

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR  
PDVSA PETROPIAR”**

**Realizado por:  
YEGLYS DEL VALLE ELMERIDA SUCRE**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD  
DE ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Barcelona, Febrero de 2008**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR  
PDVSA PETROPIAR”**

**ASESORES**

---

**Ing. Mecánico Simón Bittar**  
**Asesor Académico**

---

**Ing. Mecánico Luis Pereira**  
**Asesor Industrial**

**Barcelona, Febrero de 2008**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR  
PDVSA PETROPIAR”**

**JURADO**

**El jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:**

**A P R O B A D O**

---

**Ing. Mecánico Simón Bittar**  
**Asesor Académico**

---

**Mecánico Henry Espinoza**  
**Jurado Principal.**

---

**Ing. Mecánico Melchor Ledezma**  
**Jurado Principal**

**Barcelona, Febrero de 2008**

## RESOLUCIÓN

*De acuerdo a Artículo 44 del Reglamento de Trabajos de Grado:*

*“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”*

## **DEDICATORIA**

En primer lugar y de gran manera le dedico el alcance de esta meta a Dios por estar conmigo en todo momento, por llevarme de la mano en cada etapa de mi vida, por dame sabiduría e inteligencia para avanzar en cada fase de mis estudios y por ayudarme a superar las dificultades que con frecuencia surgen y forman parte de la vida de todos.

A Yeglys Sucre, mi madre, por ser la persona que me moldeó desde mis primeros pasos, me acompaña y me acompañara en todas las etapas que he vivido y las que me faltan por vivir.

A mis padres, Domingo Elmerida y Vicente Miranda, por el amor y cariño recibido en todo momento.

A mis hermanos y hermanas por demostrarme que están conmigo y puedo contar con ellos.

A mis hermanos menores, Deneisis y Kevin, por llenarme de ese amor familiar el cual es el combustible necesario para seguir adelante hasta demostrarnos a uno mismo que esforzarse por los sueños tienen sus beneficios.

A mis sobrinos Ángel y Ányel, por ponerle ese color característico de la inocencia infantil a los días en el que el agitado ritmo de la vida actual satura la mente de cualquiera persona.

Finalmente pero no menos importantes a la vida, la perseverancia, la energía para hacer las actividades necesarias para culminar con éxito cada día regalado por nuestro padre celestial.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, porque gracias a el estamos en este mundo y aunque a veces sentimos que son duras o muy seguidas las pruebas el siempre estará con nosotros.

A mi familia por apoyarme incondicionalmente.

A la Universidad de Oriente y en especial al departamento de Ingeniería Mecánica por haberme abierto sus puertas y formarme académicamente.

Al mejorador PDVSA Petropiar por permitirme la realización de mi trabajo de grado en sus instalaciones, culminando así con los requisitos exigido para la obtención de mi título y al mismo tiempo regalarme mi primera experiencia laboral.

A todas las personas que laboran dentro de las instalaciones del mejorador PDVSA Petropiar que de una u otra manera me dieron una mano amiga ayudándome en la recolección de la información necesaria para la realización de este trabajo. Entre ellas puedo nombrar a: Yulieth García, Mariela Camero, Josué Mardelli, William Ruiz, Richard Rondón, Alejandro Jiménez, Luís Pereira, Rafael Ramos, Francisco Castro, Jesús W., Cecilia Sánchez, Rosa Cañas, el sr. Jesús, Octavio, Carlos Pérez, Ana Torrealba, Maryeris, al personal de equipos especiales (por garantizarme la funcionalidad de los equipos empleados en la recolección de los parámetro evaluados en este estudio), a todo el personal de mantenimiento y operaciones de los distintos fit de todo el mejorador

A todos mis compañeros de carrera del departamento de Ingeniería Mecánica y muy especialmente a mi grupo de estudios formado por: Nayiber Rojas, Denismar Zabala, Héctor Mariño, Ronald Molinet, Alberto Moreno, y por supuesto a mi compañero de liceo y universidad Ángel Boada.

A mi amigo Oswaldo Farfán por aportar ese grano de arena y darme ese voto de confianza, apoyo y solidaridad en los momentos de mi vida que más lo necesitaba.

MUCHAS GRACIAS A TODOS...

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó la evaluación del sistema de enfriamiento de agua del mejorador de crudo extra pesado PDVSA Petropiar, dicho estudio permitió evidenciar las condiciones de funcionamiento actuales de sus principales componentes como lo son: la torre de enfriamiento, los intercambiadores de calor, el sistema hidráulico, los filtros y sistemas de inyección de químicos. Paralelamente a la evaluación del sistema se creó una herramienta de seguimiento del desempeño de la funcionalidad de los intercambiadores de calor la cual será muy útil a la hora de seleccionar cuáles son los equipos que requieran intervención. La base de la evaluación del sistema de enfriamiento fue la comparación de las actuales condiciones operacionales de los equipos antes mencionados (estos valores fueron tomados por medio de equipos especiales en la planta y en otros casos generados por la herramienta de seguimiento que forma parte de este trabajo) con las de diseño, las diferencias encontradas entre ambas datas permitió poner en manifiesto el estado de cada equipo. De la evaluación hecha al sistema de enfriamiento se obtuvo que de los 66 intercambiadores evaluados 11 resultaron críticos (basados en la velocidad del agua y en la temperatura de piel de tubo) al igual que el intercambiador 10-E-012 por llevar el agua por la carcasa y los 65-E-001-A y 65-E-001-B por ser de placas. La herramienta de seguimiento también generó una lista de los equipos que en la actualidad realizan su labor pero están en estado de alerta. La torre de enfriamiento, sistema hidráulico, filtros y sistema de inyección de químicos se encuentran operando en buenas condiciones.

## NOMENCLATURAS

$A$  = Área de transferencia de calor, (m<sup>2</sup>)

$A_i$  = Área de transferencia de calor interna, (m<sup>2</sup>)

$A_o$  = Área de transferencia de calor externa, (m<sup>2</sup>)

$C_f$  = Calor específico del fluido frío a presión constante, (J/Kg. °K).

$C_c$  = Calor específico del fluido caliente a presión constante, (J/Kg. °K).

$F$  = Factor de corrección de LMTD, (adimensional)

$h_c$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido caliente, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$h_f$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido frío, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$h_i$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido interno, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$h_o$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido externo, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$k$  = Conductividad del material de la pared, (watt/m°K)

$L$  = Longitud del tubo (m).

LMTD = Temperatura media logarítmica (°K).

$\dot{m}_f$  = Flujo másico del fluido frío, (Kg. /s).

$\dot{m}_c$  = Flujo másico del fluido caliente, (Kg. /s).

$P$  = Razón entre la ganancia de temperatura del fluido frío y la máxima diferencia de temperatura en el intercambiador de calor, (adimensional).

$Q$  = Razón de calor, (watt).

$Q_f$  = Calor absorbido por el fluido frío, (watt).

$Q_c$  = Calor entregado por el fluido caliente, (watt).

