22	1.000
L011	J002	J007	1456.15	2622.29	5.22	2.00	1.801	1456.15	5.22	1.64	1.000
L012	J003	J008	1830.73	1888.66	5.20	0.89	1.032	1830.73	5.19	0.88	1.000
L013	J005	J036	636.95	509.05	3.88	0.07	0.798	636.95	3.77	0.24	1.000
L014	J035	J035	4598.42	3591.32	3.09	-0.70	0.781	4598.42	2.79	-0.69	1.000
L015	J035	J037	5235.36	4099.37	3.00	-0.58	0.783	5235.36	3.53	0.15	1.000
L016	J034	J037	328.32	296.24	4.48	0.05	0.902	328.32	4.38	0.99	1.000
L017	J004	J037	118.75	62.74	4.48	0.29	0.528	118.75	4.38	1.00	1.000
L018	J007	J034	728.06	1308.80	3.22	0.41	1.798	728.06	3.58	0.07	1.000
L019	J007	J034	728.06	1313.49	3.22	0.40	1.804	728.06	3.58	0.02	1.000
L020	J008	J009	111.53	135.73	4.31	0.08	1.216	111.58	4.31	0.02	1.000
L021	J009	J010	69.84	92.61	4.23	0.12	1.326	69.84	4.29	0.11	1.000
L022	J008	J013	1719.15	1752.93	4.31	0.03	1.020	1719.15	4.31	0.03	1.000
L023	J010	J011	40.46	38.74	4.11	0.01	0.958	40.46	4.18	0.01	1.000
L024	J011	J012	8.56	9.50	4.10	0.00	1.110	8.56	4.18	0.00	1.000
L025	J013	J014	1635.23	1577.16	4.28	0.29	0.964	1635.23	4.29	0.32	1.000
L026	J014	J015	1008.04	954.62	3.99	0.01	0.946	1008.04	3.97	0.01	1.000

Tabla No. III.10 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Destilación Combinada, Sector 7

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M Kg/h	Flujo M Kg/h	Presión ent.	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M Kg/h	Presión ent.	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
			(1)	(2)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)		(3)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
L027	J015	J016	940.43	882.16	3.98	0.01	0.938	940.43	3.98	0.01	1.000
L028	J016	J017	805.43	733.70	3.97	0.05	0.911	805.43	3.96	0.07	1.000
L029	J017	J018	116.36	135.35	3.92	0.00	1.172	116.36	3.89	3.89	1.000
L030	J019	J023	116.36	135.35	3.91	0.47	1.172	116.36	3.89	3.30	1.000
L031	J012	J029	8.56	9.50	4.10	0.46	1.110	8.56	4.18	3.57	1.000
L032	J011	J030	31.90	29.24	4.10	0.52	0.917	31.90	4.18	3.60	1.000
L033	J029	J030	8.56	9.50	3.64	0.00	1.110	8.56	3.57	3.57	1.000
L034	J030	J031	40.46	38.74	3.55	0.01	0.958	40.46	3.60	3.59	1.000
L035	J010	J031	29.38	53.67	4.11	0.55	1.834	29.38	4.18	3.57	1.000
L036	J016	J019	134.99	148.46	3.97	-0.09	1.100	134.99	3.96	4.05	1.000
L037	J017	J020	689.07	597.34	3.92	0.11	0.867	689.07	3.89	3.77	1.000
L038	J019	J022	81.75	85.81	4.06	0.49	1.050	81.75	4.05	3.62	1.000
L039	J019	J022	53.24	62.65	4.06	0.45	1.177	53.24	4.05	3.62	1.000
L040	J020	J021	344.54	207.09	3.81	0.28	0.862	344.54	3.77	3.36	1.000
L041	J020	J021	344.54	300.28	3.81	0.28	0.872	344.54	3.77	3.38	1.000
L042	J021	J024	689.07	597.34	3.53	0.11	0.667	689.07	3.36	3.25	1.000
L043	J023	J024	116.36	136.35	3.45	0.00	1.172	116.36	3.30	3.30	1.000
L044	J022	J025	134.99	148.46	3.59	0.11	1.100	134.99	3.62	3.26	1.000
L045	J024	J025	805.43	733.70	3.41	0.00	0.911	805.43	3.25	3.24	1.000
L046	J025	J026	940.43	892.16	3.47	0.02	0.938	940.43	3.26	3.24	1.000
L047	J015	J025	67.61	71.85	3.98	0.52	1.063	67.61	3.96	3.24	1.000
L048	J026	J027	1008.04	954.02	3.45	0.01	0.946	1008.04	3.24	3.23	1.000
L049	J014	J027	627.19	623.16	3.99	0.59	0.994	627.19	3.97	3.22	1.000
L050	J027	J028	1635.23	1577.19	3.44	0.29	0.964	1635.23	3.23	2.92	1.000
L051	J013	J028	83.92	175.75	4.28	0.68	2.094	83.92	4.29	2.87	1.000
L052	J031	J032	69.64	92.61	3.58	-0.03	1.326	69.64	3.59	3.68	1.000
L053	J009	J032	41.75	43.12	4.23	0.72	1.033	41.75	4.29	3.62	1.000

*Placa de orificio

Tabla No. III.10 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Destilación Combinada. Sector 7

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M Kg/h (1)	Flujo M Kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M Kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L054	J032	J033	111.58	135.73	3.65	0.33	1.216	111.58	3.68	2.89	1.000
L055	J028	J033	1719.15	1752.93	3.15	0.03	1.020	1719.15	2.92	2.89	1.000
L056	J033	J038	1830.73	1888.66	3.33	-0.65	1.032	1830.73	2.88	2.63	1.000
L057	J037	J038	5682.43	4458.36	4.39	0.67	0.785	5682.43	3.39	2.65	1.000
L058	J034	J039	1455.15	2622.29	2.60	-1.23	1.801	1455.15	3.50	2.67	1.000
L059	J038	J039	7513.16	6347.01	3.98	0.02	0.845	7513.16	2.63	2.60	1.000
L060	J039	D048	8969.30	8969.30	4.03	0.04	1.000	8969.30	2.67	2.63	1.000

* Placa de orificio

Tabla No. III.10 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Destilación Combinada, Sector 7

Planta de Destilación al Vacío, Sector No. 7

Dada la geometría y topología original de esta planta y con objeto de esquematizar la distribución de agua de enfriamiento y facilitar la visualización de su estudio, resulta conveniente dividirla en dos secciones. Una es la compuesta por enfriadores que se encuentran a nivel de piso, y la otra es la que está formada por los condensadores del sistema de vacío que se encuentran elevados (a la altura del domo de la torre de vacío). Los esquemas de distribución de estas secciones de la planta se muestran en las figuras III.6.

La simulación a la sección de enfriadores con geometría y flujos originales, no muestra desviaciones considerables. Sin embargo, como esta planta mantiene bajo flujo de agua de enfriamiento, se hace esta deficiencia más evidente en la sección de condensadores. Este problema fue reportado por los operadores indicando la falta de flujo de agua en los condensadores del sistema de vacío, situación por la cual se realizaron algunos cambios en la geometría y forma de distribución original para solucionarlos, incluyendo la instalación de una bomba que suministre agua a los condensadores VEA-7CX, VEA-7BX, VEA-8CX y VEA-8BX. Se planteó simular el comportamiento hidráulico de esta sección, la cual a su vez se dividió en casos, uno fue tomando en cuenta el diseño original y en el otro lado se absorbieron los cambios hechos a la planta.

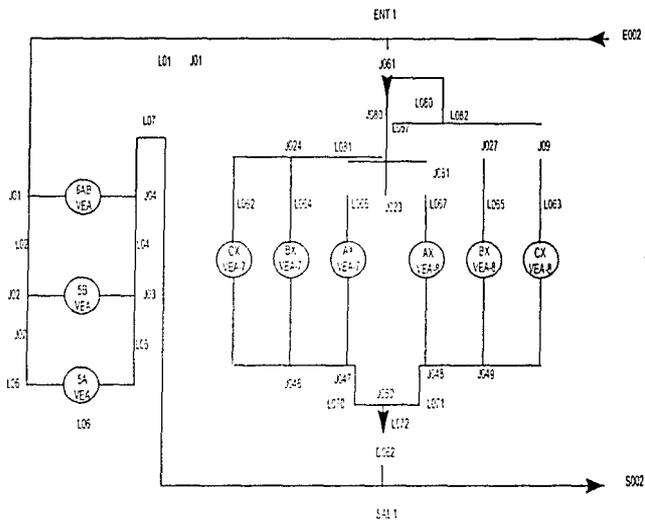
La simulación a la sección de condensadores, con geometría y flujos de diseño tampoco muestra desviaciones que alteren el comportamiento esperado de esta sección. Al simular el segundo caso con las modificaciones realizadas, incorporando una bomba y modificando el arreglo de líneas, de tal forma que a los equipos más elevados VEA-7CX, VEA-7BX, VEA-8CX y VEA-8BX, les llegara el agua suficiente para cumplir el servicio, se puede observar que se logra el objetivo al alimentarles mayor cantidad de agua de enfriamiento a estos equipos, cumpliendo ahora con el servicio esperado. Sin embargo, los condensadores restantes VEA-7AX, VEA-8AX reciben menos agua que antes.

La solución a los problemas que presenta esta planta es sencilla, ya que la distribución es la adecuada. Al fijar los flujos de diseño en estas líneas y al modificar la presión de descarga de la bomba de 110 psig a 104 psig, se mantienen los flujos de diseño de estos equipos sin desviaciones considerables. Los resultados se muestran en las tablas 11.

De acuerdo al balance de agua de enfriamiento en este sector, se aprecia una deficiencia de aproximadamente 10% del flujo esperado y a las Plantas Estabilizadoras No. 1 y 2 se va aproximadamente 1000 GPM más de la necesaria. Este flujo excedente debería dirigirse a la planta de vacío.

Diseño				Convergencia			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1
L001	ENT1	J01	581.67	581.67	6.66	0.60	1.000
L002	J01	J02	418.61	420.45	6.06	0.03	0.996
L003	J02	J03	209.31	208.14	6.03	0.29	1.006
L006	J02	J03	209.30	212.31	6.03	0.29	0.986
L004	J03	J04	418.61	420.45	5.73	0.00	0.996
L007	J01	J04	163.06	161.22	6.06	0.34	1.011

Tabla No. 11a Resultados de la simulación hidráulica con arreglo original,
Planta de Destilación al Vacío (Sección de enfriadores), Sector 7.



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.6b Diagrama de distribución,

Planta de Destilación al Vacío, Sector 7. Arreglo Actual

Diseño				Convergencia			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1
L057	ENT1	J023	2948.40	2948.40	5.53	1.60	1.000
L058	J023	J025	1474.20	1474.94	3.94	0.30	1.000
L060	J025	J024	362.88	374.40	3.64	0.13	1.032
L062	J024	J046	155.36	157.66	3.51	0.22	1.015
L064	J024	J046	207.52	216.74	3.51	0.19	1.044
L066	J025	J047	362.88	374.40	3.28	0.15	1.032
L068	J046	J047	1111.32	1100.54	3.64	0.55	0.990
L059	J023	J026	1474.20	1473.46	3.94	0.30	1.000
L061	J026	J027	362.88	376.49	3.63	0.13	1.038
L063	J027	J049	155.36	159.52	3.50	0.20	1.027
L065	J027	J049	207.52	216.96	3.50	0.19	1.045
L067	J026	J048	1111.32	1096.98	3.63	0.55	0.987
L069	J049	J048	362.88	376.49	3.30	0.15	1.038
L070	J047	J050	1474.20	1474.94	3.13	0.32	1.000
L071	J048	J050	1474.20	1473.46	3.08	0.32	1.000
L072	J050	D062	2948.40	2948.40	3.45	1.58	1.000

Tabla No. 11b Resultados de la simulación hidráulica con arreglo original,
Planta de Destilación al Vacío (Sección de condensadores), Sector 7

Geometría actual				Con flujo máximo medido y presión de descarga de la bomba GA-6B				Con presión de descarga de la bomba GA-6B fija y flujo variable.			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h	Flujo M kg/h	Presión ent	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h	Presión ent.	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
			(1)	(2)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	2/1	(3)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	3/1
L060	BOMB	J081		1737.63	7.39	3.19		2182.05	8.77	4.43	
L081	J081	J024	362.88	906.04	4.19	0.37	2.497	1144.00	4.34	0.40	3.15256
5657	J061	J023	2948.40	1534.53	5.53	1.59	0.520	1090.13	5.53	1.59	0.36974
L058	J023	J025	1474.20	771.06	3.94	0.26	0.523	545.64	3.95	0.25	0.37013
L062	J024	J046	155.36	236.29	3.83	0.51	1.521	326.97	3.94	0.60	2.10462
L064	J024	J046	207.52	659.75	3.63	0.51	3.227	817.03	3.94	0.60	3.93708
L066	J025	J047	362.88	771.06	3.68	0.52	2.125	545.64	3.69	0.50	1.50364
L068	J046	J047	1111.32	906.04	3.32	0.15	0.815	1144.00	3.34	0.15	1.02941
L082	J081	J027	362.88	831.59	4.19	0.41	2.292	1039.05	4.34	0.46	2.86059
L059	J023	J025	1474.20	763.47	3.94	0.26	0.518	544.49	3.95	0.25	0.36935
L063	J027	J049	155.36	268.93	3.79	0.47	1.731	332.85	3.88	0.53	2.14247
L065	J027	J049	207.52	562.66	3.79	0.47	2.711	705.20	3.88	0.54	3.39820
L067	J026	J048	1111.32	763.47	3.66	0.52	0.687	544.49	3.69	0.50	0.48995
L069	J049	J048	362.88	831.59	3.32	0.15	2.292	1038.05	3.34	0.15	2.86059
L070	J047	J050	1474.20	1677.10	3.17	-0.31	1.138	1689.64	3.19	-0.31	1.14614
L071	J048	J050	1474.20	1595.00	3.17	-0.31	1.082	1582.54	3.19	-0.31	1.07349
L072	J050	D062	2948.40	3272.16	3.48	-1.58	1.110	3272.18	3.51	-1.58	1.10982

Tabla No. 11c Resultados de la simulación hidráulica con arreglo actual,
Planta de Destilación al Vacío (Sección de condensadores), Sector 7

Plantas Hidrodesulfuradoras de Destilados Intermedios No. 3 y 4, U-702 y U-802, Sector 8.

El esquema de distribución de esta planta se muestra en la figura III.7.

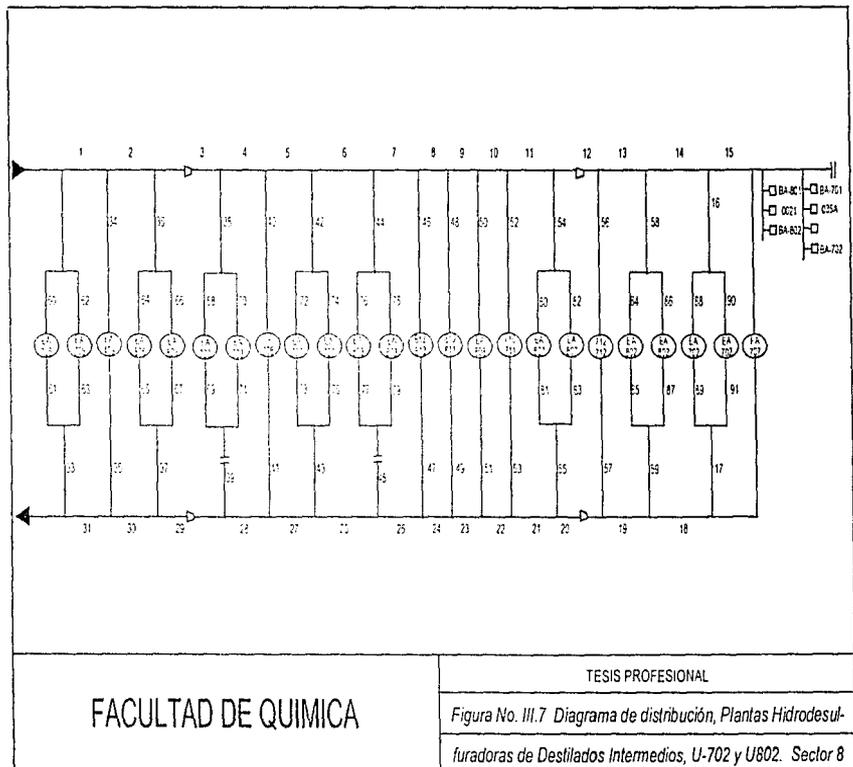
Para realizar la simulación de esta planta se hicieron las siguientes consideraciones:

- No se tomó en cuenta el enfriamiento de las bombas ni de los sistemas de lubricación. Por las características y caídas de presión de estos sistemas no se considera que tenga afectación sobre los resultados ya que representa el 3% del flujo total manejado en la red, en tuberías paralelas de 1 pulgada de diámetro.
- De la red de distribución de las Plantas Hidrodesulfuradoras de Destilados Intermedios U-702 y U-802, se alimenta agua al equipo EA-409, perteneciente a la Planta Hidrodesulfuradora de Naftas U-402 de este mismo sector.
- Con objeto de cerrar el circuito, se consideró que el agua utilizada por la Torre Lavadora FA-707, retorna a la torre de enfriamiento, sin repercutir en los resultados.

En la tabla III.12 se muestran los resultados obtenidos en la simulación, donde se puede notar que los equipos EA-703AB y EA-803AB reciben más del 150% del flujo de diseño, ocasionando que otros equipos queden escasos, EA-807 y EA-707.

Con objeto de lograr una distribución acorde a las necesidades de la planta, se propone colocar placas de orificio en las líneas de salida de los equipos EA-703 y EA-803. En la figura III.7 muestra la ubicación de las placas de orificio que se sugiere adicionar para balancear la red. Las características de las placas de orificio son las siguientes:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
SALIDA EA-703	8.00 pulg.	4.37 pulg.	0.62
SALIDA EA-803	8.00 pulg.	4.50 pulg.	0.55



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.7 Diagrama de distribución, Plantas Hidrodesulfuradoras de Destilados Intermedios, U-702 y U802. Sector 8

Linea	Diseño		Convergencia		Con placas de orificio	
	Flujo		Flujo	Relación	Flujo	Relación
	M kg/h (1)		Mkg/h (2)	de flujos 2/1	M kg/h (3)	de flujos 3/1
1	18953.5		19922.9	1.004	19884.4	1.002
2	19181.7		19165.3	0.999	19105.3	0.996
3	18544.2		18608.9	1.004	18500.6	0.998
4	17466.1		16767.1	0.960	16606.7	0.951
5	17439.5		16736.1	0.960	16575.0	0.951
6	14435.4		14115.5	0.978	13895.9	0.963
7	13357.3		12400.9	0.928	12143.1	0.909
8	13214.7		12251.7	0.927	11991.6	0.907
9	11883.9		10899.2	0.917	10767.6	0.906
10	11855.8		10868.9	0.917	10737.1	0.906
11	10525.0		9488.5	0.902	9503.6	0.903
12	7522.4		6990.4	0.929	6997.2	0.930
13	7379.8		6840.9	0.927	6848.3	0.928
14	3763.4		3458.3	0.919	3462.0	0.920
15	147.0		115.0	0.782	115.1	0.783
16	3616.4		3343.4	0.925	3347.0	0.926
17	3616.4		3343.4	0.925	3347.0	0.926
18	3763.4		3458.3	0.919	3462.0	0.920
19	7379.8		6840.9	0.927	6848.3	0.928
20	7522.4		6990.4	0.929	6997.2	0.930
21	10525.0		9488.5	0.902	9503.6	0.903
22	11855.8		10868.9	0.917	10737.1	0.906
23	11883.9		10899.2	0.917	10767.6	0.906
24	13214.7		12251.7	0.927	11991.6	0.907
25	13357.3		12400.9	0.928	12143.1	0.909
26	14435.4		14115.5	0.978	13895.9	0.963
27	17439.5		16736.1	0.960	16575.0	0.951
28	17466.1		16767.1	0.960	16606.7	0.951
29	18544.2		18608.9	1.004	18500.6	0.998
30	19181.7		19165.3	0.999	19105.3	0.996

Tabla No. III.12 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Hidrosulfuradoras de Destilados Intermedios U-702 y U-802, Sector 8

Linea	Diseño		Convergencia		Con placas de orificio	
	Flujo M.kg/h (1)	Flujo M.kg/h (2)	Relación de flujos 2/1	Flujo M.kg/h (3)	Relación de flujos 3/1	
31	19853.5	19922.9	1.004	19884.4	1.002	
32	637.5	568.1	0.891	605.6	0.952	
33	637.5	568.1	0.891	605.6	0.952	
35	671.6	757.6	1.128	778.1	1.158	
36	637.5	568.3	0.873	605.6	0.950	
37	637.5	568.3	0.873	605.6	0.950	
38	1078.1	1841.8	1.708	1893.9	1.757	
39	1078.1	1841.8	1.708	1893.9	1.757	(*)
40	28.1	31.0	1.103	31.7	1.128	
41	28.1	31.0	1.103	31.7	1.128	
42	3002.6	2620.7	0.873	2679.2	0.892	
43	3002.6	2620.7	0.873	2679.2	0.892	
44	1078.1	1714.5	1.595	1752.7	1.626	
45	1078.1	1714.5	1.595	1752.7	1.626	(*)
46	142.6	149.2	1.046	151.5	1.062	
47	142.6	149.2	1.046	151.5	1.062	
48	1330.8	1352.5	1.016	1224.0	0.920	
49	1330.8	1352.5	1.016	1224.0	0.920	
50	28.1	30.3	1.078	30.5	1.085	
51	28.1	30.3	1.078	30.5	1.085	
52	1330.8	1380.4	1.037	1233.5	0.927	
53	1330.8	1380.4	1.037	1233.5	0.927	
54	3002.6	2498.0	0.832	2506.3	0.835	
55	3002.6	2498.0	0.832	2506.3	0.835	
56	142.6	149.6	1.049	149.0	1.045	
57	142.6	149.6	1.049	149.0	1.045	
58	3616.4	3382.5	0.935	3386.2	0.936	
59	3616.4	3577.5	0.951	3984.9	0.853	
60	318.6	284.8	0.894	304.1	0.954	
61	318.6	284.8	0.894	304.1	0.954	

* Placa de orificio

Tabla No. III.12 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Hidrosulfuradoras de Destilados Intermedios U-702 y U-802, Sector 8

Linea	Diseño		Convergencia		Con placas de orificio	
	Flujo M kg/h (1)		Flujo Mkg/h (2)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Relación de flujos 3/1
62	318.8		283.3	0.889	302.5	0.949
63	318.8		283.3	0.889	302.5	0.949
64	318.8		278.2	0.873	302.8	0.950
65	318.8		278.2	0.873	302.8	0.950
66	318.8		278.2	0.873	302.8	0.950
67	318.8		278.2	0.873	302.8	0.950
68	539.1		920.9	1.708	946.9	1.757
69	539.1		920.9	1.708	946.9	1.757
70	539.1		920.9	1.708	946.9	1.757
71	539.1		920.9	1.708	946.9	1.757
72	1501.3		1310.3	0.873	1339.5	0.892
73	1501.3		1310.3	0.873	1339.5	0.892
74	1501.3		1310.3	0.873	1339.5	0.892
75	1501.3		1310.3	0.873	1339.5	0.892
76	539.1		857.3	1.590	876.4	1.626
77	539.1		857.3	1.590	876.4	1.626
78	539.1		857.3	1.590	876.4	1.626
79	539.1		857.3	1.590	876.4	1.626
80	1501.3		1249.0	0.832	1253.2	0.835
81	1501.3		1249.0	0.832	1253.2	0.835
82	1501.3		1249.0	0.832	1253.2	0.835
83	1501.3		1249.0	0.832	1253.2	0.835
84	1808.2		1691.3	0.935	1693.1	0.936
85	1808.2		1691.3	0.935	1693.1	0.936
86	1808.2		1691.3	0.935	1693.1	0.936
87	1808.2		1691.3	0.935	1693.1	0.936
88	1808.2		1672.1	0.925	1673.9	0.926
89	1808.2		1672.1	0.925	1673.9	0.926
90	1808.2		1671.3	0.924	1673.1	0.925
91	1808.2		1671.3	0.924	1673.1	0.925
92	147.0		115.0	0.782	115.1	0.783

Tabla No. III.12 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Hidrodesulfuradoras de Destilados Intermedios U-702 y U-802, Sector 8

Diseño		Convergencia		Con placas de orificio	
Línea	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Relación de flujos 3/1
92	147.0	115.0	0.782	115.1	0.783
93	147.0	115.0	0.782	115.1	0.783
92	147.0	115.0	0.782	115.1	0.783
95	318.8	284.8	0.894	304.1	0.954
96	318.8	283.3	0.889	302.5	0.949
97	671.8	757.6	1.128	78.1	0.116
98	318.8	278.2	0.873	302.8	0.950
99	318.8	278.2	0.873	302.8	0.950
100	539.1	920.9	1.708	946.9	1.757
101	539.1	920.9	1.708	946.9	1.757
102	26.1	31.0	1.103	31.7	1.128
103	1501.3	1310.3	0.873	1339.5	0.892
104	1501.3	1310.3	0.873	1339.5	0.892
105	539.1	657.3	1.590	876.4	1.626
105	539.1	657.3	1.590	876.4	1.626
107	142.6	149.2	1.046	151.5	1.062
108	1330.8	1352.5	1.016	1224.0	0.920
109	26.1	30.3	1.078	30.5	1.085
110	1339.8	1380.4	1.037	1233.5	0.927
111	1501.3	1249.0	0.832	1253.2	0.835
112	1501.3	1249.0	0.832	1253.2	0.835
113	142.6	149.6	1.049	149.0	1.045
114	1609.2	1691.3	0.935	1693.1	0.936
115	1609.2	1691.3	0.935	1693.1	0.936
116	1609.2	1672.1	0.925	1673.9	0.926
117	1609.2	1671.3	0.924	1673.1	0.925
118	147.0	115.0	0.782	115.1	0.783

Tabla No. III.12 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios U-702 y U-802, Sector 8

Planta Hidrodesulfuradora de Naftas, U-402, Sector No. 8

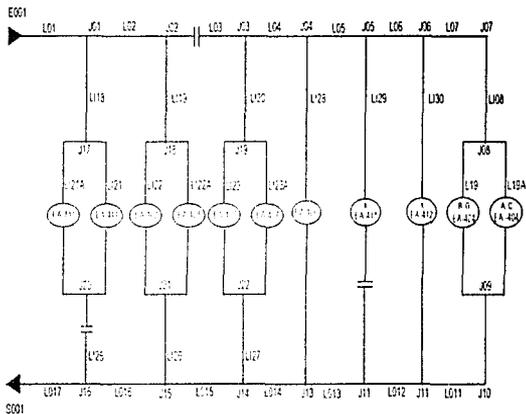
Esta planta fue simulada con arreglo de diseño, ver figura III.8. flujo de diseño y máximo medido, obteniendo los resultados mostrados en la tabla III.13.

La corrida con flujos de diseño indica más del 350% de flujo para el equipo EA-411 y 19% menos en los equipos EA-404 y EA-406.

Por otra parte, a pesar de que el flujo máximo medido representa un exceso de flujo respecto al diseño de casi 25% no se tiene la distribución de agua adecuada en la planta, permaneciendo sobrado el equipo EA-411 y escaso el EA-406.

Para solucionar los problemas de esta planta se propone la colocación de dos placas de orificio con las cuales se lograría la distribución de agua de acuerdo al diseño, evitando el consumo extra de agua. Las características de las placas son las siguientes:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
SALIDA EA-411	12.00 plg.	2.2 plg.	0.20
SALIDA EA-408	16.00 plg.	11.5 plg.	0.28



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.8 Diagrama de distribución,

Hidrodesulfuradora de Naftas, U-402, Sector 8

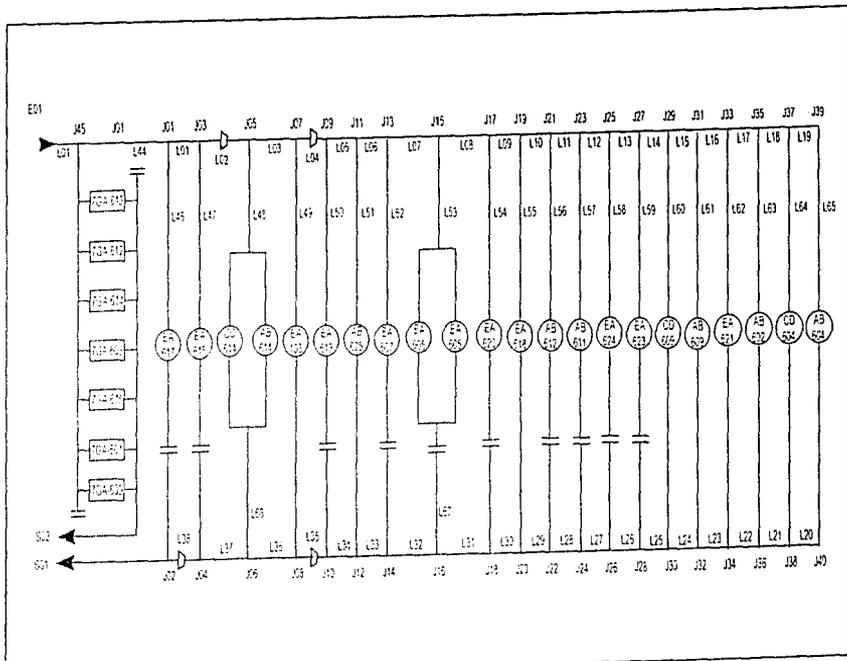
Planta Tratadora y Fraccionadora de Destilados Intermedios, U-602, Sector No. 8

El esquema de distribución de la planta se encuentra en la figura III.9.

La simulación muestra desviaciones de flujo en 11 equipos de los 20 que utilizan agua de enfriamiento en esta planta. Estos equipos (EA-617, EA-615, EA-613, EA-607, EA-620, EA-618, EA-612, EA-611, EA-624, EA-623 y EA-605) requieren un flujo de agua pequeño con muy bajas caídas de presión, permitiendo el paso de mayor cantidad de agua provocando que equipos como el EA-604, reciban 32% menos del agua requerida. Los resultados de esta simulación se muestran en la tabla III.14.

La solución propuesta para resolver estos problemas requiere la colocación de 11 placas de las siguientes características:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
SALIDA DEL EA-617	4 plg.	2 plg.	0.81
SALIDA DEL EA-615	3 plg.	0.85 plg.	1.08
SALIDA DEL EA-613	1.5 plg.	1.1 plg.	0.46
SALIDA DEL EA-607	1.5 plg.	0.95 plg.	0.54
SALIDA DEL EA-620	1.5 plg.	0.94 plg.	0.51
SALIDA DEL EA-618	4 plg.	2.25 plg.	0.36
SALIDA DEL EA-612	3 plg.	0.5 plg.	0.69
SALIDA DEL EA-611	1.5 plg.	0.8 plg.	0.28
SALIDA DEL EA-624	3 plg.	1.0 plg.	0.56
SALIDA DEL EA-623	3 plg.	2.0 plg.	0.22
SALIDA DEL EA-605	8 plg.	4.5 plg.	0.98



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.9 Diagrama de distribución, Planta Tratadora y Fraccionadora de Destilados Intermedios, U-602. Sector B

Diseño		Convergencia					Con placas de orificio				
Enlace	Del nudo	Al nudo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L143	E1	JO45	2302.13	2302.13	4.94	0.02	1.000	2302.13	4.94	0.02	1.000
L144	JO45	JO61	2302.13	2302.13	4.92	0.01	1.000	2302.13	4.82	0.01	1.000
L101	JO01	JO03	2245.25	2212.57	4.90	0.02	0.985	2244.92	4.81	0.02	1.000
L102	JO03	JO05	2234.00	2155.05	4.88	0.05	0.965	2233.48	4.79	0.06	1.000
L103	JO05	JO07	1617.16	1595.28	4.83	0.03	0.998	1614.07	4.73	0.02	0.998
L104	JO07	JO09	1567.16	1515.79	4.80	0.07	0.968	1563.82	4.71	0.08	0.998
L105	JO09	JO11	1553.91	1489.68	4.73	0.02	0.965	1550.45	4.63	0.02	0.998
L106	JO11	JO13	1460.53	1405.63	4.71	0.03	0.963	1455.53	4.61	0.03	0.997
L107	JO13	JO15	1450.23	1391.72	4.68	0.01	0.960	1445.11	4.58	0.02	0.996
L108	JO15	JO17	1313.62	1243.98	4.67	0.02	0.947	1304.94	4.56	0.01	0.993
L109	JO17	JO19	1303.28	1230.41	4.65	0.02	0.944	1294.70	4.55	0.03	0.993
L110	JO19	JO21	1252.30	1172.53	4.63	0.01	0.936	1244.52	4.52	0.02	0.994
L111	JO21	JO23	1249.03	1143.98	4.62	0.02	0.916	1241.34	4.50	0.01	0.994
L112	JO23	JO25	1243.95	1137.91	4.60	0.01	0.915	1236.19	4.49	0.02	0.994
L113	JO25	JO27	1232.61	1107.26	4.59	0.01	0.898	1224.74	4.47	0.01	0.994
L114	JO27	JO29	1203.13	1075.01	4.58	0.01	0.894	1195.14	4.46	0.01	0.993
L115	JO29	JO31	1099.23	948.15	4.57	0.01	0.887	1061.09	4.45	0.01	0.992
L116	JO31	JO33	935.32	823.72	4.55	0.01	0.851	927.78	4.44	0.01	0.992
L117	JO33	JO35	921.05	808.51	4.55	0.02	0.878	912.91	4.43	0.02	0.991
L118	JO35	JO37	399.28	248.55	4.53	0.00	0.623	368.45	4.41	0.01	0.923
L119	JO37	JO38	199.64	113.60	4.53	0.01	0.569	168.57	4.40	0.04	0.844
L164	JO37	JO36	199.64	134.95	4.53	0.02	0.676	199.87	4.40	0.65	1.001
L121	JO38	JO36	399.28	248.55	3.91	0.00	0.623	368.45	3.76	0.00	0.923
L163	JO35	JO36	521.79	559.95	4.52	0.60	1.073	544.47	4.41	0.57	1.043
L122	JO36	JO34	921.05	808.51	3.91	0.02	0.676	912.91	3.76	0.02	0.991

Tabla No. III.14 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Tratadora y Fraccionadora de Destilados Intermedios, U-602, Sector 8