$R$  = Razón entre la caída de temperatura del fluido caliente y la ganancia de temperatura del frío, (adimensional).

$R_f$  = Factor de impureza en superficies de transferencia de calor, (m<sup>2</sup>°K/ watt)

$r_o$  = Radio exterior del tubo (m).

$r_i$  = Radio interno del tubo, (m)

$T_{s,f}$  = Temperatura de salida del fluido frío, (°K).

$T_{e,f}$  = Temperatura de entrada del fluido frío, (°K).

$T_{e,c}$  = Temperatura de entrada del fluido frío, (°K).

$T_{s,c}$  = Temperatura de salida del fluido frío, (°K).

$T_1$  = Temperatura del fluido exterior, (°K).

$T_o$  = Temperatura de la superficie exterior del tubo, (°K).

$T_i$  = Temperatura de la superficie interior del tubo, (°K).

$T_2$  = Temperatura del fluido interior, (°K).

$t$  = Espesor de la pared, (m)

$U$  = Coeficiente de transferencia de calor total, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$U_{impuro}$  = Coeficiente de transferencia de calor tota, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$U_{limpio}$  = Coeficiente de transferencia de calor total, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$\varepsilon$  = Eficiencia de los intercambiadores, (adimensional)..

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura. (°K).

# ÍNDICE GENERAL

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
RESUMEN.....	viii
NOMENCLATURAS .....	ix
ÍNDICE GENERAL.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
CAPÍTULO 1 .....	19
INTRODUCCIÓN .....	19
1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA .....	19
1.1.1 Ubicación geográfica.....	19
1.1.2 Reseña Histórica.....	19
1.1.3. Visión del Mejorador PDVSA Petropiar.....	21
1.1.4. Misión del Mejorador PDVSA Petropiar .....	21
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
1.3 OBJETIVOS .....	24
1.3.1 General:.....	24
1.3.2 Específicos: .....	25
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	25
CAPÍTULO 2 .....	27
MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 ANTECEDENTES.....	27
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	27
2.2.1 Proceso de Refrigeración .....	27
2.2.2 Procesos de Enfriamiento del Agua .....	28
2.2.3 Torre de Enfriamiento .....	31
2.2.4 Procesos de Transferencia de Calor .....	42

2.2.5 Intercambiadores de Calor .....	43
CAPÍTULO 3 .....	61
MARCO METODOLÓGICO .....	61
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	61
3.2 METODOLOGÍA APLICADA .....	61
3.3 POBLACIÓN .....	62
3.4 MUESTRA .....	62
3.5 ALCANCE .....	63
CAPÍTULO 4 .....	64
DESARROLLO DEL TRABAJO .....	64
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR PDVSA PETROPIAR .....	64
4.1.1 Torre de Enfriamiento .....	65
4.1.2 Intercambiadores de Calor .....	67
4.1.3 Bombas de Agua de Enfriamiento .....	67
4.1.4 Filtros de Corriente Lateral Multimedia .....	68
4.1.5 Sistemas de Inyección de Químicos .....	68
4.1.6 Variables del Proceso y Reacciones Químicas .....	69
4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLES DEL PROCESO .....	70
4.2.1 Control de Nivel y Bombas del Agua de Enfriamiento .....	70
4.2.2 Control del Ventilador y Paro de Vibración de la Torre de Enfriamiento .	71
4.2.3 Distribución del Agua de Enfriamiento del Mejorador PDVSA Petropiar	71
4.2.4 Calidad del Agua de Enfriamiento .....	76
4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS EQUIPOS QUE FORMAN PARTE DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA DEL MEJORADOR PDVSA PETROPIAR .....	79
4.3.1. Levantamiento de la Ubicación en Planta de los Intercambiadores de Calor en Estudio .....	80
4.3.2 Recolección de Datos de Diseño de los Equipos Evaluados .....	82
4.3.3 Recolección de Datos de Operación .....	82

4.3.4 Diseño de Hoja Para la Recolección de Datos en Intercambiadores de Calor .....	83
4.3.5 Diseño de Herramienta para Evaluar el Funcionamiento de los Intercambiadores de Calor .....	84
4.3.6 Criterios Utilizados para Evidenciar Desviaciones del Funcionamiento de los Intercambiadores de Calor.....	87
4.3.7 Pruebas y Evaluaciones Asociadas a la Torre de Enfriamiento .....	89
CAPÍTULO 5 .....	90
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	90
5.1 Torre de Enfriamiento .....	90
5.1.1 Análisis de Laboratorios Efectuados al Agua de la Torre de Enfriamiento .....	94
5.2 Intercambiadores de Calor Críticos.....	97
5.3 Herramienta de Seguimiento del Desempeño de los Intercambiadores de Calor .....	101
CONCLUSIONES .....	113
RECOMENDACIONES .....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	115
Bibliografía Citada .....	115
Bibliografía Adicional.....	129
ANEXOS.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
APÉNDICE A .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO: .....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Partes generales de una torre de enfriamiento	33
Figura 2.2 Idealización del sistema de enfriamiento	36
Figura 2.3 Sistema de enfriamiento directo	39
Figura 2.4 Sistema de enfriamiento indirecto	39
Figura 2.5 Torre de enfriamiento de tiro natural	40
Figura 2.6 Nomenclatura TEMA, para diferentes intercambiadores de calor	45
Figura 2.7 Intercambiador de Doble tubo	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.8 Intercambiador de doble tubo de flujo paralelo	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.9 Intercambiador de doble tubo de flujo contracorriente	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.10 Partes de un Intercambiador de carcasa y tubo	49
Figura 2.11 Intercambiador de carcasa y tubo (circulares).	50
Figura 2.12 Intercambiadores de aletas circulares	50
Figura 2.14 Intercambiadores de aletas longitudinales	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 2.15 Esquema de la transmisión de calor a través de una pared plana	54
Figura 2.16 Transferencia de calor por medio de las paredes de un tubo	55
Figura 4.1 Esta figura muestra como están distribuidos cada intercambiador en el mejorador PDVSA Petropiar, las líneas y flechas indican el suministro de agua de enfriamiento desde que sale de la torre	81
Figura 4.4 Muestra de las gráficas generadas para la fácil interpretación de los resultados. Las líneas rojas corresponden a los valores de diseño mientras que las azules a los valores reales (los cuales en algunos casos fueron recogidos mediante la utilización de equipos y en otros casos fueron calculados).	87
Figura 5.1 En esta parte de la herramienta de seguimiento se muestran todos los intercambiadores que pertenecen a una misma unidad	103

Figura 5.2 Esta es la hoja de cálculo que se preparo para cada intercambiador a evaluar 104

Figura 5.3 Continuación de la hoja de cálculo que se preparo para cada intercambiador 105

Figura 5.4 Gráficas generadas por la herramienta de seguimiento 106

Figura 5.5 Gráficas generadas por la herramienta de seguimiento 107

Figura 5.6 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento. 108

Figura 5.7 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento. 109

Figura 5.8 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento 110

Figura 5.9 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento. 111

Figura 5.10 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento 112

Figura A.1. Ubicación geográfica del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error!**