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 3/1
L162	J033	J034	14.26	15.22	4.55	0.64	1.067	14.86	4.43	0.61	1.042
L123	J034	J032	935.32	823.72	3.89	0.09	0.891	927.78	3.74	0.01	0.992
L161	J031	J032	133.90	124.43	4.56	0.68	0.929	133.31	4.44	0.75	0.996
L124	J032	J030	1069.23	948.15	3.89	0.01	0.897	1061.09	3.73	0.01	0.992
L160	J029	J030	133.90	126.85	4.57	0.69	0.947	134.06	4.45	0.75	1.001
L125	J030	J028	1203.13	1075.01	3.88	0.01	0.894	1195.14	3.72	0.02	0.993
L126	J028	J026	1232.61	1107.26	3.66	0.01	0.898	1224.74	3.70	0.01	0.994
L158	J025	J026	11.34	30.66	4.59	0.67	2.703	11.45	4.47	0.77	1.010
L127	J026	J024	1243.95	1137.91	3.85	0.02	0.915	1235.19	3.69	0.01	0.994
L157	J023	J024	5.06	6.07	4.60	0.72	1.195	5.15	4.49	0.79	1.013
L128	J024	J022	1249.03	1143.68	3.83	0.01	0.916	1241.34	3.68	0.02	0.994
L156	J021	J022	3.26	28.55	4.62	0.75	8.746	3.19	4.50	0.93	0.976
L129	J022	J020	1252.30	1172.53	3.82	0.01	0.936	1244.52	3.66	0.01	0.994
L155	J019	J020	50.99	57.88	4.63	0.76	1.135	50.18	4.52	0.97	0.984
L130	J020	J018	1303.28	1230.41	3.81	0.02	0.944	1294.70	3.65	0.02	0.993
L154	J017	J018	10.34	13.55	4.65	0.61	1.310	10.23	4.55	0.99	0.989
L148	J055	J041	616.84	589.78	4.83	0.10	0.956	618.41	4.73	0.11	1.004
L153	J015	J043	136.60	147.76	4.67	0.09	1.082	140.17	4.56	0.08	1.026
L139	J041	J042	306.42	283.92	4.73	0.27	0.921	310.99	4.62	0.28	1.008
L140	J041	J042	306.42	305.66	4.73	0.28	0.992	308.42	4.62	0.27	1.000
L141	J043	J044	68.30	75.28	4.58	0.60	1.102	71.87	4.48	0.72	1.052
L142	J043	J044	68.30	72.47	4.58	0.74	1.061	68.30	4.48	0.65	1.000
L131	J018	J016	1313.62	1243.66	3.79	0.02	0.947	1304.94	3.63	0.02	0.993
L167	J044	J016	136.60	147.76	3.75	0.04	1.062	140.17	3.76	0.22	1.026
L132	J016	J014	1450.23	1391.72	3.77	0.01	0.960	1445.11	3.61	0.02	0.996
L152	J013	J014	10.30	14.91	4.65	0.85	1.448	10.42	4.58	0.96	1.012

(*)
(*)

Tabla No III.14 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Tratadora y Fraccionadora de Destilados Intermedios, U-602. Sector 8

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M ³ /kg/h (1)	Flujo M ³ /kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M ³ /kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L133	J014	J012	1460.53	1405.63	3.76	0.03	0.953	1455.53	3.59	0.02	0.997
L151	J011	J012	93.39	93.25	4.71	0.96	0.999	94.92	4.61	1.00	1.016
L134	J012	J010	1553.91	1498.88	3.73	0.02	0.955	1550.45	3.57	0.03	0.998
L150	J009	J010	13.25	16.82	4.73	0.96	1.269	13.37	4.63	1.07	1.009
L135	J010	J008	1567.16	1516.70	3.71	0.00	0.958	1563.82	3.54	0.00	0.998
L149	J007	J008	50.00	48.59	4.80	1.08	0.972	50.25	4.71	1.16	1.005
L136	J008	J005	1617.16	1565.28	3.71	0.02	0.958	1614.07	3.54	0.02	0.998
L165	J042	J005	616.84	589.78	4.48	0.76	0.956	619.41	4.34	0.83	1.004
L137	J005	J004	2234.00	2155.05	3.69	0.04	0.955	2233.48	3.52	0.04	1.000
L147	J003	J004	11.25	57.51	4.68	1.10	5.112	11.44	4.79	1.25	1.017
L146	J001	J002	56.88	89.57	4.90	1.11	1.575	57.21	4.81	1.31	1.006
L168	J002	SAL1	2302.13	2302.13	3.66	0.01	1.000	2302.13	3.59	0.00	1.000

* Placa de orificio

Tabla No. III.14 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Tratadora y Fraccionadora de Destilados Intermedios, U-602. Sector 8

Planta Reformadora de Naftas, U-502, Sector No. 8

Esta planta tiene servicios de enfriamiento a motores y compresores. No se contó con el total de la información de caídas de presión y se supuso que a estos enfriadores les llega el agua de enfriamiento de diseño. El esquema de distribución se muestra en la figura III. 10.

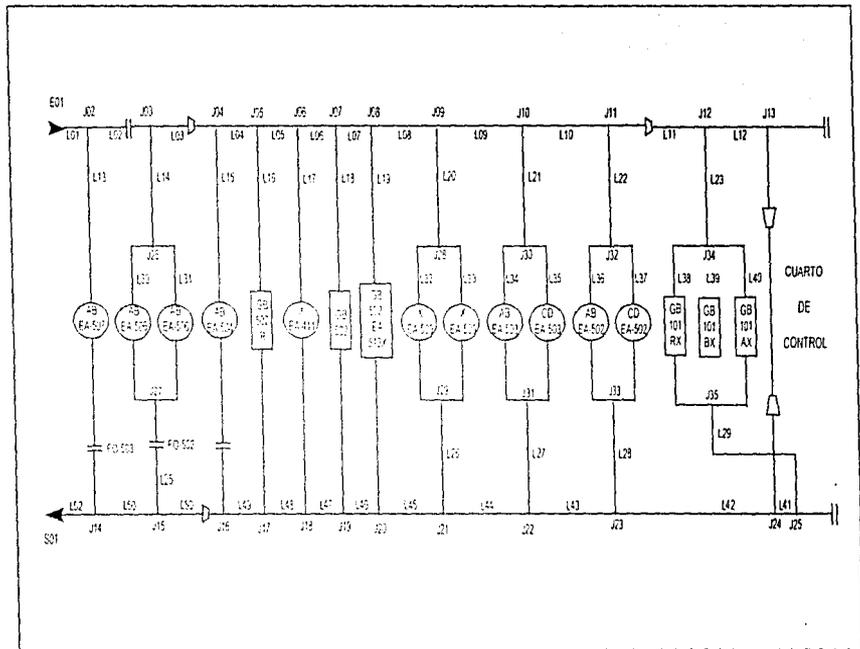
En campo, esta planta fue reportada sin problemas, sin embargo, actualmente maneja aproximadamente 22% más flujo. Al simular esta planta con flujos y geometría de diseño, se presentaron problemas de convergencia, indicándonos que hay fuertes desbalances en la red. Al simularla con flujos mayores se pudo detectar que hay flujo preferencial hacia el equipo EA-504.

Una vez identificado el problema de esta planta, se simuló con la geometría y flujos de diseño, adicionando una placa de orificio en la línea de salida del equipo EA-504. Los resultados se encuentran en la tabla III. 15.

Con esta modificación se logra una distribución de agua muy cercana a la de diseño, ahorrando además el flujo de agua excedente (2,800 GPM).

Las características de la placa son

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
SALIDA DEL EA-504	6 plg.	3 plg.	0.55



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.10 Diagrama de distribución,
 Planta Refomadora de Naftas, U-502. Sector 8

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	J031	J052	2579.29	2770.27	4.20	0.03	1.037	2670.26	4.20	0.03	1.000
L002	J052	J053	2357.43	2497.97	4.17	0.37	1.042	2399.05	4.17	0.34	1.001
L003	J063	J064	1873.24	1994.76	3.50	0.05	1.050	1684.99	3.83	0.05	1.006
L004	J064	J065	1770.13	1793.80	3.75	0.02	1.013	1782.70	3.78	0.02	1.007
L005	J065	J066	1757.64	1781.54	3.73	0.01	1.014	1770.45	3.76	0.01	1.007
L006	J066	J067	1749.00	1773.08	3.72	0.02	1.014	1761.99	3.75	0.02	1.007
L007	J067	J068	1749.00	1773.08	3.70	0.01	1.014	1761.99	3.73	0.01	1.007
L008	J068	J069	1745.27	1770.42	3.69	0.02	1.014	1759.34	3.72	0.02	1.007
L009	J069	J010	1653.43	1642.45	3.67	0.05	1.034	1031.11	3.70	0.07	1.022
L010	J010	J011	495.33	529.84	3.59	0.02	1.063	520.43	3.63	0.02	1.044
L011	J011	J012	178.00	207.62	3.57	0.01	1.166	199.48	3.61	0.01	1.121
L023	J012	J034	178.00	207.62	3.56	0.19	1.166	199.48	3.60	0.18	1.121
L038	J034	J035	59.33	71.48	3.37	0.33	1.205	68.23	3.42	0.30	1.150
L039	J034	J035	59.33	94.18	3.37	0.34	1.149	65.71	3.42	0.31	1.107
L040	J034	J035	59.33	67.95	3.37	0.34	1.145	65.54	3.42	0.31	1.105
L014	J003	J025	524.78	513.21	3.50	0.08	0.979	514.07	3.83	0.08	0.981
L020	J009	J028	737.65	727.97	3.67	0.09	0.987	728.23	3.70	0.08	0.987
L021	J010	J030	510.10	512.51	3.59	0.06	1.005	510.68	3.63	0.08	1.001
L022	J011	J032	320.33	322.22	3.57	0.08	1.006	320.95	3.61	0.08	1.002
L029	J035	J025	178.00	207.62	3.04	0.16	1.165	199.48	3.12	0.15	1.121
L030	J026	J027	232.09	256.48	3.72	0.39	0.979	256.94	3.75	0.40	0.980
L031	J026	J027	252.09	256.73	3.72	0.39	0.990	257.13	3.75	0.38	0.981
L032	J028	J029	358.92	353.65	3.58	0.71	0.987	354.11	3.62	0.72	0.987
L033	J028	J029	368.62	353.95	3.55	0.71	0.987	354.11	3.62	0.72	0.987
L034	J030	J031	255.05	255.29	3.51	0.55	1.005	255.33	3.55	0.55	1.001
L035	J030	J031	255.05	266.31	3.51	0.56	1.005	255.35	3.55	0.55	1.001
L036	J032	J033	150.17	161.14	3.48	0.55	1.005	160.49	3.53	0.55	1.002
L037	J032	J033	160.17	161.09	3.49	0.55	1.005	160.45	3.53	0.55	1.002
L041	J025	J024	178.00	207.62	2.65	0.00	1.166	199.48	2.97	0.00	1.121
L028	J033	J023	320.33	322.22	2.94	0.03	1.006	320.95	2.98	0.03	1.002
L042	J024	J023	178.00	207.62	2.63	0.00	1.166	199.48	2.97	0.00	1.121

Tabla No III 15 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Refinadora de Naftas, U-502 Sector B

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M kg/h (1)	Flujo M kg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relacion de flujos 3/1
L027	J031	J022	510.16	512.61	2.95	0.07	1.636	510.68	3.00	0.08	1.001
L043	J023	J022	499.33	520.64	2.31	0.02	1.653	520.43	2.95	0.02	1.044
L026	J029	J021	737.65	727.97	2.67	0.99	0.987	728.23	2.90	0.08	0.987
L044	J022	J021	1038.43	1042.45	2.85	-0.01	1.634	1031.11	2.92	-0.01	1.022
L019	J003	J020	2.72	2.66	3.69	0.93	0.978	2.66	3.72	0.93	0.976
L045	J021	J020	1745.27	1770.42	2.78	0.02	1.014	1759.34	2.82	0.02	1.007
L045	J020	J013	1743.02	1773.66	2.76	0.01	1.014	1761.99	2.79	0.01	1.007
L017	J026	J018	8.64	8.46	3.72	0.99	0.979	8.46	3.75	0.98	0.979
L016	J005	J017	12.49	12.26	3.73	1.00	0.981	12.25	3.76	0.99	0.981
L043	J018	J017	1757.64	1781.54	2.73	0.07	1.014	1770.45	2.77	0.01	1.007
L015	J004	J016	103.12	160.97	3.75	1.04	1.852	102.29	3.78	1.01	0.992
L040	J017	J016	1770.13	1793.80	2.73	0.02	1.013	1782.70	2.77	0.02	1.007
L025	J027	J015	524.18	513.21	3.33	0.67	0.979	514.07	3.35	0.69	0.981
L050	J016	J015	1673.24	1994.76	2.65	-0.09	1.050	1884.93	2.77	0.00	1.006
L013	J002	J014	272.63	272.31	4.17	1.55	0.998	271.20	4.17	1.41	0.994
L051	J015	J014	2397.43	2497.97	2.64	-0.09	1.042	2399.05	2.65	0.01	1.001
L052	J014	D056	2670.26	2770.27	2.75	0.02	1.037	2670.26	2.76	0.02	1.000

Placa de orificio

Tabla No. III 15 Resultados de la simulación hidráulica,
Planta Refinadora de Naftas, U-502, Sector 8

Planta de Desintegración Catalítica FCC-2, Sector No. 9

Los esquemas de distribución de esta planta se encuentran en la figura 11a (Rack Norte) y figura 11b (Rack Sur).

La planta presenta problemas en el funcionamiento de los enfriadores 102-C, 113-C, 122-C y 118-C. De acuerdo a los operadores de esta planta, estos equipos no cumplen con su servicio aún cuando la temperatura de entrada de agua es menor a la considerada en el diseño.

Se hicieron mediciones en campo del flujo de agua y estos valores muestran que el rack norte recibe mayor cantidad de agua que la requerida, y por otro lado, el rack sur recibe menos agua que la especificada en las hojas de datos de diseño.

La simulación del rack norte, con geometría y flujos de diseño (ver tabla 15A), muestra que el flujo manejado en el equipo 113-C es mayor al de diseño. En este caso, el resultado no concuerda con los reportes de los operadores de esta planta que dicen que a este equipo no le llega la suficiente agua para condensar. Esta situación se puede explicar por la incertidumbre en la operación real del sistema de enfriamiento de las bombas al no contar con las hojas de datos de estos equipos y al alto número de bombas que tiene la red en relación a los equipos de intercambio térmico.

Como práctica común, recomendamos que el disparo al enfriamiento del sistema de lubricación de las bombas sea independiente al de los cambiadores, asegurándose de esta manera el correcto suministro de agua al equipo 113-C.

Así mismo, de acuerdo a los resultados, se tendría que colocar una placa de orificio a la salida del equipo 102-C, para asegurar el flujo requerido en el 118-C.

La evaluación del rack sur diseño se hizo también considerando la geometría y flujos de diseño, mostrando desviaciones con respecto al diseño, siendo los equipos 147-C, 143-C, 125-C, 130-C y 135-C los que mayores desviaciones

presentan, ocasionando que los equipos como 136-C, 132-C y 122-C reciban muy poco flujo. Las simulaciones de esta planta se muestran en la tabla III.16.

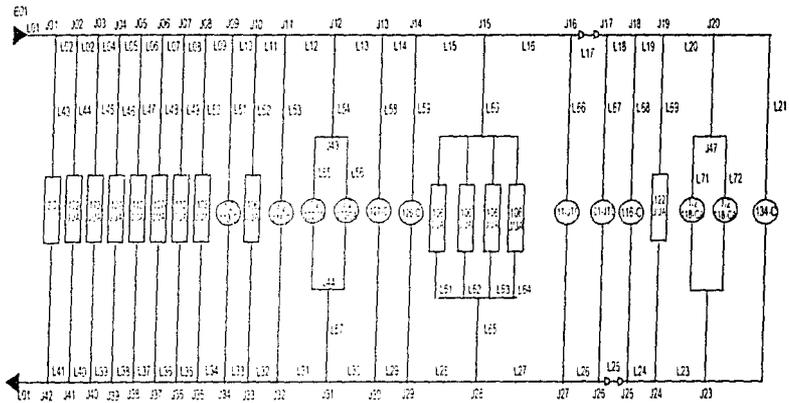
Para solucionar estos problemas, se procedió a incorporar placas de orificio en aquellas líneas donde el flujo sobrepasa al flujo esperado. Las placas se recomienda sean colocadas en los siguientes sitios:

RACK SUR:

LÍNEA No.	DIAM. LÍNEA	DIAM. ORIFICIO	ΔP placa (kg/cm ²)
SALIDA 130-C	10.00 pulg.	5.5 pulg.	0.347
SALIDA 147-C	4.00 pulg.	1.6 pulg.	0.642
SALIDA 143-C	6.00 pulg.	4.026 pulg.	0.570
SALIDA 128-C	2.00 pulg.	0.75 pulg.	0.316
SALIDA 125-C	6.00 pulg.	4.026 pulg.	0.377
SALIDA 121-C	10.00 pulg.	6.065 pulg.	0.316
SALIDA 132-C	8.00 pulg.	7.00 pulg.	0.255

La localización de las placas de orificio en ambos racks de tuberías se pueden ver en las figuras 11 y 11a, y los resultados de la simulación se muestran en las tablas 16 y 15a.

No se simuló esta planta con el flujo máximo medido, pues éste es menor al de diseño y no aporta criterios para resolver la hidráulica de la red.