**Marcador no definido.**

Figura A.2. En el recuadro verde de esta figura se muestra la ubicación de la torre de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.3. Torre de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error!**

**Marcador no definido.**

Figura A.4. Torre de enfriamiento, filtro y productos químicos del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.5 Arreglo hidráulico del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.6. Arreglo hidráulico del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.7. Filtros del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.8. Filtros del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.9. Inyectores de productos químicos del sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.10. Intercambiadores de calor de carcasa y tubo **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A.11. Banco de Intercambiadores. Fuente **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A-1.1 Medidor de flujo ultrasónico que se emplea en la recolección de los valores de los caudales manejados en los intercambiadores de calor **¡Error! Marcador no definido.**

Figura A-1.2 Instrumento utilizado para medir la temperatura (pirómetro) en los equipos evaluados. **¡Error! Marcador no definido.**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Impurezas comunes en el agua.....	29
Tabla 2.2 Algunos parámetros operacionales que se miden con frecuencia en un sistema de enfriamiento.....	41
2.2.5.5.1 Coeficiente de Transferencia de Calor Total.....	54
2.2.5.5.2 Factor de Impureza Para Superficies de Transferencia de Calor .....	56
2.2.5.5.3 Intercambiadores de Calor de Pasos Múltiples .....	57

Tabla 4.1 Distribución del agua de enfriamiento.....	72
Tabla 4.2 Características de aguas de rechazo del sistema de osmosis inversa..	76
Tabla 4.3 Condiciones y especificaciones de calidad y operación del agua para servicios industriales .....	77
Tabla 4.4 Requerimientos del agua de enfriamiento.....	78
Tabla 4.5 Muestra de valores de caudales y temperaturas (reales) en intercambiadores de calor.....	84
Tabla 5.1 Esta tabla muestra las actividades realizadas a la torre de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo. ....	92
Tabla 5.2 Esta tabla muestra las actividades realizadas a las cuatro bombas que forman parte del sistema de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo .....	93
Tabla 5.3 Esta tabla muestra las actividades realizadas a los filtros que forman parte del sistema de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo.....	94
Tabla 5.4 En esta tabla se muestra los resultados de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento desde el 5 de agosto de 2008 hasta el 2 de septiembre de 2008.....	95
Tabla 5.5 En esta tabla se muestra los resultados de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento desde el 9 de septiembre de 2008 hasta el 7 de octubre de 2008 (continuación de la Tabla 5.4). .....	96
Tabla 5.6 Esta tabla muestra los valores promedios de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento con la finalidad de tener un solo valor comparativo por cada parámetro evaluado.....	96
Tabla 5.7 Muestra los equipos que resultaron críticos una vez terminada la recolección de los valores de los parámetros operacionales en la planta y su posterior comparación con los valores de diseño de cada uno.....	98
Tabla 5.8. Intercambiadores propensos a criticidad por manejan velocidades cercanas a los límites recomendados.....	99

Tabla 5.9. Intercambiadores que no presentaron accesibilidad para tomar mediciones del caudal de agua.....	100
Tabla 5.10. Intercambiadores que poseen alta demanda calórica pero que todavía no son críticos .....	101
Tabla B.1 Valores de caudales y temperaturas (reales) en intercambiadores de calor.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA**

#### **1.1.1 Ubicación geográfica**

PDVSA Petropiar se encuentra ubicada en el estado Anzoátegui en el Complejo Petrolero, Petroquímico e Industrial Jose Antonio Anzoátegui (sector Jose entre Barcelona y Puerto Píritu) limitando al norte con Pequiven, al sur con la autopista Barcelona – Puerto Píritu, al oeste con una zona baldía y al oeste con PDVSA Petromonagas.

#### **1.1.2 Reseña Histórica**

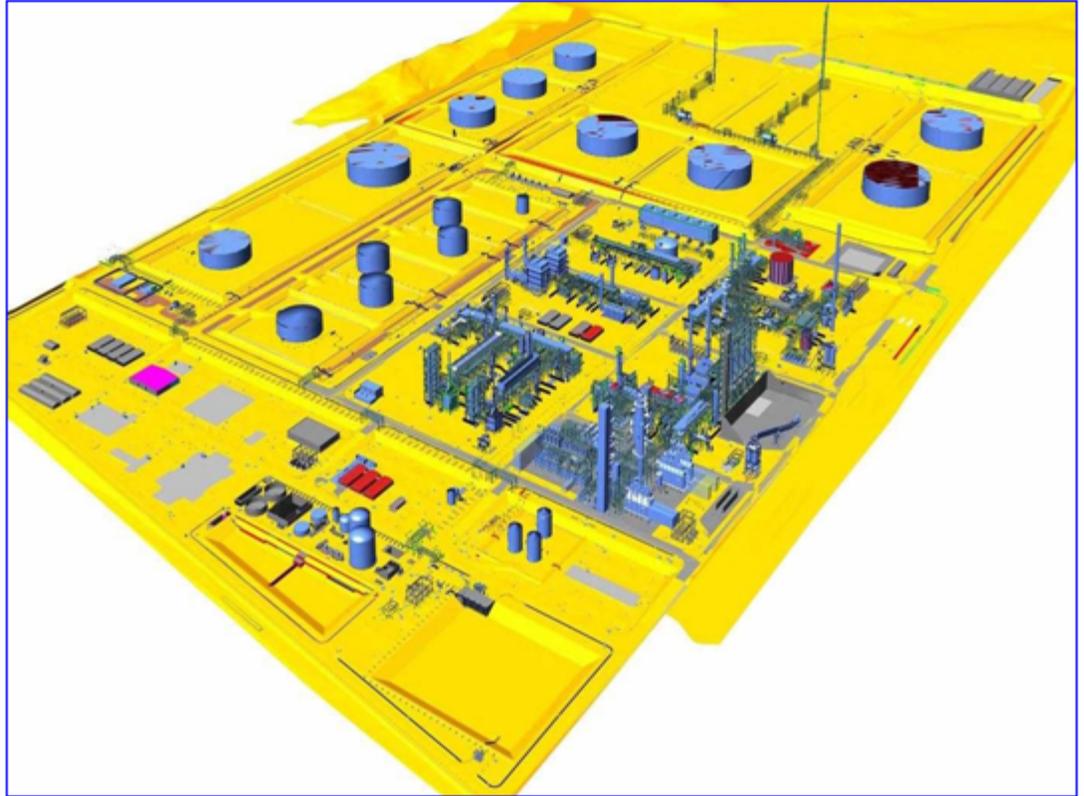
PDVSA Petropiar (antiguamente llamada Petrolera Ameriven S.A.) se formó en 1997 siendo una de las operadoras de las cuatro asociaciones estratégicas que formó PDVSA para la explotación del crudo extra-pesado de la Faja del Orinoco. En esta sociedad participaron PDVSA (30%), Conoco Phillips (40%) y Chevron Texaco (30%). Esta asociación era también conocida como Proyecto Hamaca, porque así se llamaba el área de la Faja donde están ubicados los yacimientos adjudicados a esta empresa, actualmente recibe el nombre de campo Ayacucho y cuenta con un área de 463,07 km<sup>2</sup>.

La firma del convenio de asociación se efectuó en julio de 1997 e inmediatamente arrancó la fase de ingeniería básica. En mayo de 1998 se comenzó con la sísmica tridimensional y a mediados del año 1999 la empresa comenzó con la licitación de los paquetes de ingeniería, procura y construcción, proceso que concluyó

en agosto de 2000 con la adjudicación del mismo consorcio liderado por Fluor Daniel y la empresa venezolana Inelectra. La producción temprana se inició en 2002, y el mejoramiento se comenzó en el último trimestre de 2004.

Según el artículo 5200 publicado en gaceta oficial el 26 de febrero de 2007 Petrolera Ameriven pasó a ser empresa mixta, siendo ahora una asociación entre PDVSA (70%) y Chevron-Texaco (30%). El 1 de mayo de 2007, la empresa se nacionalizó y a partir del 1 de enero de 2008, pasó a ser PDVSA Petropiar. En el mejorador PDVSA Petropiar el crudo extra-pesado es tratado bajo procesos químicos que lo mejoran considerablemente tomando en cuenta como proviene de la Faja Petrolífera del Orinoco (específicamente del campo Ayacucho) y es transportado por el terminal de almacenamiento y embarque de crudo en Jose (TAEJ), estado Anzoátegui, a través del puerto de despacho hacia las refinerías en el exterior. Las actividades propuestas están pautadas para desarrollarse en un período de 35 años con una inversión cercana a los 4 mil millones de dólares.

En dicho mejorador se procesa la mezcla de 190000 barriles estándar por día (BSPD) de crudo extra-pesado de 8.5 API, diluido con 58000 BSPD de nafta de 47 API, para una carga total de crudo diluido de 248000 (BSPD) de 16 API. El crudo diluido contiene los siguientes contaminantes: 3.16% de azufre (S), 1244 ppmp de nitrógeno básico (N), 4577 ppmp de nitrógeno total, 63 ppmp de níquel (Ni) y 249 ppmp de vanadio (V). Al final del proceso se obtiene 180000 (BSPD) de crudo sintético de 26 API, al cual se le ha mejorado considerablemente su calidad, con un menor contenido de contaminantes: 1.6% de azufre, 2700 ppmp de nitrógeno, 49 ppmp de níquel y 171 ppmp de vanadio, de mayor valor comercial en los mercados internacionales. De esa forma se obtiene un crudo cuyas características corresponden a las de un crudo mediano, por eso se habla de producción de crudo mediano sintético a partir de crudo extra-pesado.



*Figura 1.1. Esquema del mejorador PDVSA Petropiar Fuente:  
Inducción en los Procesos del Mejorador de Petróleo Americano  
(actual PDVSA Petropiar).*

### **1.1.3. Visión del Mejorador PDVSA Petropiar**

Maximizar el valor de la producción y mejoramiento de crudo extrapesado mediante una filosofía operativa libre de accidentes, mejoramiento continuo y capacitación de oportunidades de crecimiento en un ambiente dinámico de trabajo.

### **1.1.4. Misión del Mejorador PDVSA Petropiar**

Operar una empresa competitiva reconocida por producir un crudo de alta calidad de forma más segura, confiable, innovadora y rentable, con la mayor conciencia ambientalista y socialmente responsable.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El mejorador de crudo PDVSA Petropiar, se levanta en el Complejo Industrial Jose, estado Anzoátegui, como el más joven de los proyectos de la Faja Petrolífera del Orinoco. Esta precedida por: Petroanzoátegui, Petrocedeño y Petromonagas (anteriormente llamadas: Petrozuata, Sincor y Operadora Cerro Negro respectivamente) para la extracción y mejoramiento de crudo extrapesado; Sus actividades están dirigidas hacia la extracción de 190.000 barriles diarios de crudo extrapesado (8 a 9° API), con la finalidad de mejorarlo y convertirlo en 180.000 barriles diarios de crudo liviano sintético (26° API) de mejor valor comercial. Dicho mejorador se encuentra conformado por áreas y estas a su vez por unidades. En la parte sur del área 70 (área de servicios), se encuentra la unidad 47 en la cual funciona el sistema de agua de enfriamiento.

El sistema de agua de enfriamiento es de recirculación de lazo abierto de agua clarificada diseñado para cumplir con los requerimientos del fluido de enfriamiento para todos los usuarios del Mejorador. Este esta conformado por los siguientes elementos:

Una torre de enfriamiento con 6 celdas de contra flujo (47-CT-001).

Tres bombas de agua accionadas por turbina (47-P-001 A-C).

Una bomba de repuesto accionada por motor (47-P-001 D).

Dos filtros multimedio de corriente lateral (47-F-001 A/B).

Un paquete de inyección de biocida (47-ME-001).

Un paquete de inyección inhibidor de corrosión (47-ME-002).

Un paquete de inyección de cloro (47-ME-003).

Un paquete de inyección de ácido sulfúrico (47-ME-004).

Un paquete de inyección de dispersante (47-ME-005).

Un paquete de inyección de surfactante/dispersante (47-ME-006).

Sesenta y seis de intercambiadores de calor distribuidos en todo el mejorador.

El agua de reposición se requiere para reemplazar las pérdidas debidas a la evaporación, purga, arrastre y escapes. La reposición se toma a partir de dos fuentes: el sistema de agua de servicios (Unidad 44) y el agua de rechazo del Sistema de Osmosis Inversa (Unidad 42).

Para evitar problema como incrustaciones, ensuciamiento, corrosión y crecimiento microbiológico en los equipos que usan esta agua y principalmente en los intercambiadores de calor se debe mantener las condiciones químicas apropiadas por medio de productos químicos (inhibidores de corrosión e incrustaciones aparte de biodepurantes), además del control de las sales disueltas a través de la purga continua y discontinua.

Las condiciones en las que se encuentre el sistema de enfriamiento son esenciales para el buen funcionamiento del mejorador debido a que este es el encargado de disminuir las elevadas temperaturas producidas en los equipos a lo largo de todas las operaciones realizadas en la planta, permitiendo así alargar la vida útil de estos, mantener un ritmo de operaciones constante y satisfacer las condiciones del proceso.

Después de cuatro años de servicios no se conocen las condiciones en las que se encuentra el sistema de enfriamiento de la planta, por lo que surge la necesidad de realizar un estudio que arroje el estado de sus componentes principales (torre de

enfriamiento e intercambiadores de calor) a fin de detectar desviaciones de las condiciones presentes respecto a las de diseño. Esta información permitirá evidenciar el estado actual de operación, que tan eficaz es su funcionamiento, la cantidad de calor extraído, las características del agua que por este sistema transita, el rendimiento de los equipos asociados, entre otros.