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.7 Diagrama de distribución, Planta de
Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Norte. Sector 9

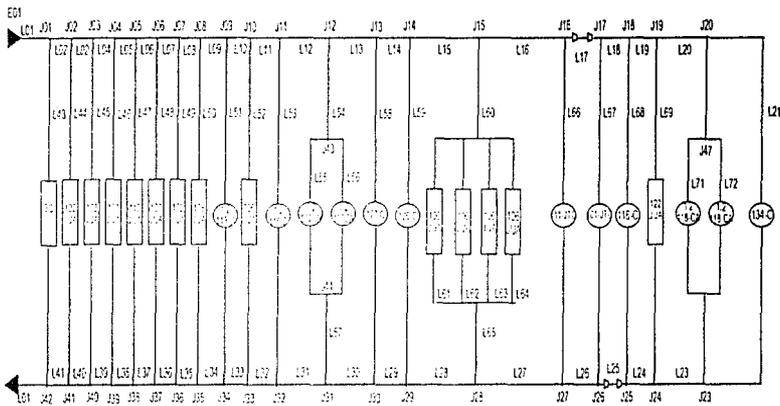
Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M ³ /h (1)	Flujo M ³ /h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M ³ /h (3)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	E1	J001	3408.00	3408.00	4.55	0.12	1.000	3408.00	4.55	0.12	1.000
L002	J001	J002	360.00	3391.00	4.43	0.02	0.001	3394.00	4.43	0.02	1.000
L003	J002	J003	3152.00	3149.00	4.41	0.01	0.999	3152.00	4.41	0.01	1.000
L004	J003	J004	3150.00	3138.00	4.40	0.02	0.995	3150.00	4.40	0.02	1.000
L005	J004	J005	3128.00	3060.00	4.37	0.01	0.978	3128.00	4.37	0.01	1.000
L006	J005	J006	2789.00	2756.00	4.36	0.01	0.985	2799.00	4.36	0.01	1.000
L007	J006	J007	2470.00	2454.00	4.35	0.01	0.994	2470.00	4.35	0.01	1.000
L008	J007	J008	2141.00	2154.00	4.34	0.02	1.006	2141.00	4.34	0.02	1.000
L009	J008	J009	2139.00	2142.00	4.32	0.01	1.002	2139.00	4.32	0.01	1.000
L010	J009	J010	2019.00	2013.00	4.31	0.01	0.997	2019.00	4.31	0.01	1.000
L011	J010	J011	2011.00	2001.00	4.30	0.00	0.995	2011.00	4.30	0.01	1.000
L012	J011	J012	1280.00	1509.00	4.00	0.03	1.179	1280.00	4.29	0.01	1.000
L013	J012	J013	1105.00	1208.00	4.27	0.01	1.173	1106.00	4.28	0.01	1.000
L014	J013	J014	1104.00	1293.00	4.26	0.03	1.171	1104.00	4.27	0.00	1.000
L015	J014	J015	802.10	958.00	4.26	0.02	1.195	802.10	4.27	0.02	1.000
L049	J015	J033	359.20	315.50	4.24	0.07	0.814	368.20	4.25	0.11	1.000
L050	J033	J034	97.75	8.45	4.17	0.89	0.087	97.75	4.14	0.94	1.000
L051	J033	J034	290.50	237.40	4.17	0.89	1.058	290.50	4.14	0.86	1.000
L016	J015	J016	413.50	643.00	4.24	1.01	1.554	413.50	4.25	1.15	1.000
L052	J034	J016	328.20	315.50	3.29	0.65	0.814	368.20	3.20	0.08	1.000
L042	J011	J031	731.30	491.60	4.30	0.03	0.672	731.30	4.29	0.06	1.000
L017	J016	J017	832.10	958.50	3.23	0.01	1.195	802.10	3.10	0.01	1.000
L048	J014	J017	301.90	333.70	4.26	1.04	1.105	301.90	4.27	1.09	1.000
L043	J031	J032	355.60	214.30	4.27	1.05	0.566	355.60	4.23	1.05	1.000
L044	J031	J032	355.60	277.30	4.27	1.05	0.759	355.60	4.23	1.05	1.000
L047	J013	J018	2.29	5.07	4.26	1.04	2.214	2.29	4.27	1.18	1.000
L18	J017	J016	1104.00	1293.00	3.22	0.90	1.171	1104.00	3.09	0.00	1.000
L019	J018	J019	1105.00	1298.00	3.22	0.91	1.173	1106.00	3.09	0.00	1.000
L045	J042	J019	173.80	211.50	4.27	1.06	1.217	173.80	4.28	1.11	1.000
L020	J019	J020	1260.00	1560.00	3.21	0.60	1.179	1260.00	3.09	0.00	1.000
L046	J032	J023	731.30	491.60	3.22	0.91	0.672	731.30	3.18	0.02	1.000

Tabla No. III.16a Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Sur. Sector 9

Diseno				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Orificio	Orificio	Flujo	Flujo	Presión ent.	ΔP	Relación de flujos	Flujo	Presión ent.	ΔP	Relación de flujos
			(1)	(2)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	Z1	(3)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	Z1
L021	J020	J021	2011.00	2901.00	3.21	0.00	0.995	2011.00	3.09	0.01	1.000
L041	J010	J021	7.53	12.56	4.30	1.09	1.668	7.53	4.30	1.21	1.000
L022	J021	J022	2019.00	2013.00	3.21	0.01	0.997	2019.00	3.08	0.00	1.000
L039	J009	J023	2.29	11.99	4.52	1.13	5.240	2.29	4.32	1.23	1.000
L024	J023	J024	2141.00	2154.00	3.19	0.02	1.006	2141.00	3.07	0.02	1.000
L038	J007	J024	329.00	299.90	4.34	1.17	0.912	329.00	4.34	1.42	1.000
L025	J024	J025	2470.00	2454.00	3.17	0.01	0.994	2470.00	3.05	0.01	1.000
L037	J005	J025	329.00	301.60	4.35	1.19	0.917	329.00	4.35	1.42	1.000
L026	J025	J026	2799.00	2756.00	3.16	0.01	0.985	2799.00	3.04	0.01	1.000
L036	J005	J026	329.00	304.40	4.26	1.21	0.925	329.00	4.36	1.42	1.000
L027	J026	J027	3126.00	3050.00	3.15	0.01	0.978	3126.00	3.03	0.02	1.000
L034	J003	J028	2.26	10.77	4.40	1.27	4.705	2.29	4.40	1.37	1.000
L029	J023	J029	3152.00	3149.00	3.12	0.01	0.999	3152.00	3.00	0.02	1.000
L033	J002	J029	231.70	232.10	4.41	1.30	1.002	231.70	4.41	1.30	1.000
L030	J029	J030	3384.00	3381.00	3.11	0.02	0.999	3384.00	2.98	0.01	1.000
L032	J001	J030	24.71	27.17	4.43	1.34	1.100	24.70	4.43	1.43	1.000
L031	J030	S1	3408.00	3408.00	3.05	0.05	1.000	3408.00	2.97	0.05	1.000

* Placa de orificio

Tabla No. III.16a Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Sur, Sector 9



FACULTAD DE QUIMICA

TESIS PROFESIONAL

Figura No. III.7 Diagrama de distribución, Planta de

Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Norte. Sector 9

Diseño		Convergencia				Con placas de orificio					
Enlace	Del nudo	Al nudo	Flujo M kg/h (1)	Flujo Mkg/h (2)	Presión ent (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L001	E1	J001	6015.42	6015.41	4.55	0.10	1.000	6015.41	4.55	0.10	1.000
L002	J001	J002	6013.84	6013.83	4.45	0.01	1.000	6013.83	4.45	0.01	1.000
L003	J002	J003	6011.55	6011.54	4.44	0.04	1.000	6011.54	4.44	0.04	1.000
L004	J003	J004	6009.66	6009.23	4.40	0.04	1.000	6009.26	4.40	0.04	1.000
L005	J004	J005	6006.97	6006.94	4.35	0.02	1.000	6006.97	4.35	0.02	1.000
L006	J005	J006	6004.69	6004.65	4.33	0.03	1.000	6004.68	4.33	0.03	1.000
L007	J006	J007	6002.40	6002.37	4.30	0.02	1.000	6002.39	4.30	0.02	1.000
L008	J007	J008	6000.11	6000.09	4.28	0.02	1.000	6000.10	4.28	0.02	1.000
L009	J008	J009	5997.82	6000.09	4.26	0.04	1.000	5997.82	4.26	0.04	1.000
L010	J009	J010	5478.00	5431.64	4.22	0.02	0.992	5477.99	4.22	0.02	1.000
L011	J010	J011	5475.71	5428.35	4.20	0.02	0.992	5475.70	4.20	0.02	1.000
L012	J011	J012	5171.80	5092.87	4.18	0.02	0.985	5171.79	4.18	0.02	1.000
L013	J012	J013	4804.20	4644.22	4.16	0.01	0.967	4804.19	4.16	0.01	1.000
L014	J013	J014	4697.15	4532.55	4.15	0.01	0.965	4697.14	4.15	0.01	1.000
L015	J014	J015	4445.39	4445.77	4.14	0.02	0.954	4610.38	4.14	0.02	1.000
L016	J015	J016	4495.35	4338.07	4.12	0.02	0.955	4495.34	4.12	0.03	1.000
L017	J016	J017	3495.60	3370.44	4.10	0.13	0.964	3495.59	4.09	0.14	1.000
L018	J017	J018	601.93	647.61	3.97	0.01	0.808	801.92	3.95	0.01	1.000
L019	J018	J019	724.51	588.83	3.96	0.00	0.785	724.50	3.94	0.00	1.000
L020	J019	J020	722.22	566.55	3.95	0.01	0.784	722.22	3.94	0.01	1.000
L021	J020	J047	656.63	512.81	3.95	0.07	0.781	656.63	3.93	0.13	1.000
L071	J047	J048	328.32	186.53	3.88	0.47	0.568	328.31	3.79	0.49	1.000
L072	J047	J048	328.32	326.26	3.88	0.51	0.694	328.32	3.79	0.49	1.000
L021	J020	J023	65.59	53.74	3.95	0.53	0.619	65.59	3.93	0.54	1.000
L073	J048	J023	656.63	512.81	3.41	0.04	0.781	656.63	3.29	0.06	1.000
L054	J012	J043	367.60	448.65	4.16	0.10	1.220	367.60	4.16	0.07	1.000
L060	J015	J045	115.04	107.69	4.12	0.09	0.936	115.04	4.12	0.11	1.000

Tabla No. III. 16b Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Desintegración Catalítica FCC-2. Rack Norte. Sector 9

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo M.kg/h (1)	Flujo M.kg/h (2)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo M.kg/h (3)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
L023	J023	J024	722.22	596.55	3.42	0.01	0.784	722.22	3.38	0.01	1.000
L069	J019	J024	2.23	2.27	3.96	0.00	0.994	2.29	3.94	0.59	1.000
L024	J024	J025	724.51	563.83	3.41	0.00	0.785	724.50	3.37	0.01	1.000
L068	J018	J025	77.42	76.76	3.96	0.50	1.018	77.42	3.94	0.47	1.000
L025	J025	J026	801.53	647.61	3.41	0.00	0.808	801.92	3.35	0.00	1.000
L067	J017	J026	2693.67	2722.63	3.97	0.51	1.011	2693.67	3.95	0.47	1.000
L026	J026	J027	3495.60	3370.44	3.41	0.00	0.994	3495.59	3.35	0.00	1.000
L066	J016	J027	939.75	967.63	4.10	0.81	0.968	999.75	4.09	0.79	1.000
L055	J043	J044	183.80	252.67	4.05	0.71	1.375	183.80	4.09	0.37	1.000
L053	J043	J044	183.80	195.98	4.05	0.44	1.065	183.80	4.09	0.37	1.000
L051	J045	J046	27.12	28.09	4.03	0.04	0.741	27.12	4.01	0.69	1.000
L052	J045	J046	44.97	45.23	4.03	0.60	1.006	44.97	4.01	0.57	1.000
L063	J045	J046	24.87	24.16	4.03	0.72	0.971	24.87	4.01	0.71	1.000
L064	J045	J046	18.08	18.21	4.03	0.59	1.007	18.08	4.01	0.56	1.000
L027	J027	J028	4495.35	4339.97	3.41	0.02	0.955	4495.34	3.35	0.02	1.000
L055	J046	J028	115.04	107.69	3.39	0.09	0.936	115.04	3.39	0.10	1.000
L028	J028	J029	4610.39	4445.77	3.39	0.01	0.964	4610.38	3.33	0.01	1.000
L059	J014	J029	86.76	86.78	4.14	0.83	1.000	86.76	4.14	0.81	1.000
L029	J029	J030	4697.15	4532.55	3.38	0.01	0.965	4697.14	3.32	0.01	1.000
L058	J013	J030	107.05	111.67	4.15	0.65	1.043	107.05	4.15	0.74	1.000
L030	J030	J031	4804.20	4644.22	3.37	0.02	0.967	4804.19	3.31	0.02	1.000
L057	J044	J031	357.60	446.65	3.34	0.08	1.220	367.60	3.71	0.43	1.000
L031	J031	J032	5171.80	5092.87	3.34	0.01	0.965	5171.79	3.29	0.01	1.000
L053	J011	J032	303.91	335.48	4.16	0.56	1.107	303.91	4.16	0.83	1.000
L032	J032	J033	5475.71	5429.35	3.33	0.02	0.992	5475.70	3.28	0.03	1.000
L052	J010	J033	2.29	2.29	4.20	0.95	1.002	2.29	4.20	0.93	1.000
L033	J033	J034	5478.00	5431.64	3.31	0.02	0.992	5477.99	3.25	0.01	1.000

Tabla No. III.16b Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Norte. Sector 9

Diseño				Convergencia				Con placas de orificio			
Enlace	Del nodo	Al nodo	Flujo (kg/h)	Flujo (kg/h)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 2/1	Flujo (kg/h)	Presión ent. (kg/cm ²)	ΔP (kg/cm ²)	Relación de flujos 3/1
			(1)	(2)				(3)			
L051	J009	J034	519.83	559.45	4.22	0.64	1.094	519.93	4.22	0.88	1.000
L034	J034	J035	5997.82	6000.09	3.29	0.02	1.000	5997.82	3.24	0.02	1.000
L050	J008	J035	2.29	0.00	4.26	1.12	0.001	2.29	4.26	1.10	1.000
L035	J035	J036	6000.11	6000.09	3.27	0.02	1.000	6000.10	3.22	0.02	1.000
L049	J007	J036	2.29	2.28	4.28	1.15	0.996	2.29	4.28	1.13	1.000
L035	J036	J037	6002.40	6002.37	3.25	1.05	1.000	6002.39	3.20	0.05	1.000
L048	J005	J037	2.29	2.28	4.30	1.21	0.996	2.29	4.30	1.19	1.000
L037	J037	J038	6004.69	6004.65	3.20	0.01	1.000	6004.68	3.15	0.02	1.000
L047	J005	J038	2.29	2.29	4.33	1.23	1.001	2.29	4.33	1.21	1.000
L038	J038	J039	6006.97	6006.94	3.19	0.03	1.000	6006.97	3.13	0.02	1.000
L046	J004	J039	2.29	2.30	4.35	1.25	1.004	2.29	4.35	1.22	1.000
L039	J039	J040	6009.26	6009.23	3.16	0.02	1.000	6009.26	3.11	0.02	1.000
L045	J003	J040	2.29	2.30	4.40	1.32	1.005	2.29	4.40	1.28	1.000
L040	J040	J041	6011.55	6011.54	3.14	0.02	1.000	6011.54	3.09	0.02	1.000
L044	J002	J041	2.29	2.29	4.44	1.40	1.001	2.29	4.44	1.37	1.000
L041	J041	J042	6013.84	6013.83	3.12	0.00	1.000	6013.83	3.07	0.00	1.000
L043	J001	J042	1.59	1.59	4.45	1.41	1.002	1.58	4.45	1.38	0.997
L041	J041	J042	6013.84	6013.83	3.12	0.00	1.000	6013.83	3.07	0.00	1.000
L043	J001	J042	1.59	1.59	4.45	1.41	1.002	1.58	4.45	1.38	0.997

* Placa de orificio

Tabla No. III.16b Resultados de la simulación hidráulica,
Planta de Desintegración Catalítica FCC-2, Rack Norte, Sector 9

Es importante señalar que al aumentar la capacidad de las torres de enfriamiento, deberá realizarse la evaluación de los cabezales de distribución de agua fría hacia las plantas determinando si las bombas y la tubería cumplen con los requerimientos para manejar los nuevos flujos y presiones, o bien si es necesario el rediseño de cabezal nuevo.

III.3 Cambiadores de Calor

III.3.1 Evaluación de enfriadores reportados con problemas

Debido a los problemas reportados por los operadores en el equipo 113-C de la Planta de Desintegración Catalítica No. 2, se realizó la simulación termohidráulica con el programa CST de HTRI[®], de este equipo, tanto a condiciones de diseño como con flujos medidos, obteniéndose los siguientes resultados:

- La simulación del equipo 113-C a condiciones de diseño cumple termohidráulicamente con el servicio requerido.
- Para el flujo medido, 58.5% menor del flujo de diseño, la simulación resultante indica que el equipo no cumple con el servicio requerido, intercambiando solo el 80% de la carga de diseño.