Para satisfacer la actual necesidad se procederá a realizar este estudio, el cual se encuentra estructurado de la siguiente manera: un capítulo I en el cual se plasman, aparte de la introducción, los objetivos y la justificación del porque se debe efectuar el trabajo, un capítulo II que reflejara los antecedentes y las bases teóricas que serán necesarias y aplicadas para un entendimiento más amplio de los puntos que estarán involucrados en dicho estudio, un capítulo III que comprende el marco metodológico, el tipo de investigación, la población y muestra empleada, las técnicas de investigación y análisis, las etapas del proyecto y los alcances del mismo, un capítulo IV que mostrara el desarrollo del proyecto, un capítulo V en el cual se pondrán en manifiesto todos los resultados con sus respectivos análisis generados para posteriormente finalizar con la creación de conclusiones y recomendaciones que permitan mejorar y mantener en estado operativo los equipos en estudio.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 General:**

Evaluar el sistema de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar ubicado en el Complejo Industrial Jose, Edo. Anzoátegui para la determinación de las condiciones actuales de operación.

### **1.3.2 Específicos:**

- Recopilar la información necesaria tanto de diseño como del funcionamiento actual de sistema de enfriamiento (torre de enfriamiento e intercambiadores de calor) que permita la comparación entre ambas datas.
- Determinar cuáles son los intercambiadores críticos (actuales) del sistema.
- Evaluar las condiciones actuales de la torre de enfriamiento tomando como referencia las diferencias entre los datos de diseño y de campo.
- Preparar una herramienta de seguimiento del desempeño en función de los parámetros obtenidos en campo que sirva de guía para la selección de los intercambiadores de calor críticos (futuros) que requieran intervención.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

Para favorecer el buen funcionamiento de los equipos y la obtención de las metas trazadas en cuanto producción se refiere del mejorador PDVSA Petropiar, Ubicado en el Complejo Industrial Jose del estado Anzoátegui, se requiere evaluar el sistema de enfriamiento de este (torre de enfriamiento e intercambiadores de calor), con la finalidad de determinar en que estado se encuentra actualmente. Es de hacer notar que este sistema juega un papel importante en casi todas las operaciones de la planta, puesto que es el encargado de disminuir las elevadas temperaturas producidas en los equipos en funcionamiento permitiendo así mantener un ritmo de operaciones constante, cumplir con las condiciones de proceso, alargar la vida útil de los equipos, entre otros y si por alguna razón llegara a fallar se produciría un colapso a muy corto plazo producto (principalmente) de las elevadas temperaturas que predominarían en un gran número de unidades, por tal motivo se deduce que el buen estado del sistema de enfriamiento es sinónimo de buen funcionamiento de cientos de equipos como por ejemplo los intercambiadores de calor asociados a el.

Una evaluación de las condiciones actuales de este conjunto permitirá realizar comparaciones con los parámetros operacionales bajo los cuales fue diseñado y los de operación vigente y a partir de allí conocer que tan alejados están unos del otro permitiendo poder atacar posibles fallas presentes o futuras las cuales pudieran transformarse en una suspensión total o parcial de las actividades del sistema de enfriamiento y por consiguiente de la planta a la que pertenece.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES**

En el año 1994, F. Pietro. evaluó las posibles causas por las cuales la torre de enfriamiento de una línea de producción de una planta productora de cemento, desde la puesta en marcha, presentaba problemas en cuanto al consumo energético que se manifestaba en exceso de vapor admitido por las turbinas. [11]

En el año 2004, J. Ramírez, estudio y evaluó la eficiencia real de la torre de enfriamiento de una determinada línea de producción de un mejorador de crudo y a su vez propuso ideas que permitieron que el sistema de enfriamiento trabajara bajo condiciones estables. [1]

el año 2004, A. Benítez, logró diseñar una hoja de cálculo en Excel que permite determinar el factor de obstrucciones en los intercambiadores de tubo y carcasa con fluido monofásico aparte de la realización de simulaciones considerando las condiciones de diseño de cada intercambiador crítico seleccionado. [2]

#### **2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

##### **2.2.1 Proceso de Refrigeración**

La refrigeración es un aspecto especial a la transferencia de calor y comprende la producción y utilización de temperatura por debajo de la atmosférica mediante varios procesos prácticos. Las sustancias se enfrían cuando se transfiere su calor, por una caída de temperatura, hacia medios sólidos, líquidos o gaseosos que están natural

o artificialmente más fríos, originándose una temperatura más baja a partir de la radiación, efectos físicos de calor sensible o latente o por efectos químicos endotérmicos, termoeléctricos o incluso magnéticos. [11]

### **2.2.2 Procesos de Enfriamiento del Agua**

Los procesos de enfriamiento del agua se cuentan entre lo más antiguos que haya desarrollado el hombre. Por lo común el agua se enfría exponiendo la superficie al aire. Algunos de estos procesos son lentos, como el enfriamiento del agua en la superficie de un estanque, otros son comparativamente rápidos, por ejemplo, el rociado de agua hacia el aire, todos estos procesos implican la exposición de la superficie del agua al aire en diferentes grados. Tanto el agua como el aire son sustancias de bajo costo y cuando hay que enfriar grandes volúmenes, como sucede en las mayorías de las operaciones de enfriamiento de agua es fundamental que tanto el equipo como las operaciones para disminuir la temperatura del agua sean de bajo costo.

En los sistemas de enfriamiento se presentan diversos inconvenientes ocasionados por la humedad del ambiente generado, el crecimiento microbiológico, la corrosión, el ensuciamiento, las incrustaciones, entre otros, deben ser controlados para prolongar la vida útil del equipo. [4]

A continuación se presenta una tabla donde se muestran las impurezas comunes en el agua y las dificultades que éstas causan.

**Tabla 2.1 Impurezas comunes en el agua.** Fuente: Elaboración propia

Constituyente	Fórmula Química	Dificultad que Causa
Dureza	Sales de Ca y Mg	Fuente Principal de incrustaciones en tuberías
Acidez mineral Libre	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HCl	Corrosión
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Corrosión en las Líneas de agua
Sulfatos	SO <sub>4</sub>	Aumenta el contenido de sólidos en el agua. Se combina con calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio.
Cloruros	Cl (como NaCl)	Aumenta el contenido de sólidos e incrementa el carácter corrosivo del agua.
Sílice	SiO <sub>2</sub>	Incrustación en sistemas de agua de enfriamiento.
Hierro	Fe <sup>+2</sup> Ferroso Fe <sup>+3</sup> Férrico	Fuente de depósitos en las tuberías.
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Oxidación en tuberías (hierro y Acero).
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	Corrosión
Sólidos disueltos		Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables debido a que originan formación de lodos.
Sólidos suspendidos		Originan depósitos en equipos intercambiadores de calor y tuberías ocasionan formación de lodos o incrustación.

Aparte de las impurezas mencionadas en la tabla 2.1, es común encontrar en los sistemas de enfriamiento de agua microorganismos como algas, limo y hongos que promueven la formación y adherencia de suciedad biológica, corrosión y olores desagradables.

### 2.2.2.1 Problemas Comunes Presentes en los Sistemas de Enfriamiento de Agua

***Incrustaciones:*** es la acción y el resultado de cubrir un determinado equipo o cualquier otra cosa con un revestimiento de sustancia mineral dejado por el agua que la contiene en disolución. Las incrustaciones más abundantes son las de naturalezas calcáreas. Un sistema de enfriamiento libre de incrustaciones proporciona un rendimiento mayor en lo que se refiera a la transferencia de calor lo cual se transforma en un ahorro de tiempo y de dinero por concepto de reparaciones y mantenimiento.

***Ensuciamiento:*** es un parámetro que puede ser usado para realizarle seguimiento a los intercambiadores de calor y esta directamente relacionado con las características de los fluidos que lo transita.

***Corrosión:*** es un ataque destructivo de los metales que pueden ser de naturaleza química o electroquímica. La corrosión química solamente se produce en un medio que cumpla todas las condiciones para su existencia como lo son medios ambiente altamente corrosivos, una elevada temperatura o ambas cosas juntas. Sin embargo la mayoría de los metales que contienen agua o están sumergidos en ellas producen corrosión de naturaleza electroquímica. Existen diversos tipos de corrosiones, entre la que se pueden nombrar:

***Corrosión Uniforme:*** se produce cuando la cantidad del pH es baja o cuando se esta en la presencia de acidez mineral libre, ácido carbónico o dióxido de carbono.

***Corrosión Puntual:*** es la que se produce debido a la presencia del oxígeno en el agua.

***Corrosión Electroquímica:*** esta también es conocida como corrosión galvánica y se da entre dos metales de grupos reactivos diferentes.

***Corrosión por Erosión:*** esta se presenta cuando el nivel de sólido totales disueltos es elevado.

***Microorganismos:*** estos se subdividen en varios grupos (limos, algas y hongos).

***Limos:*** estos mantienen en grupo a las bacterias, es decir, son indicativos de grandes concentraciones de microbios.

***Algas:*** son el tipo de plantas no vasculares más sencillas. Son esencialmente acuáticas y viven tanto en agua dulce como en agua salada. Algunas crecen también en terrenos húmedos, en la corteza de los árboles y en la madera. Estas plantas se reproducen rápidamente lo cual genera una gran masa de materia verde y en presencia de la luz solar realizan la fotosíntesis con su respectiva liberación de oxígeno.

***Hongos:*** es un grupo de microorganismos unicelulares o pluricelulares que no es ni planta ni animal pero tiene semejanzas en cuanto a las características de ellos. Los hongos se alimentan mediante la absorción directa de nutrientes. Se calcula que existe casi un millón de especies pero solo un pequeño número de ellos han sido estudiados.

La presencia en abundancia de limos y bacterias puede producir malos olores mientras que las algas muertas pudieran causar trabas en las mayas filtrantes. [5]

### **2.2.3 Torre de Enfriamiento**

Una torre de enfriamiento es un dispositivo o sistema en el cual aire y agua están en íntimo contacto. El enfriamiento se logra principalmente a través de

evaporación. El agua a ser enfriada es distribuida en la torre por medio de canales la cual fluye por gravedad a través de aspersores o boquillas, éstas exponen una gran superficie de agua a la acción del aire atmosférico. La circulación del aire atmosférico se logra por medio de ventiladores ubicados en la parte superior de las torres. [13]

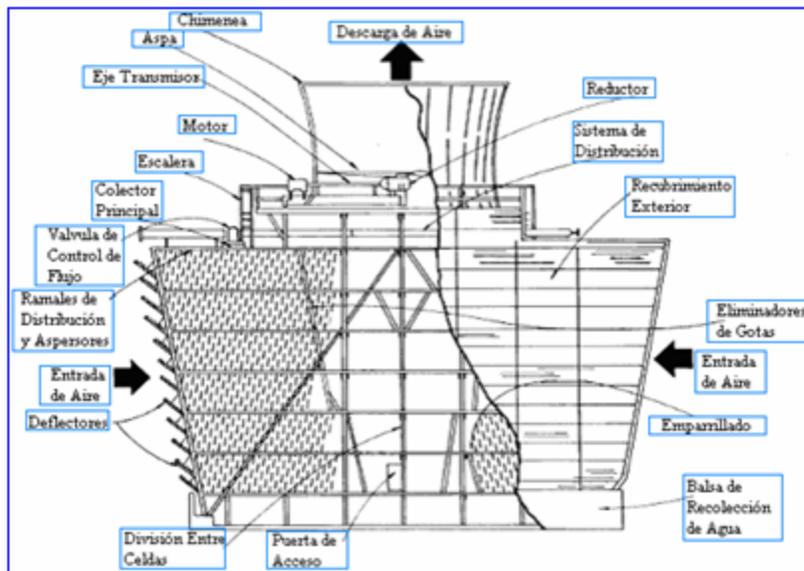
El proceso de termotransferencia que se produce en una torre para enfriamiento de agua, cualquiera fuese su tipo, es el resultado de la interacción entre el medio gaseoso refrigerante (aire) y el fluido a enfriar (agua).

En las torres el agua se encuentra en contacto directo con el aire que la enfría y el proceso de transferencia de calor se realiza en parte por intercambio de calor sensible entre la fase líquida y la gaseosa, pero en mayor medida por la formación de vapor de agua en la interfase líquido/gas y su posterior difusión en el aire que la circunda.

El proceso de transferencia de masa entre el líquido y el aire, está íntimamente conectado con el de transferencia de calor. En efecto, con el cambio de fase desde líquido a vapor se absorbe calor lo cual da lugar a gradientes de temperatura en el aire adyacente al área líquida. [4]

### **2.2.3.1 Componentes de las Torres de Enfriamiento**

Los componentes de una torre de enfriamiento varían dependiendo del modelo de esta, de forma general, en la figura 2.1, se mostrara los principales componentes que la constituyen los cuales, posteriormente, serán detallados para su mayor comprensión.



**Figura 2.1 Partes generales de una torre de enfriamiento.** Fuente: Manual De Procedimiento de Inspección de Torres de Enfriamiento. PDVSA [4].

**Recubrimiento Exterior:** El recubrimiento exterior de todas las torres se realiza mediante placas onduladas, solapadas entre sí y sujetas a la propia estructura de la torre mediante anclajes especiales galvanizados. El material de las placas se especifica según diseño de ingeniería.

**Separación entre Celdas:** Las distintas celdas que integran una torre son separadas mediante placas planas u onduladas, sujetas entre sí y a la estructura con pletinas galvanizadas.

**Emparrillado:** Es un arreglo de parrillas o barras horizontales cuya función es la de formar pequeñas gotas del agua pulverizada que cae a través de ellas y de esta forma favorecer un enfriamiento continuo del agua. Estas parrillas pueden ser de madera o de plástico (polipropileno), las cuales tienen rigidez y consistencia lo que les permite ser autosoportantes.

***Entradas de Aire (Deflectores):*** Estas son placas planas, resistentes a la acción erosiva del agua, las cuales son fijadas en la parte inferior de los laterales de mayor longitud que quedan al descubierto. Estos deflectores son colocados formando ángulo con los brazos horizontales de la torre a fin de que canalicen el flujo de aire al interior e impidan el goteo del agua fuera de ésta. El material de las placas se especifica según diseño de ingeniería.