Estas simulaciones sugieren que al corregir los problemas hidráulicos en el sistema de distribución el equipo 113-C, cumplirá con el servicio necesario.

III.3.2 Implementación de sistema combinados aire-agua

Con objeto de reducir el consumo global de agua de enfriamiento y de energía en la refinería, se propone la sustitución de servicios de enfriamiento con agua por sistemas combinados aire-agua, que consisten en remover una parte de la carga térmica del servicio en un aeroenfriador y en caso necesario, el resto en equipos de tubos y envolvente. Un esquema general de estos sistemas se muestra en la figura III.12.

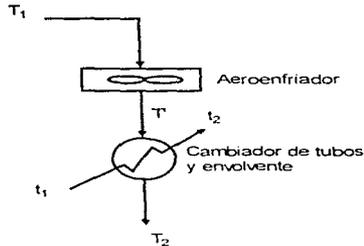


Figura No. III.12 Sistemas combinados aire-agua.

Se ha encontrado que el uso de aerofriadores es técnica y económicamente viables, cuando la temperatura de salida del fluido de proceso es mayor a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, el flujo de agua de enfriamiento en el servicio original es superior a $500,000\text{ kg/h}$, es decir una carga térmica grande, la temperatura de entrada del fluido de proceso mayor a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que la caída de presión disponible no limite su uso.

De acuerdo a estos criterios, se realizó un análisis de las cargas térmicas y niveles de temperatura en los enfriadores y condensadores de las plantas, resultando técnicamente factibles los servicios mostrados en la tabla III.17.

CLAVE	SERVICIO	PLANTA
EA-115AD	1er. Condensador de gasolina	Destilación Combinada
EA-116AH	Condensador de gasolina	Destilación Combinada
EA-109	Enfriador de turbosina	Destilación Combinada
AEA-17AJ	Condensador de gasolina	Destilación Atmosférica No. 2

Tabla No. III.17 Servicios propuestos para sustitución por sistemas combinados aire-agua.

Finalmente, al realizar el predimensionamiento de los aeroenfriadores con el programa ACE de HTRI, se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla III.18.

Equipo	T ₁ (°C)	T' ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Qt (MMkcal/h)	Qae (MMkcal/h)	Qte (MMkcal/h)	Wat (GPM)	Wte (GPM)	ΔWa (GPM)
EC-116	153	91.4	37.7	58.7	34.4	24.3	18,600	7,704	10,896
EC-115	176	68.9	37.7	18.4	16.2	2.2	5,835	698	5,137
EC-109	221	82.6	43.3	8.4	7.1	1.3	2,664	412	2,252
EC-17	147	91.4	43.3	63.9	35.25	28.65	20,265	9,086	11,179
TOTAL				149.4	93.15	56.25	44,110	17,805	26,305

Tabla No. III.18 Predimensionamiento de aeroenfriadores.

donde:

T₁ = Temperatura del fluido de proceso a la entrada al aeroenfriador.

T'₁ = Temperatura del fluido de proceso a la salida del aeroenfriador y entrada al cambiador de calor de tubos y envolvente.

T₂ = Temperatura final del fluido de proceso a la salida del cambiador de calor de tubos y envolvente.

Qt = Carga térmica total removida

Qae = Carga térmica del aeroenfriador

Qte = Carga térmica del cambiador de calor de tubos y envolvente.

Wat = Flujo de agua usada actualmente en el servicio.

Wte = Flujo de agua para este servicio incluyendo el aeroenfriador

ΔWa = Ahorro de agua de enfriamiento de circulación (diferencia entre Wa total y Wagua).

III.4 Tratamiento del Agua

A partir de los análisis químicos del agua de pozos usada para la reposición de agua en la torres de enfriamiento, se determinó el índice de estabilidad para conocer cuales son los problemas potenciales que puede ocasionar la calidad de esta agua. Como se indica en la tabla III 19, el agua usada en la refinería tiene tendencia a formar incrustaciones ya que presenta un Índice de Riznar de 5.1 a 5.9.

Actualmente se lleva acabo el tratamiento del agua de enfriamiento del sistema por empresas especializadas en el tratamiento de aguas, manteniendo un promedio de 2.9 ciclos de concentración, que son adecuados considerando que estos están

limitados por la elevada concentración de sílice presente en el agua de reposición, así como a su baja constante de solubilidad, $pK_s=150$ ppm :

Inhibidor de Corrosión	NX-3112-P
Biodispersante	NX-3222
Dispersante de Aceite	NX-2548
NX-3202	Biocida

Sin embargo, existen otros tratamientos que permiten incrementar los ciclos de concentraci3ntal como el recomendado por el Departamento de Productos Químicos del Instituto Mexicano del Petróleo, consistente en un paquete integral IMP-TE-500 "TODO ORGÁNICO" o fosfato bajo zinc, que es un antiincrustante, anticorrosivo para cobre y dispersante basado en un terpolimero de bajo peso molecular para mantener en suspensión al sílice con un máximo de 215 ppm sin que precipite, con el que se pueden incrementar los ciclos de concentraci3n a 3.3, que de acuerdo a la gráfica de ciclos de concentraci3n contra reposici3n y purga, figura III.13, representan un ahorro del 6% de agua de reposici3n y 18% en purga, equivalentes a 129 GPM y 129 GPM, respectivamente.

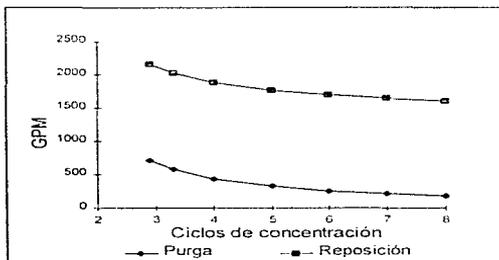


Figura No. III.13 Gráfica de ciclos de concentraci3n

Adicionalmente, este tratamiento presenta las siguientes ventajas:

- Inhibidor de corrosión
 - < 5. 0 mpa acero al carbón
 - < 1. 0 mpa admiralty
- Eficiencia de inhibición a la incrustación
 - > 90% para carbonato de calcio
 - > 85% para sílice
- Control bacteriológico
 - < 300. 000 bact/ml cuenta total bacteriana
 - < 8. 0 bact/ml sulfato reductoras
- Ecológica

Las aguas provenientes de las purgas de las torres de enfriamiento no impactarán al medio ambiente, ya que no contienen metales pesados, como zinc u otros. En el caso de fosfato bajo zinc, el agua de las purgas no contendrán más de 2. 4 ppm de zinc.

La dosificación necesaria del aditivo IMP-TE-50 es de 50-75 ppm con un costo de 0.60\$/m³ de agua de reposición, aproximadamente, logrando manejar agua con una concentración de hasta 215 ppm de SiO₂.

PARAMETRO	POZO #1 T	POZO #5 T	POZO #11 T	POZO #17 T	POZO #5 M	POZO #6 M	POZO #11 M	POZO #12 M
Ca (ppm)	458	305	300	214	290	200	200	260
Alcalinidad total (ppm)	400	450	420	450	480	480	450	500
pH	7.1	7.3	6.9	7.1	7.3	6.9	7	7.2
Sólidos disueltos (ppm)	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100	400-1100
Temp. mbt. (°C)	38	35	38	39	39	38	38	38
A	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
B	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
C	2.3	2.1	2.1	2	2.1	2	2	2.1
D	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8
pHs	6.1	6.3	6.3	6.4	6.3	6.4	6.4	6.2
IE	5.1	5.3	5.7	5.7	5.3	5.9	5.8	5.2
Resultado	Incrustante							

IE = Índice de estabilidad de Ryznar

A, B, C, D = Parámetros para el cálculo del índice de Ryznar

Tabla III.19 Cálculo de Índice de Ryznar

CAPITULO IV

ANALISIS ECONOMICO

IV.1 Métodos de análisis de factibilidad económica

IV.2 Consideraciones para la elaboración del análisis económico en este estudio

IV.3 Definición de propuestas de nula o mínima inversión

IV.4 Definición de propuestas para ahorro energético con inversión

IV.5 Análisis económico

IV.6 Inversiones adicionales

IV.7 Plan de acción

IV. ANALISIS ECONOMICO

Los proyectos relacionados con el uso racional de la energía deben ser evaluados económicamente como cualquier otro proyecto, ya que el objetivo de las empresas es la maximización de las utilidades.

El beneficio directo de las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía es la reducción de los consumos energéticos, obteniendo beneficios adicionales no siempre cuantificables, como son la reducción de los impactos ambientales, la preservación de los recursos naturales, el aumento de la productividad, la reducción del mantenimiento en equipos y en algunas ocasiones el aumento en la calidad de los productos.

IV.1 Métodos de análisis de factibilidad económica [10], [35], [36]

Las técnicas de evaluación económica de proyectos son herramientas que tienen como objetivo proporcionar los elementos de juicio para la selección de los proyectos de inversión. Las técnicas más comúnmente usadas por su facilidad de aplicación son: el periodo de recuperación de la inversión, el valor presente neto, la tasa interna de retorno, la relación beneficio-costo y el valor presente neto del incremento de la inversión.

a. Periodo de recuperación de la inversión (PRI)

Esta técnica calcula el tiempo necesario para recuperar la inversión a través de los beneficios del proyecto. Es la razón de la inversión fija inicial sobre los beneficios anuales.

$$PRI = \frac{\text{Inversion}}{\text{Beneficios anuales}} \text{ , años } \quad \text{ó} \quad \sum_{t=1}^{PRI} FNE = 0 \quad (IV.1)$$

El criterio de aceptación del proyecto lo establece el inversionista fijando el número máximo de años (dentro del tiempo de vida útil del proyecto) en que deba recuperar su capital.

b. Valor presente neto (VPN)

El valor presente neto es la diferencia entre el valor presente de los beneficios y la inversión a la tasa de descuento requerida. Esta técnica mide el efecto neto de una inversión a lo largo de su vida, tomando en cuenta el costo de oportunidad del capital. La ecuación IV.1 sirve para calcular el valor presente neto. La tasa de descuento requerida puede establecerse según la tasa de interés que prevalezca en el mercado financiero.

$$VPN = - \sum_{t=1}^n \frac{\text{Inversión}}{(1+i)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Beneficios}}{(1+i)^t} \quad \text{o} \quad VPN = \sum \frac{FNE}{(1+i)^n} \quad (\text{IV.2})$$

El criterio de aprobación con esta técnica es:

- Aceptar las inversiones que tengan valor presente neto positivo, $VPN \geq 0$

c. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno para una propuesta de inversión es la tasa de descuento que iguala los beneficios a valor presente con la inversión, es decir, la tasa de interés a la cual el valor presente neto es igual a cero.

$$\sum \frac{FNE}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (\text{IV.3})$$

Si la tasa interna de retorno es igual o mayor al costo de capital, entonces el proyecto es atractivo.

d. Relación beneficio-costo (RBC)

Es la relación entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de la inversión.

$$\frac{B}{C} = \frac{B(1+i)^n}{C(1+i)^n} \quad (IV.4)$$

El criterio de decisión es:

- $B/C \geq 1$ Aceptar
- $B/C \leq 1$ Rechazar

e. Valor presente del incremento de la inversión (VPI)

Este método sirve para seleccionar alternativas de inversión mutuamente excluyentes, es decir, diferentes opciones para un mismo objetivo. Debido a que las diferencias entre las alternativas es lo más importante, el valor presente del incremento en la inversión es lo que determina si se justifican inversiones mayores.

Este método consiste en:

1. Colocar las alternativas en orden ascendente de acuerdo a su inversión inicial.
2. Seleccionar las alternativas de menor costo, como base.
3. Comparar la mejor alternativa con la siguiente de acuerdo a la jerarquización dada en 1.

Esta comparación se basa en determinar el valor presente del incremento en inversión.

- Si este VP > 0 entonces la alternativa "retadora" se transforma en la mejor.

- Si el VP < 0 la alternativa "defendida" sigue siendo la mejor y entonces se elimina la "retadora".

4. Repetir el paso 3 tantas veces como alternativas existan.

Nomenclatura:

FNE: Flujo neto de efectivo

i = Costo de capital

n = Tiempo de vida útil del proyecto

B = Beneficios

C = Costos

IV.2 Consideraciones para la elaboración del análisis

Las bases para la elaboración del análisis económico de este estudio son:

- Este análisis se efectuará en dólares ya que los principales materiales es de importación y las cotizaciones proporcionadas están en dólares.
- Costo de energía eléctrica, 0.031 \$DlIs/KW-h¹
- Tipo de cambio, 8 \$ (M.N.)/\$ (DlIs)
- Tiempo de operación de la refinería, 8000 h/año
- Costo de agua cruda, 0.061 \$DlIs/barri¹
- Costo de descarga de agua, 0.073 \$DlIs/ m³ (0.58\$/m³)¹
- Tiempo máximo de recuperación de la inversión, 3 años
- Horizonte de estudio del proyecto, 5 años
- Costo de capital, 12%

IV.3 Definición de propuestas de nula o mínima inversión

Dentro de estas propuestas se incluyen aquellas que pueden ser realizadas por el personal de la refinería dentro de paros programados y con bajos costos de ejecución.

¹ Dato proporcionado por la Unidad de Evaluación y Programación de la Refinería "Miguel Hidalgo" en Tula, Hgo.

IV.3.1 Torres de enfriamiento

Como ya se mencionó en el punto III.1.c, hay medidas correctivas que tienen afectación en la eficiencia de la torre, que se traducen en ahorro de potencia y en incremento de la capacidad de enfriamiento, sin embargo, los beneficios independientes no son cuantificables.

Las medidas de nula inversión son las siguientes:

Torres CT-500, CT-501 y CT-502:

Estas torres son de características similares, por lo que las medidas propuestas son aplicables a las tres:

- Limpieza del depósito de agua caliente, incluyendo boquillas
- En las celdas adicionales, cancelar de 2 a 3 hileras de boquillas

Estas medidas están encaminadas a mejorar la distribución del agua en las torres.

Torres CT-501A y CT-503:

Estas dos torres son de características similares, por lo que las medidas propuestas son aplicables a ambas:

- Cancelar 3 hileras de boquillas en el depósito de agua caliente, para mejorar la distribución del agua en la torre.
- Retirar una de cada tres persianas, para disminuir la caída de presión del aire a la entrada de la torre.

Torre CT-506:

- Retirar una de cada tres persianas, para disminuir la caída de presión del aire a la entrada de la torre.
- Operar los interruptores de vibración, para la seguridad en la operación de los ventiladores.

IV.3.2 Equipo de transferencia de calor

Se requiere el seguimiento a las caídas de presión del agua en los enfriadores y condensadores, con objeto de mantener un programa de mantenimiento preventivo que evite el ensuciamiento excesivo y taponamiento en los tubos de estos equipos, manteniéndose de esa manera la adecuada transferencia de calor.

IV.3.3 Sistemas de distribución

El análisis hidráulico indica que se requiere la colocación de diversos elementos restrictivos al flujo, como placas de orificio, en algunas líneas de distribución de agua de enfriamiento de diversas plantas de proceso de la refinería, de acuerdo a los resultados indicados en el punto III 2, obteniéndose los siguientes beneficios :

- Mejor operación de enfriadores y condensadores con lo que puede mejorarse la operación de torres de destilación y sistemas de vacío, así como evitar mayores flujos de desfogue.
- Posibilidad de operar cada servicio de enfriamiento con el flujo de diseño, reduciendo los sobreflujos de agua de enfriamiento.

La reducción del sobreflujo demandado actualmente en la torre CT-500, de 7000 GPM aproximadamente, representan un ahorro en agua de reposición de 199 GPM, equivalentes a 185,059 \$Dlts/año, ahorro en descarga de agua al Río Tula de 65 GPM, equivalentes a 8,573 \$Dlts/año y un ahorro de energía eléctrica por bombeo estimado en 1'784,000 kWh/año, equivalentes a 55,480 \$Dlts/año.

IV.4 Definición de propuestas para ahorro energético con inversión

En esta sección se describen las medidas de ahorro energético y se proporciona un estimado de la inversión necesaria para llevarlas a cabo, sus costos de operación y los ahorros o beneficios esperados.

IV.4.1 Torres de enfriamiento

Las medidas correctivas tendientes a maximizar la capacidad de las torres, minimizando su consumo energético, son el resultado del análisis realizado en el punto III.1.

a. Inversión

Los costos de las medidas propuestas en este estudio fueron proporcionadas por cotización de un fabricante.

Torre CT-500:

- Reponer boquillas al 100%.
- Sellar y reparar cajas de salpiqueo.
- Cambiar válvulas controladoras de flujo al de tipo mariposa.
- Ajustar el claro entre aspas y chimeneas.
- Sellar todas las fugas en las chimeneas.
- Cambiar las paredes divisorias.
- Colocar puertas de acceso.
- 10% de reposición del relleno roto, uniformándolo a tipo "M" o "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas originales.
- 100% de malla soporte de relleno en celdas adicionales.
- 35% de reposición del relleno para uniformizar al tipo "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas adicionales.

El costo estimado para realizar estas modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra, para las secciones originales y celdas adicionales de la torre es de: \$377,500.00, (\$DIIs 47,187).

Torre CT-501:

- Reponer boquillas al 100%.
- Sellar paredes del depósito de agua caliente.
- Sellar y reparar cajas de salpiqueo.
- Cambiar válvulas controladoras de flujo al de tipo mariposa.
- Ajustar el claro entre aspas y chimeneas.
- Sellar todas las fugas en las chimeneas.
- Cambiar las paredes divisorias.
- Colocar puertas de acceso.
- 10% de reposición del relleno roto, uniformizandolo a tipo "M" o "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas originales.
- 100% de malla soporte de relleno en celdas adicionales.
- 35% de reposición del relleno para uniformizar al tipo "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas adicionales.