***Eliminadores de Gotas:*** Es un sistema compuesto de rejillas o deflectores que va colocado por encima del sistema de distribución y aspersión de agua. Su función es la de recuperar las partículas de agua o humedad que entran en el aire antes de ser descargadas de la torre.

***Sección de Llenado:*** La Sección de Llenado es la parte más importante de la torre. Varios tipos de llenado o empaque son usados para mantener el agua distribuida y para incrementar la superficie del agua para una evaporación más eficiente. Originalmente, el llenado consiste de “barras de salpicado” hechos de maderas o de pino tratado a presión. Existen “barras de salpicado” de plástico. Otros tipos de llenado incluyen barras de rocío de plástico, bloques de cerámica y llenado en pantalla.

***Sistema de Distribución de agua caliente:*** El sistema distribuidor de agua está formado por un colector principal de forma telescópica y en secciones variables, del cual salen ramales laterales donde están conectados los aspersores o toberas de tipo multicono. En las torres fabricadas de madera el sistema de distribución del agua caliente consiste en una caja de distribución generalmente de bronce conectada a la tubería principal de alimentación, en dicha caja se encuentran conectadas las toberas o boquillas de rociado que distribuyen el agua en la celda.

**Chimeneas:** Son fabricadas con materiales resistentes a la acción corrosiva del agua, sujetadas entre sí por anillos tensores. En las torres de madera la función de la chimenea es realizada por el tambor o cilindro protector del ventilador.

**Estanque de Recolección de Agua Fría:** Es la parte inferior de la torre donde se deposita el agua que ha sido enfriada, y de allí circulará de nuevo por los diferentes sistemas de enfriamiento. Generalmente este depósito es fabricado de concreto, pero en algunos casos puede ser de madera o metal.

**Soporte del Equipo Mecánico:** El equipo mecánico está instalado sobre un chasis, que se fija a la propia estructura de la torre mediante pernos y abrazaderas de sujeción. El equipo está compuesto por los siguientes elementos: motor de accionamiento, eje de transmisión, caja reductora, ventilador e interruptor de seguridad.

**Accesos:** Según el tipo de torre de enfriamiento, ésta estará provista de escaleras y barandillas de madera o metal. Las torres fabricadas de hormigón armado tienen entrada al interior de éstas, la cual está ubicada generalmente en la parte superior, y por medio de escalerillas metálicas se desciende hasta el sistema de distribución a través de los eliminadores de gota.

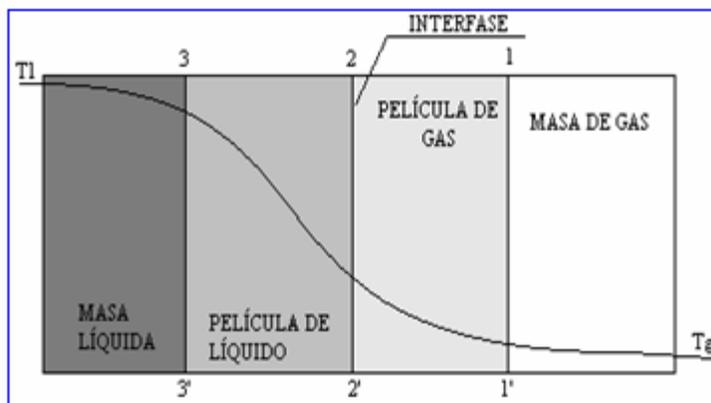
**Ventiladores:** Los ventiladores empleados en las torres de refrigeración de tiro inducido son del tipo axial con regulación manual de las aspas. Están formados por dos partes principales, el cono central y las aspas. Las aspas se unen al cono central mediante abrazaderas o bridas.

**Estructura:** Están conformadas principalmente por elementos prefabricados de hormigón armado o de madera. [8]

### 2.2.3.2 Descripción del Proceso de Enfriamiento del Agua Dentro de la Torre

El estudio del proceso de enfriamiento en una torre, implica el análisis del intercambio de calor por contacto directo entre un líquido y un gas. Comparado con el de transferencia de calor entre un gas y un medio líquido a través de una pared rígida que los separa, el caso de la torre es más complejo porque es difícil evaluar la superficie real de transferencia.

En la figura 2.2 se ilustra un esquema idealizado del fenómeno de transferencia que tiene lugar entre la masa líquida y la gaseosa en una torre de enfriamiento. [5]



**Figura 2.2 Idealización del sistema de enfriamiento.** Fuente: Manual de operaciones de Petrolera Ameriven (actual PDVSA Petropiar) [7].

Puede suponerse que a uno y otro lado de la interfase 2-2' se forman una película de aire y otra de agua. Los gradientes de temperatura existentes en ambas películas promueven la transferencia de calor necesaria para producir la evaporación y difusión de una pequeña porción del agua que está en circulación. [5]

### 2.2.3.3 Clasificaciones de las Torres De Enfriamiento por Tipos y Funciones

Según el proceso, pueden ser de enfriamiento directo y de enfriamiento indirecto.

Según el tipo de tiro, pueden ser atmosféricas, de tiro natural o de tiro mecánico (esta última se subdivide en dos diseños: en Contraflujo o Flujo Transversal).

Según su funcionamiento, pueden ser de aire acondicionado chiller o de condensador.

Según el circuito del agua, pueden ser: de recirculación abierta o cerrada. [4]

***Torre de Enfriamiento Directo:*** en este tipo de torre el fluido de enfriamiento, por ejemplo agua fría, va directamente al proceso y regresa como agua caliente por la parte superior de la torre como se muestra en la figura 2.3.

***Torre de Enfriamiento Indirecto:*** en este caso el agua fría intercambia calor con un equipo (intercambiador de calor) y regresa como agua caliente a la parte superior de la torre como se muestra en la figura 2.4.

***Torre de Tiro Mecánico:*** el agua caliente llega a la torre y puede distribuirse por boquillas aspersoras o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios como se muestra en la figura 2.5. El aire usado para el enfriamiento del agua es extraído de la torre por medio de dos formas:

Torre mecánica de tiro forzado: en ésta la entrada de aire a la torre se logra al colocar los ventiladores a nivel del piso de forma conveniente para su inspección y mantenimiento quedando así fuera de condiciones corrosivas. Este tipo de equipo esta sujeto a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado también hay presencia de una distribución no uniforme del aire sobre el área del piso de la celda y limitaciones sobre el diámetro físico de los ventiladores.