El costo estimado para realizar estas modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra para las secciones originales y celdas adicionales de la torre es de: \$340,950.00, (\$DIIs 42,619).

Torre CT-502:

- Reponer boquillas al 100%
- Sellar paredes del depósito de agua caliente
- Sellar y reparar cajas de salpiqueo
- Cambiar válvulas controladoras de flujo al de tipo mariposa
- Ajustar el claro entre aspas y chimeneas

- Sellar todas las fugas en las chimeneas
- Cambiar las paredes divisorias
- Colocar puertas de acceso
- 10% de reposición del relleno roto, uniformizandolo a tipo "M" o "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas originales.
- 100% de malla soporte de relleno en celdas adicionales
- 35% de reposición del relleno para uniformizar al tipo "V" con arreglo 12" x 8" triangular, en celdas adicionales.

El costo estimado para realizar modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra para las secciones originales y celdas adicionales de la torre es de: **\$836,750.00, (\$DIIs 104,594).**

Torre CT-501A:

- Completar al 100% las boquillas rompedoras de chorro, instalando restrictores si es necesario.
- Rediseñar y reconstruir las cajas de salpiqueo, incluyendo la construcción de un pretil cerrado de desborde.
- Cambiar el sistema de distribución, colocando las válvulas de control de flujo de tipo mariposa.
- Diseñar e instalar el aditamento recomendado para disminuir el claro entre aspas y chimenea.
- Instalar en todos los ventiladores las cubiertas de las mazas.
- Reponer 10% de relleno.

El costo estimado para realizar estas modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra para esta torre es de: **\$198,000.00, (\$DIIs 56,469).**

Torre CT-503:

- Completar al 100% las boquillas rompedoras de chorro, instalando restricciones si es necesario.
- Rediseñar y reconstruir las cajas de salpiqueo, incluyendo la construcción de un pretil cerrado de desborde.
- Cambiar el sistema de distribución, colocando las válvulas de control de flujo de tipo mariposa.
- Diseñar e instalar el aditamento recomendado para disminuir el claro entre aspas y chimenea.
- Instalar en todos los ventiladores las cubiertas de las mazas.
- Reponer 10% de relleno como repuesto.
- Rearreglar el relleno a paso triangular.
- Cambiar el 100% de los soportes de las mallas.
- Cambiar el 100% de las mallas soporte del relleno.
- Cambiar el 50% de relleno adicional, colocándolo en arreglo triangular a 8" x 8".
- Cambiar el 100% de clips.

El costo estimado para realizar estas modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra para esta torre es de: \$4'223,400.00, (SDIIs 527,925).

Torre CT-506:

- Completar al 100% las boquillas rompedoras de chorro, instalando restrictores si es necesario.
- Rediseñar y reconstruir las cajas de salpiqueo, incluyendo la construcción de un pretil cerrado de desborde.

- Ajustar el claro entre aspas y chimeneas por medio de lánas instaladas entre las secciones de la chimenea.
- Instalar en todos los ventiladores las cubiertas de las mazas.
- Modificar las mallas a paso 4" x 8", para instalar relleno a 8" x 8".
- Completar el relleno para arreglo de 8" x 8" (aproximadamente 10% adicional).

El costo estimado para realizar estas modificaciones, incluyendo materiales y mano de obra esta torre es de: **\$959,280.00, (\$DIIs 363,230)**.

Estas medidas permitirán alcanzar la máxima capacidad de las torres de acuerdo a los resultados de la simulación térmica de estas torres. CT-500, CT-501 y CT-502 = 9,200 GPM por celda; CT-503 y CT-506 = 16,942 GPM por celda, dando un total de 138,640 GPM de disponibilidad adicional de agua de enfriamiento, a las condiciones de diseño de las torres, equivalente a una torre de 14 celdas de 10,000 GPM cada una, con un costo estimado de \$96'000,000, (\$DIIs 12'000,000).

El total de la inversión para las 6 torres es \$ **6'230,350.00, (\$DIIs 778,794)**.

b. Ahorros en costos de operación

Las propuestas de mejoramiento en torres de enfriamiento CT-500, CT-501, CT-501A y CT-502, permitirán alcanzar las condiciones y eficiencia energética de diseño. El ahorro de energía esperado se calculó de la siguiente manera:

1. Calcular el potencial de ahorro de energía eléctrica a partir del potencial de ahorro (ΔT_c) de la tabla II.8 y la carga térmica actual, tabla II.7.

$$\text{Ahorro potencial} = \Delta T_c \times Q_{t \text{ act.}}$$

- Obtener el número de ventiladores que pueden salir de operación con el ahorro potencial de energía eléctrica y la potencia promedio actual consumida por los ventiladores, ajustando al entero inferior.

$$\text{No. celdas fuera} = \text{Ahorro potencial} / \text{Pot. vent. act.}$$

- El ahorro real de energía es:

$$\text{Ahorro real de energía} = \text{Pot. vent. act.} \times \text{No. vent. fuera}$$

- Cálculo del ahorro económico considerando 8000 horas/año de operación y 0.031 \$Dlts/kWh.

La tabla IV.1 muestra el ahorro de energía esperado para cada torre.

Torre		CT- 500	CT- 501	CT- 501A	CT- 502
ΔT_r	kV/MMkcal/h	1.28	3.84	5.98	2.80
Qt act.	MMkcal/h	113.1	49.1	50.5	155.0
Pot. vent. act.	kW	69.1	71.1	95.1	69.6
Ahorro potencial	kW	144.5	188.8	301.6	433.4
No. ventiladores fuera		2	2	3	6
Ahorro real de energía	kW	138.1	142.3	285.2	417.8
Ahorro económico	\$/año	34,254	35,285	70,725	103,611

Tabla No. IV 1 Ahorros de energía esperados

Como se mencionó en el punto II.1, existe la necesidad de aumentar el servicio de enfriamiento por construcción de plantas nuevas, la cual puede ser satisfecha por dos opciones:

Opción 1. Ampliación de la capacidad de las torres CT-503 y CT-506 con las medidas propuestas.

Opción 2. Adquisición de una torre nueva con capacidad de 140,000 GPM.

En la tabla IV.2 se presenta la energía consumida por los ventiladores de las torres CT-503 y CT-506 para alcanzar su máxima capacidad y la energía que consumirían 14 ventiladores de una torre nueva más la energía consumida actualmente por los ventiladores de las torres CT-503 y CT-506, así como el

ahorro potencial de 882.8 kW equivalentes a 218,934 \$Dlts/año, al realizar las modificaciones propuestas en las torres CT-503 y CT-506.

Opción	Consumo Energético kW	Costo de la energía \$Dlts/año
1. CT-503/CT-506	1864	462,272
2. Torre nueva	2746.8	681,206
Ahorro energía	882.8	218,934

Tabla No. IV.2 Consumo de energía para las opciones 1 y 2.

V.4.2 Implementación de sistemas combinados aire-agua

La información para los servicios en que pueden implementarse estos sistemas está basada en los predimensionamientos mencionados en el punto III.3.2.

a. Inversión

El costo de inversión de los aerofriadores se estimó mediante curvas de costo contra tamaño específico de equipo [36]. El costo base es multiplicado por factores que cubren inversiones adicionales como ingeniería, instalación y materiales varios asociados. La inflación es manejada multiplicando el costo base por los factores del índice de Nelson.

El costo del aerofriador está basado en el área extendida de transferencia de calor e incluye los factores por ingeniería, instalación y materiales extras asociados equivalente en: 29.3% del costo del equipo en materiales (tubería, concreto, instrumentos, eléctrico, pintura, etc.), 29.5% en materiales y mano de obra para realizar la instalación, 8% de fletes, seguros e impuestos, y 54% de indirectos.

Los costos estimados para los equipos propuestos se muestran en la tabla IV.3.

Equipo	Area, m ²	Costo, \$DlIs
EC-109	4,125	132,931
EC-115	10,553	281,845
EC-116	29,491	641,272
EC-17	29,491	641,272
Total		1,697,319

Tabla No. IV.3 Costo de aerorefrigeradores.

b. Costos de operación

Los costos de operación adicionales en esta propuesta se deben al consumo de energía eléctrica por los ventiladores de los aerorefrigeradores, los cuales se muestran en la tabla IV. 4.

Equipo	No. ventiladores	Potencia kW/vent.	Potencia Total, kW	Costo \$DlIs/año
EC-109	2	27.9	55.7	13,818
EC-115	8	16.9	135.4	33,584
EC-116	14	17.4	243.2	60,325
EC-17	14	17.4	243.2	60,325
Total				168,053

Tabla No. IV.4 Costos de operación de aerorefrigeradores

c. Ahorros

Los ahorros esperados por la implementación de esta propuesta son debidos a tres conceptos:

- Reducción de la energía eléctrica para bombeo.
- Reducción de energía eléctrica para ventiladores, debido a que al disminuir el requerimiento de agua de enfriamiento es posible sacar de operación algunas celdas de las torres del sector 1 y 7, y
- Reducción de agua de reposición y de descarga al Río Tula.

En la tabla IV.5 se presentan los ahorros esperados con esta medida.

Ahorros	CT- 500 Sector 1	CT- 503 Sector 7
AHORRO POR BOMBEO		
Ahorro de agua, GPM	18,285	11,179
Nuevo flujo de agua en la torre, GPM	30,802	97,196
Flujo de agua por bomba	16985	16987
Potencia bomba, kW	2,370.6	5,233.3
No. bombas	2	5
Flujo por bomba, GPM	15,401	19,439
Potencia por bomba, kW	745.7	880.7
Ahorro por bombeo, kW	879.2	830.0
Ahorro económico, \$Dlts/año	218,037	205,831
AHORRO EN TORRES DE ENFRIAMIENTO		
Potencia ventilador de la torre, kW	68.5	72.4
No. celdas y ventiladores fuera	2	1
Ahorro de energía, kW	137.0	72.4
Ahorro económico, \$Dlts/año	33,976	17,955
AHORRO POR CONSUMO Y DESCARGA DE AGUA		
Agua de reposición, GPM	520	341
Ahorro económico, \$Dlts/año	483,401	317,337
Descarga de agua, GPM	173	166
Ahorro económico, \$Dlts/año	22,722	21,931
Ahorro total de energía, kW	1,016.2	902.4
Ahorro económico total, \$Dlts/año	758,136	563,054

Tabla No. IV.5 Ahorros esperados por la implementación de sistemas combinados aire-agua

IV.5 Análisis económico

Ya que las propuestas de mejoramiento en torres de enfriamiento y la implementación de sistemas combinados aire-agua son independientes, el análisis económico se realizó también de manera independiente.

V.5.1 Torres de enfriamiento

La tabla IV.6 muestra la inversión requerida por las torres de enfriamiento, los beneficios esperados y los resultados del análisis de factibilidad económica de acuerdo a las ecuaciones IV.1, IV.2, IV.3 y IV.4.

Torre	Inversión	Ahorros	PRI	TIR	VPN	RBC
CT-500	47,188	34,254	1.38	67%	76,290	2.62
CT-501	42,619	35,285	1.21	78%	84,577	2.98
CT-501A	56,469	70,725	0.80	123%	198,478	4.51
CT-502	104,594	103,611	1.01	96%	268,899	3.57
Total	250,869	243,874	1.03	94%	628,244	3.50

Tabla No. IV.6 Análisis de factibilidad económica para torres de enfriamiento.

El análisis económico para la modernización de las torres de enfriamiento indica un Valor Presente Neto de 628,244 \$DlIs, (\$ 5'025,952 M.N.), Tasa Interna de Retorno de 94% (valor mayor Al costo de capital de 12%), Relación Beneficio Costo de 3,5 y Período de Retorno de la Inversión de 1.03 años. Todos estos valores indican que las propuestas de mejoramiento energético son rentables.

La selección entre las opciones 1 y 2 se realiza con el método del valor presente del incremento de la inversión, dando el siguiente resultado:

Opción 1

Inversión = 3'564,620 \$DlIs

Costos = 462,272 \$DlIs/año

Tiempo de vida útil = 5

Opción 2

Inversión = 12'000,000 \$DlIs

Costos = 616,523 \$DlIs/año

Tiempo de vida útil = 20

Incremento en Inversión = 8'435,380 \$DlIs

Incremento en Costos = 154,251 \$DlIs/año

$VPN_{2-1} = -7'283,210$ \$DlIs < 0

Por lo tanto la Opción 1 es la mejor alternativa de inversión.

V.5.2 Implementación de sistemas combinados aire-agua

La tabla No. IV.7 muestra la inversión requerida para la implementación de sistemas combinados aire-agua, los costos de operación, los beneficios esperados y los resultados del análisis de factibilidad económica.

Concepto	CT-500 Sector 1	CT-503 Sector 7	Total
Inversión en equipo	1,063,072	641,272	1,704,344
Costos de operación	107,728	60,325	168,053
Ahorro por bombeo	218,037	205,831	423,868
Ahorro por ventiladores	33,976	17,955	51,931
Ahorro en agua de reposición	483,401	317,337	800,738
Ahorro por descarga de agua	22,722	21,931	44,653
Flujo de efectivo	650,409	502,729	1,153,137
	1.6	1.3	1.5
PRI	2.21	2.83	2.44
RBC	54%	73%	62%
TIR	1,281,505	1,170,953	2,452,458
VPN (i = 12%)			

Tabla No. IV.7 Análisis de factibilidad económica para la implementación de sistemas combinados aire-agua.

El análisis económico para la implementación de sistemas combinados aire-agua indica un Valor Presente Neto de 2'452,458 \$Dlts. (\$ 19'619,664 \$ M.N.), Tasa Interna de Retorno de 62% (valor mayor al costo de capital de 12%), Relación Beneficio Costo de 2.44 y Período de Retorno de la Inversión de 1.5 años. Todos estos valores indican que las propuestas de mejoramiento energético son rentables.

IV.6 Inversiones adicionales

Adicionalmente a la medidas para ahorro de energía se tienen necesidades de mantenimiento para seguridad y para reducción de pérdidas por arrastre, las cuales no tienen afectación en la capacidad o eficiencia de las torres, pero si en la vida útil de las mismas, en la seguridad de los operadores, en la seguridad de la operación

de los equipos, en la reducción de los impactos ambientales y en la reducción de los daños a equipos vecinos.

IV.6.1 Medidas de seguridad

Las modificaciones consideradas como medidas de seguridad son:

- Cambio de la estructura en la cámara plena de las torres CT-500, CT-501 y CT-502
- Cambiar el soporte del equipo mecánico en las torres CT-500, CT-501, CT-502, CT-501A y CT-503
- Instalación de barandales protectores de pasillos centrales en las torres CT-501A, CT-503 y CT-506
- Instalar interruptores de vibración en las torres CT-501A y CT-503
- Operar los interruptores de vibración en la torre CT-506

El costo total estimado de las medidas de seguridad es de: **\$2'710,360.00**

IV.6.2 Medidas para reducción de arrastre

Las medidas propuestas para la reducción del arrastre son:

Torre CT-500

- Limpiar, reponer faltantes y rearreglar eliminadores de madera en las celdas indicadas en el reporte de inspección, para las secciones originales.
- Para las celdas adicionales, cambiar los eliminadores de PVC al tipo similar de la CT-506 o del tipo celular.

El costo estimado para las modificaciones a los eliminadores de la torre, incluyendo materiales y mano de obra, es de: **\$120,500.00 (15,063 \$DIIIs)**

CT-501

- Limpiar, reponer faltantes y rearreglar eliminadores de madera en las celdas indicadas en el reporte de inspección, para las secciones originales.
- Para las celdas adicionales, cambiar los eliminadores de PVC al tipo similar de la CT-506 o del tipo celular.

El costo estimado para las modificaciones a los eliminadores de la torre, incluyendo materiales y mano de obra, es de: **\$177,300.00 (22,163 SDIIs)**

CT-502

- Limpiar, reponer faltantes y rearreglar eliminadores de madera en las celdas indicadas en el reporte de inspección, para las secciones originales.
- Para las celdas adicionales, cambiar los eliminadores de PVC al tipo similar de la CT-506 o del tipo celular.

El costo estimado para las modificaciones a los eliminadores de la torre, incluyendo materiales y mano de obra, es de: **\$441,000.00 (55,125 SDIIs)**

Torre CT-501A

- Cambiar los eliminadores de PVC al tipo similar de la CT-506 o del tipo celular

El costo estimado para las modificaciones a los eliminadores de la torre, incluyendo materiales y mano de obra, es de: **\$583,500.00 (72,938 SDIIs)**

Torre CT-503

- Cambiar los eliminadores de PVC al tipo similar de la CT-506 o del tipo celular

El costo estimado para las modificaciones a los eliminadores de la torre, incluyendo materiales y mano de obra, es de: **\$2'106,000.00 (263,250 SDIIs)**

CT-506

Para el caso de ahorro de agua por pérdida por arrastre, no hay necesidad de realizar ningún tipo de inversión, ya que los eliminadores de arrastre de esta torre son los indicados y se encuentran en buenas condiciones.

El costo total estimado para realizar estas modificaciones es de **\$ 3'428,300.00 M.N. (428,538 \$DIs)**

V.6 Plan de Acción

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la importancia que cada aspecto tiene en el mejoramiento energético de los sistemas de enfriamiento de la Refinería "Miguel Hidalgo", a continuación se presenta la propuesta del plan de acción para llevar a cabo las medidas y modificaciones en plantas de proceso, torres de enfriamiento y equipos de transferencia de calor, en función de su aplicabilidad y de la inversión que implique.

- 1º. Llevar a cabo las modificaciones sin inversión a las torres de enfriamiento, indicadas en el punto 2.9.
- 2º. Parar secuencialmente ventiladores de las torres, hasta ajustar las condiciones de operación requeridas, de acuerdo a los resultados del ahorro en energía eléctrica mostrado en la tabla IV.1.
- 3º. Instalar placas de orificio en las líneas de agua de enfriamiento que lo requieran, de acuerdo al reporte de la simulación hidráulica de las plantas de proceso (ver punto 2.6.B). Estas medidas solucionarán los problemas de operación en las plantas de proceso al mantener las condiciones de operación en enfriadores y condensadores de acuerdo al diseño.
- 4º. Seleccionar una celda de cada una de las torres CT-503 y CT-506, y realizar las pruebas de comportamiento previas a las modificaciones con inversión.

- 5°. Llevar a cabo las modificaciones con inversión sugeridas en el punto 2.10, a las celdas seleccionadas.
- 6°. Realizar nuevamente las pruebas de comportamiento a las celdas modificadas y calcular la nueva capacidad.
- 7°. De acuerdo a los resultados de las pruebas de comportamiento a la nueva capacidad de las torres de enfriamiento, llevar a cabo las modificaciones con inversión en el resto de las celdas de las torres CT-503 y CT-506. De igual manera, realizar las modificaciones requeridas por las torres CT-500, CT-501, CT-502 y CT-501A para llevarlas a su máxima capacidad.
- 8°. Realizar la sustitución de los equipos de tubos y envolvente a sistemas combinados aire-agua, de acuerdo a lo mencionado en el punto 2.6 C, ya que esto daría un ahorro sustancial de agua de enfriamiento.
- 9°. Implementar las medidas de seguridad en todas las torres de enfriamiento.

Con este plan de acción se podrá mantener trabajando el sistema de agua de enfriamiento con una buena eficiencia, con una capacidad mayor de enfriamiento y con alta seguridad durante su operación.

CAPITULO V
CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al análisis energético realizado al sistema de agua de enfriamiento de la Refinería "Miguel Hidalgo", es posible reducir el consumo energético en 17'864,440 kW-h/año y el consumo de agua de reposición en 1,189 GPM (570'720,000 GPA), mediante la reparación y modernización de las torres de enfriamiento, la redistribución del agua de enfriamiento a plantas de acuerdo al diseño, la racionalización del uso del agua como medio de enfriamiento con la implementación de sistemas combinados aire-agua, así como con el aumento en la calidad del agua con tratamientos químicos que permitan incrementar sus ciclos de concentración en el sistema.

En las torres de enfriamiento se encontró que al realizar medidas correctivas y de modernización en el sistema de distribución de agua caliente, empaque y distribución de aire, con una inversión estimada en 1'142,024 \$DlIs pueden ahorrarse 14'929,600 kW-h/año equivalentes a 462,809 \$DlIs/año obteniéndose una disponibilidad adicional de agua de enfriamiento para la operación de plantas futuras o el "revamp" de plantas existentes de 138,800 GPM, con lo cual puede evitarse la adquisición de una torre de enfriamiento de 140,000 GPM, con un costo estimado de 12'000,000 \$DlIs. La tasa interna de retorno obtenida para estas modificaciones es de 29%, es decir 17 puntos porcentuales arriba del costo de Capital, con un tiempo de retorno de la inversión de 1.03 años, lo que indica un proyecto altamente rentable.

En cuanto al sistema de distribución de agua fría, es posible ajustar los flujos de agua a los requerimientos de diseño colocando placas de orificio o cualquier otro instrumento controlador de flujo, que ayuden a lograr la distribución de diseño, eliminando los sobreflujos que actualmente se aplican, considerando para esta medida una inversión mínima. Los ahorros esperados con esta medida son: ahorro de energía de 1'784,000 kW-h/año, ahorro en agua de reposición de 199 GPM y

ahorro en flujo descargado al Río Tula de 65 GPM, que representan un ahorro económico de 249'112 \$DlIs/año.

Así mismo, es posible racionalizar el uso del agua de enfriamiento utilizando sistemas combinados aire-agua en cuatro servicios de enfriamiento, logrando la reducción de 520 GPM de agua de reposición, 341 GPM de descarga de agua al Río Tula, 1'675,200 kW-h/año en costos de operación en torres de enfriamiento y 13'673,600 kW-h/año en bombeo de agua, lo cual genera un ahorro de 758,136 \$DlIs/año. La inversión estimada para la implementación de esta medida es de 1'704,344 \$DlIs, con una tasa interna de retorno de 61.5 % y tiempo de retorno de la inversión de 1.5 años, resultando en una propuesta de inversión atractiva.

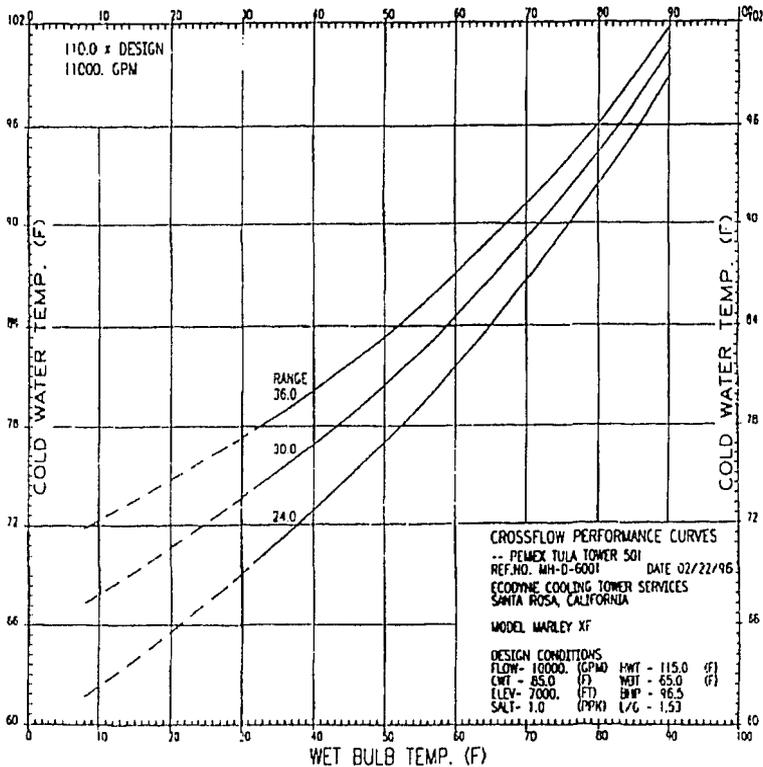
Por último, es posible reducir en 129 GPM el consumo de agua de reposición mejorando el tratamiento actual del agua, con lo cual se pueden incrementar los ciclos de concentración en el sistema de 2.9 a 3.3. El costo del tratamiento propuesto es similar al utilizado actualmente, obteniendo el beneficio adicional de la reducción del flujo de descarga en 129 GPM, esta medida tiene un ahorro económico total estimado en 136,900 \$DlIs/año

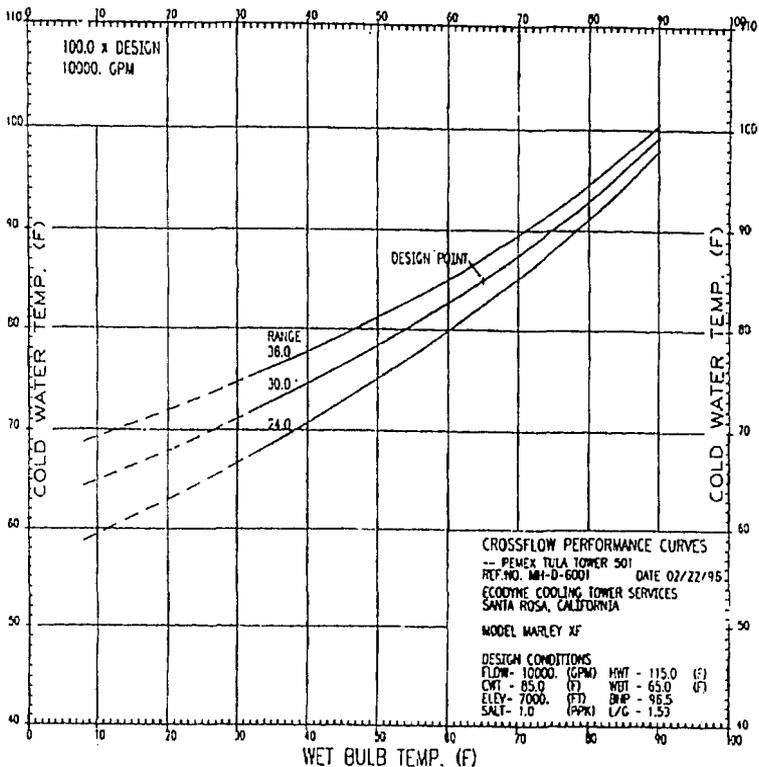
Debido a las oportunidades de ahorro de energía, a la disminución y racionalización en el consumo de agua encontrados en este estudio, se recomienda llevar a cabo el plan de acción propuesto.

Las conclusiones que arroja este estudio dan una muestra clara de los ahorros, cualitativos y cuantitativos, tan importantes que se pueden lograr con acciones encaminadas al uso racional de la energía y del agua. El agua como recurso natural cada vez más escaso y caro, debe ser un factor fundamental en la administración de recursos, por lo que se recomienda ampliamente realizar este tipo de estudios en cualquier instalación industrial y tomarse en cuenta para futuros proyectos de Ingeniería. Se exhorta a los estudiantes de Ingeniería Química de la Facultad de Química y a los profesionistas de esta carrera, a encaminar sus esfuerzos en este tipo de proyectos.

ANEXO 1

Prueba de Comportamiento





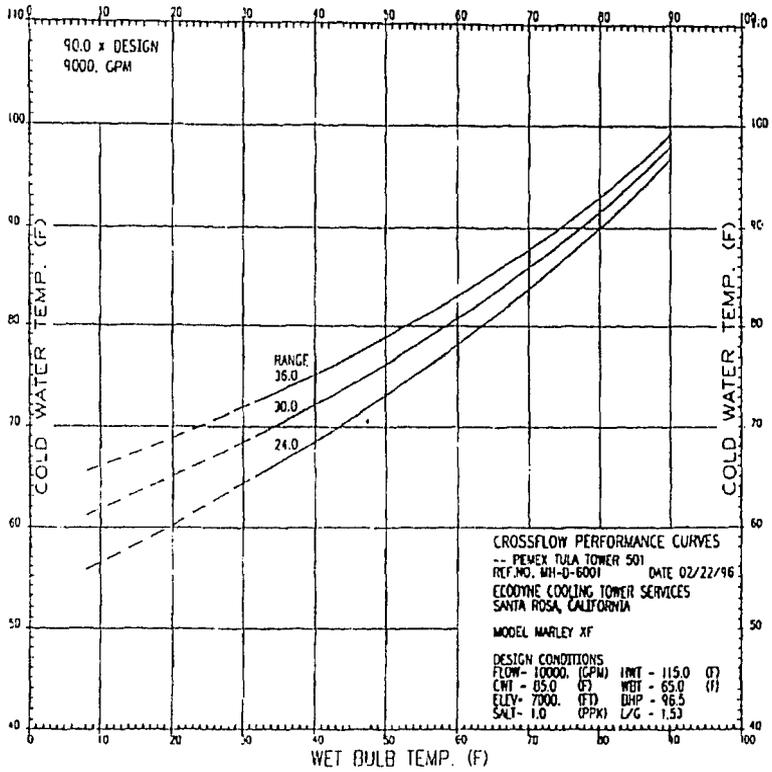
LIMITS OF PERFORMANCE GUARANTEE SHALL BE AS FOLLOWS UNLESS OTHERWISE AGREED BY BOTH PARTIES-

1) WATER FLOW RATE-FROM 90 # THROUGH 110 # OF DESIGN CAP.

2) INLET NET DRAIN TEMPERATURE-FROM 150°F BELOW THROUGH 150°F ABOVE DESIGN

3) HEAT LOAD-FROM 20 # BELOW THROUGH 20 # ABOVE DESIGN

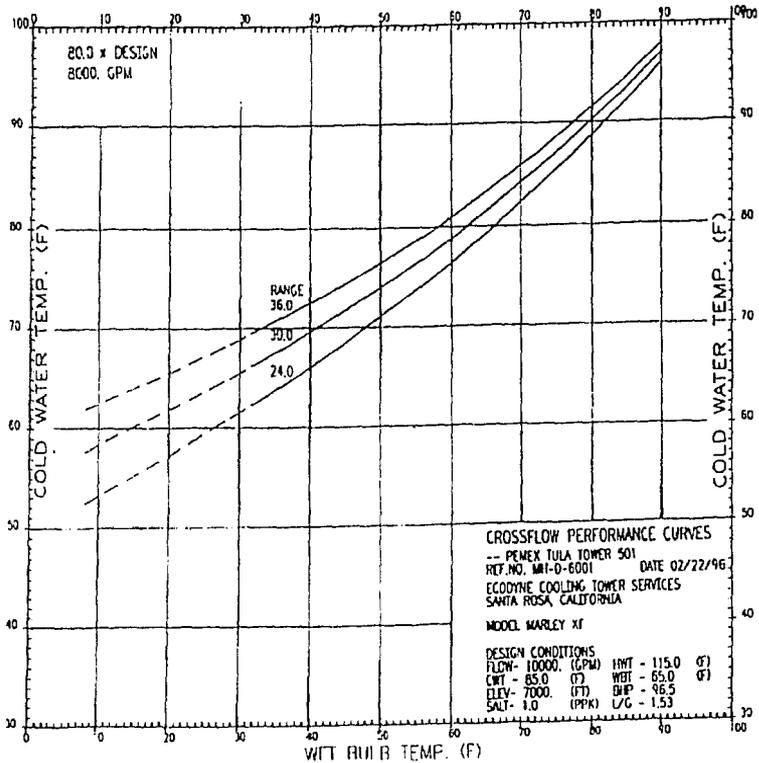
4) TEST CONDUCTED DURING CALM OR FAVORABLE WINDS.



TEL: 714 345-9118

TEL: 714 345-9118

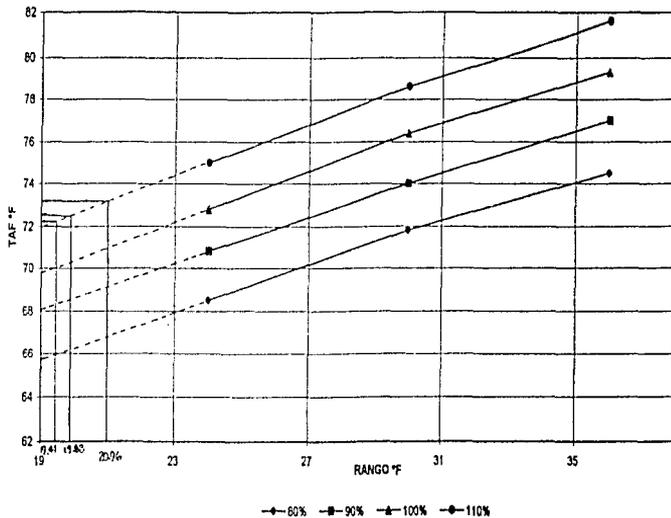
P. 004



DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE AGUA FRIA PARA EL RANGO DE PRUEBA

TORRES CT-500, CT-501 Y CT-502

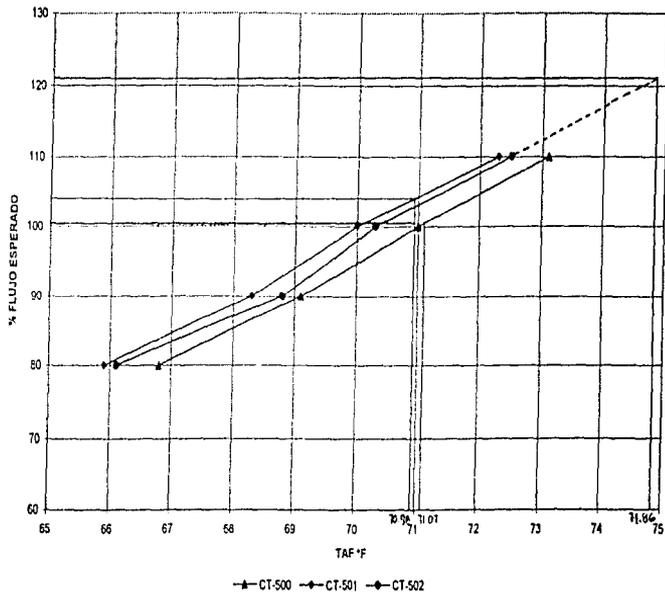
GRAFICA DE RANGO vs TAF

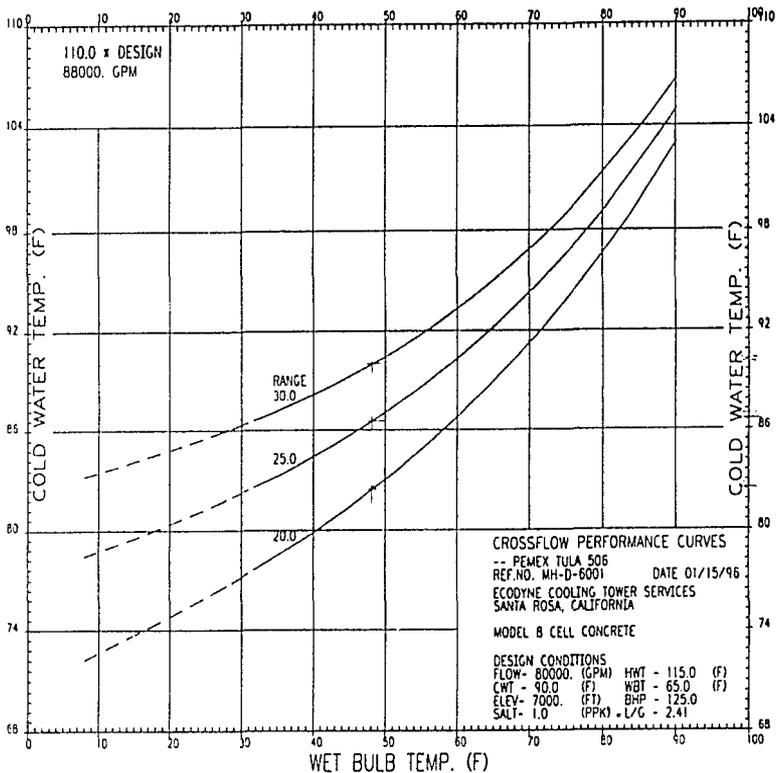


DETERMINACION DEL % DE FLUJO ESPERADO PARA LA TEMPERATURA DE AGUA FRIA DE LA PRUEBA

TORRES CT-500, CT-501 Y CT-502

GRAFICA DE TAF vs % FLUJO ESPERADO





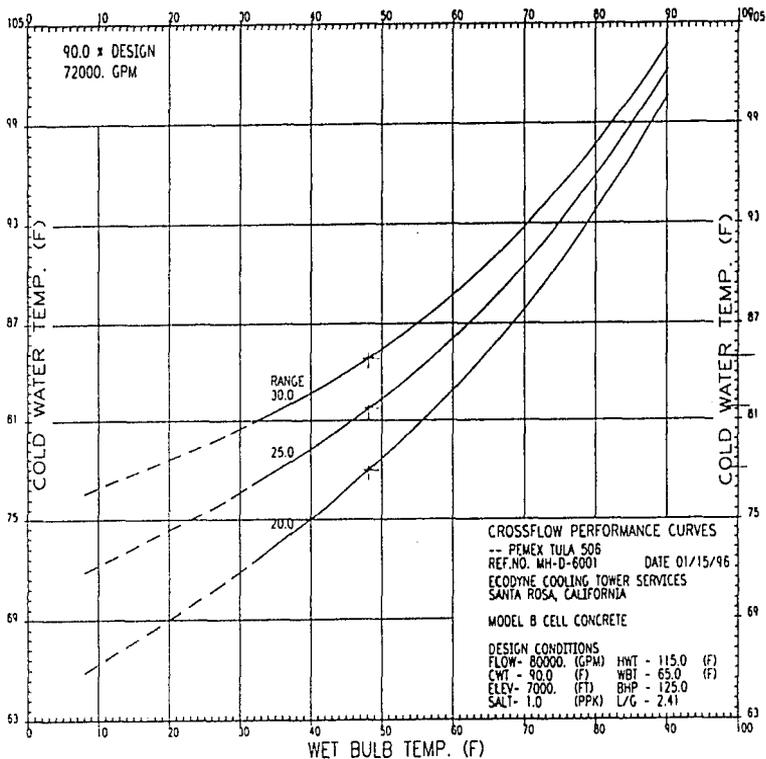
LIMITS OF PERFORMANCE GUARANTEE SHALL BE AS FOLLOWS UNLESS OTHERWISE AGREED BY BOTH PARTIES--

1) WATER FLOW RATE-FROM 90 ± THROUGH 110 ± OF DESIGN GPM.

2) WET BULB TEMPERATURE-FROM 15(F) BELOW THROUGH 15(F) ABOVE DESIGN

3) HEAT LOAD-FROM 20 ± BELOW THROUGH 20 ± ABOVE DESIGN.

4) TEST CONDUCTED DURING CALM OR FAVORABLE WINDS.



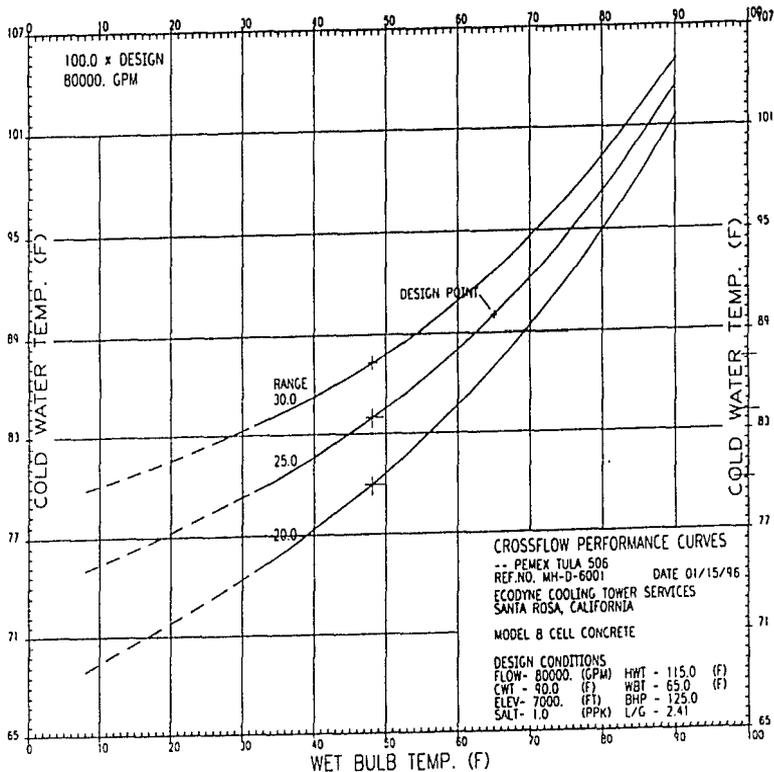
LIMITS OF PERFORMANCE GUARANTEE SHALL BE AS FOLLOWS UNLESS OTHERWISE AGREED BY BOTH PARTIES-

1) WATER FLOW RATE FROM 90 ± THROUGH 110 ± OF DESIGN. GPM.

2) INLET WET BULB TEMPERATURE FROM 15°F BELOW THROUGH 15°F ABOVE DESIGN.

3) HEAT LOAD FROM 20 ± BELOW THROUGH 20 ± ABOVE DESIGN.

4) TEST CONDUCTED DURING CALM OR FAVORABLE WINDS.



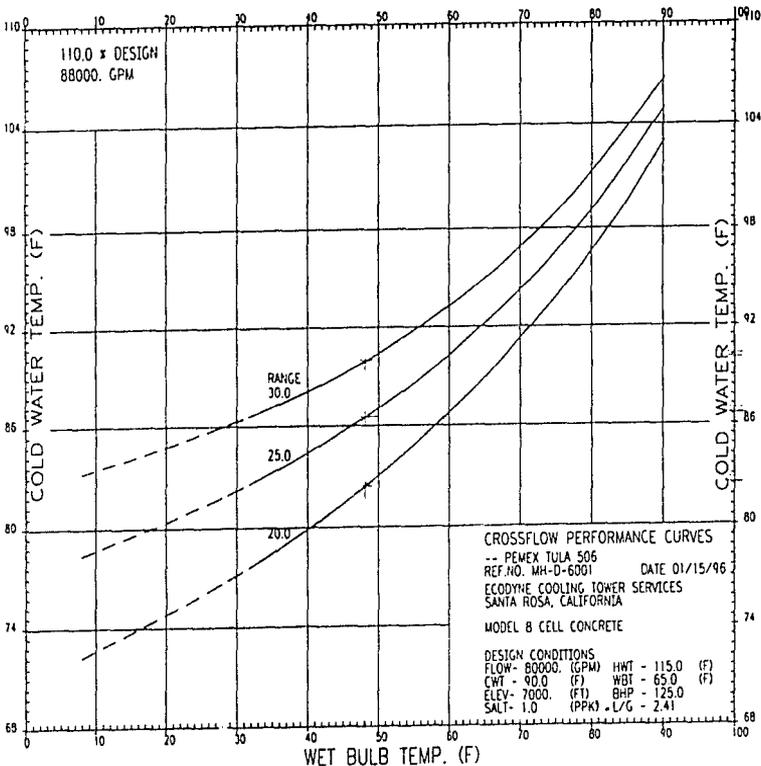
LIMITS OF PERFORMANCE GUARANTEE SHALL BE AS FOLLOWS UNLESS OTHERWISE AGREED BY BOTH PARTIES-

1) WATER FLOW RATE-FROM 80 x THROUGH 110 % OF DESIGN. GPM

2) INLET WET BULB TEMPERATURE-FROM 15(F) BELOW THROUGH 15(F) ABOVE DESIGN.

3) HEAT LOAD-FROM 20 % BELOW THROUGH 20 % ABOVE DESIGN.

4) TEST CONDUCTED DURING CALM OR FAVORABLE WINDS.



LEVELS OF PERFORMANCE GUARANTEE SHALL BE AS FOLLOWS UNLESS OTHERWISE AGREED BY BOTH PARTIES-

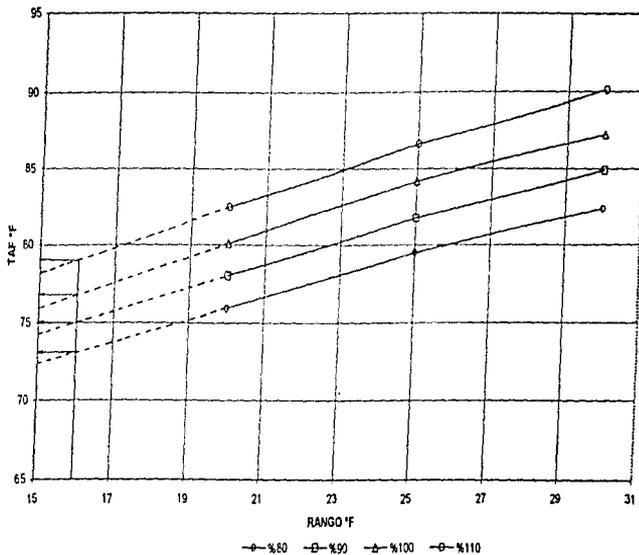
- 1) WATER FLOW RATE-FROM 90 ± THROUGH 110 ± OF DESIGN. GPM.
- 2) INLET WET BULB TEMPERATURE-FROM 1.5°F BELOW THROUGH 1.5°F ABOVE DESIGN.

- 3) HEAT LOAD-FROM 20 ± BELOW THROUGH 20 ± ABOVE DESIGN.
- 4) TEST CONDUCTED DURING CALM OR FAVORABLE WINDS.

DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE AGUA FRIA PARA EL RANGO DE PRUEBA

TORRE CT-506

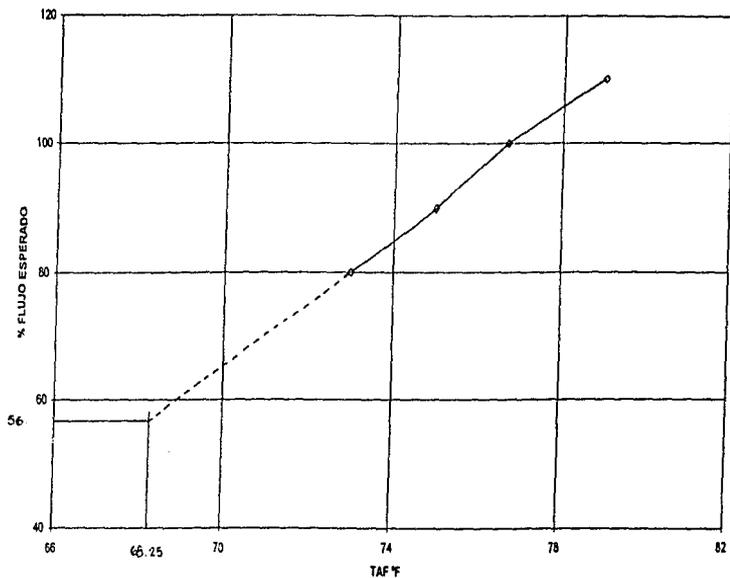
GRAFICA DE RANGO vs TAF



DETERMINACION DEL % DE FLUJO ESPERADO PARA LA TEMPERATURA DE AGUA FRIA DE LA PRUEBA

TORRE CT-506

GRAFICA DE TAF vs % FLUJO ESPERADO



BIBLIOGRAFIA

1. Curso de Conservación y Ahorro de Energía, Instituto Mexicano del Petróleo, 1993.
2. Diplomado de Administración y Ahorro de Energía, Módulo I, II y VII, Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía-Universidad Autónoma Metropolitana, México, 1992.
3. Balance Nacional de Energía, 1996.
4. HAUGLAND, T. "Social Benefits of Financial Investment Support in Energy Conservation Policy", 16th Congress Tokyo '95.
5. OSORIO, B. M. A., MALDONADO, M. J. M., "Intercambiadores de envolvente y placas: un ejemplo de desarrollo en tecnologías de transferencia de calor para el uso eficiente de la energía", Monitoreo Tecnológico, México D. F., 1996.
6. Estudios de posicionamiento del Sistema Nacional de Refinación llevados a cabo por la compañía Solomon Ass. Inc.
7. BAUER, E. M., García-Colin S. L., "Energía en México en el arranque del siglo XXI, Realidades y opciones", Programa Universitario de Energía/UNAM, 1989.
8. REYNOLDS, W. C., PERKINS, H. C. "Ingeniería Termodinámica", Mc Graw Hill, México D. F. 1980.
9. Instructions for energy auditors, Department of Energy, 1982.
10. Diplomado de ahorro y conservación de la energía en plantas de proceso, Módulo I. Conceptos básicos sobre ahorro y uso eficiente de energía y fundamentos de Ingeniería Económica, y Módulo V. Auditorías Energéticas, México, D. F., 1996.
11. DELMAR, S. A., Torres, G. R. Curso: "Diagnósticos Energéticos Industriales" ATPAE-FIDE, México, D.F.
12. HERBERT, P. R. "Elementos de apoyo a la Administración de Energía con base en las Auditorías Energéticas", México, D. F., 1993.
13. HAIMES, Y. Y. "Energy auditing and conservation", Hemisphere Publishing Co. USA, 1982.
14. BURGER, R., "Modernize your Cooling Tower", Chemical Engineering, Sep. 1990
15. Manual del Agua. Nalco Chemical Company, McGraw-Hill, 1990.
16. "Curso de transferencia de calor" Tomo IV, Instituto Mexicano del Petróleo.
17. Curso de torres de enfriamiento. Instituto Mexicano del Petróleo, México D. F., 1984.

18. Cheremisinoff N. P., Cheremisinoff P. N., "Cooling Towers selection, design and practice", Ann Arbor Science, 1981.
19. "Cooling Tower Institute Handbook", Cooling Tower Institute.
20. BAKER, D. "Cooling Tower Performance", Chemical Publishing Co. USA, 1984.
21. TREYBAL, R. E. "Operaciones de Transferencia de Masa", McGraw-Hill. México, 1989.
22. KERN, D. "Transferencia de Calor", McGraw-Hill, New York 1980.
23. "Heat Exchanger Design Handbook; 1 Heat exchanger theory", Hemisphere Publishing Corporation, Washington
24. Curso de Transferencia de Calor. Instituto Mexicano del Petróleo. México D. F., 1988.
25. Standards of the tubular Exchanger Manufacturers Association, seventh edition, Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc., New York, 1988.
26. Manual de Aeroenfriadores, Instituto Mexicano del Petróleo, México D. F. 1990.
27. AGUILAR, P. A. Tesis: Selección del Equipo de Condensación de Vapor en Plantas de Potencia. México D. F., 1986.
28. LEAL, E. I., Tesis: Integración Térmica del Proceso de Destilación Primaria, México D. F., 1996.
29. KNUDSEN, J. G., "Coping with Cooling Water Fouling in Tubular Heat Exchangers" Heat Transfer No. 269, Vol 85. Philadelphia, 1989.
30. Boletín informativo, Servical Mexicana S. A. de C. V., México D. F. 1997.
31. Boletín informativo, Oakite Products, Inc.
32. Input Manual INPLANT, Simulation Sciences Inc. USA, 1994.
33. STREETER, V. L. "Mecánica de Fluidos", Octava edición, Mc Graw Hill, México, 1987.
34. OSORIO, B. M. A., ORTEGA, L. F., Curso: Conservación de Energía.
35. VAN HORNE J. C., "Fundamentos de Administración Financiera" Sexta Edición, Prentice Hall, México 1989.
36. GUTHRIE, K. M., "Capital Cost Estimating", Chemical Engineering, March 24, 1969.
37. Japan Energy Conservation handbook", The Energy Conservation Center, Japan, 1994/1995.
38. SMEATON, R. W., "Motores Eléctricos" Tomo I, 2ª Edición, McGraw-Hill, 1990.