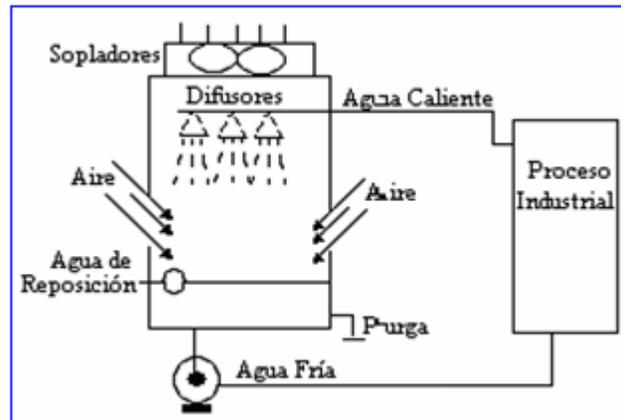
***Torre mecánica de tiro inducido:*** en este modelo el aire entra a la torre a través de aberturas laterales de la estructura y es extraído por medio de ventiladores colocados en la parte superior de la misma. Este tipo de torre mejora la distribución del aire dentro de la celda. Estos tipos se subdividen en dos grupos: contraflujo y de flujo cruzado, en la primera el aire y el agua llevan direcciones paralelas pero sentidos opuestos y en la segunda ambos flujos son perpendiculares. *La torre de refrigeración en estudio* funciona según el principio de los flujos cruzados. El agua que debe enfriarse se introduce en la parte superior de la torre y se distribuye, por una red de tubos equipados de pulverizadores, en toda la sección de intercambio (superficie de escorrentía, o intercambiador tubular). El agua fluye a través del cuerpo de intercambio y se recoge en un recipiente colocado en la base de la torre. El aire inducido por los ventiladores, pasa a contra corriente con el agua, se filtra en el separador de gotitas y luego sale la torre. El intercambio de calor entre el aire y el agua se opera por contacto y por evaporación de una pequeña parte del agua en el aire. [9]

***Torre Atmosférica:*** en este tipo de torre la pérdida de calor se logra fundamentalmente por el movimiento natural del aire a través de la estructura.

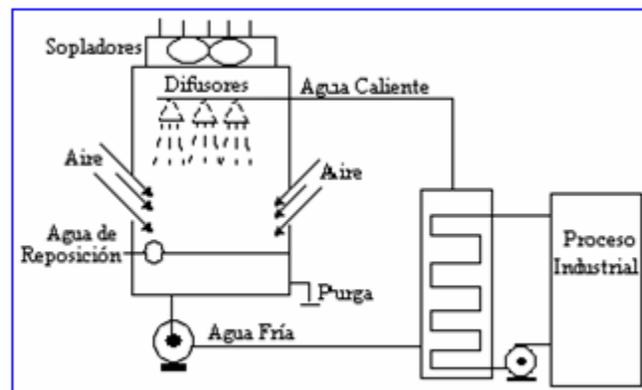
***Torre Hiperbólica o de Tiro Natural:*** en estas torres el aire es inducido por una gran chimenea situada en la parte superior de ella. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente. Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son muy indicadas para enfriar grandes caudales de agua. Al igual

que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s. Las torres de tiro hiperbólico no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua.

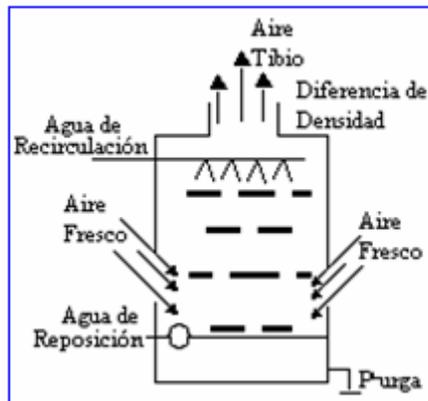
#### 2.2.3.4 Ejemplos Gráficos de Torres de Enfriamiento [9]



*Figura 2.3 Sistema de enfriamiento directo.* Fuente: Manual del Ingeniero Mecánico



*Figura 2.4 Sistema de enfriamiento indirecto.* Fuente: Manual del Ingeniero Mecánico



**Figura 2.5 Torre de enfriamiento de tiro natural.** Fuente: Manual del Ingeniero Mecánico

Los materiales utilizados para hacer las torres de enfriamiento son variables, la estructura interna de ellas cambia con respecto al tamaño de estas, se pueden encontrar arreglos de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio, de concreto, metálicas, de madera, entre otras.

Cada tipo de material usado para la estructura de las torres de enfriamiento presenta problemas o inconvenientes derivados de la naturaleza de ellos, en el caso de las hechas de madera se pudiera presentar problemas de deslignificación (pérdida de las propiedades mecánicas) lo cual es la remoción de la lignina, el material que aglutina las fibras de la madera lo que le da una textura de corcho por la presencia del cloro que se usa para contrarrestar los problemas microbiológicos. [5]

### **2.2.3.5 Parámetros Operacionales que se Deben Controlar en las Torres de Enfriamiento [3]**

**Temperatura de Bulbo Húmedo:** Es la temperatura medida por un termómetro al cual se le ha envuelto el bulbo con un fragmento de tela empapada de agua

destilada. Esta es la temperatura en equilibrio alcanzada por una superficie de evaporación y ocurre cuando la velocidad de calor transferido a la superficie por convección es igual al calor perdido por evaporación.

**Temperatura de Bulbo Seco:** es la medida con un termómetro de mercurio o similar el cual tiene el bulbo seco. Esta se relaciona con la temperatura ambiental tal y como se mide normalmente siempre y cuando el bulbo del termómetro este seco

**Humedad Relativa:** Es la cantidad de agua en forma de vapor que contiene un determinado estado de aire húmedo. Tiene un valor comprendido entre 0 – 100% y nos indica el grado de saturación. Cuando la humedad supera el 100% aparece el fenómeno niebla.

**Humedad Absoluta:** Es la cantidad de vapor de agua que contiene un estado de aire húmedo referido a 1 Kg. de aire seco.

**Tabla 2.2 Algunos parámetros operacionales que se miden con frecuencia en un sistema de enfriamiento.** Fuente: Elaboración propia

Caudales de Agua	Temperaturas		Otros Parámetros a Medir
	Agua	Temperatura de agua caliente.	Presión estática, para determinar la presión total en la entrada
		Temperatura de agua fría.	Presión barométrica.
	Aire	Temperatura de bulbo seco del aire de admisión.	Potencia a la entrada del ventilador.

	Temperatura de bulbo húmedo del aire de admisión.	Velocidad y dirección del viento de la atmósfera local.
--	---	---

#### 2.2.4 Procesos de Transferencia de Calor

La transferencia de calor es una interacción entre fluidos o materiales a consecuencia de un gradiente de temperaturas entre ellos. Esta interacción ocurre mediante tres mecanismos diferentes, a saber: conducción, radiación y convección. Estrictamente hablando, solamente los primeros mecanismos pueden clasificarse como operaciones de transferencia de calor, porque dependen solamente de la existencia de un gradiente de temperatura. A diferencia de ellos, el mecanismo de convección está fuertemente influenciado por el patrón de flujo (dinámica de fluido); pero tiene asociado un intercambio de energía desde las zonas de alta hacia baja temperatura. Conducción es fundamentalmente transferencia de energía por contacto físico en ausencia de movimiento del material a escala macroscópica. Este mecanismo puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases. Radiación es la transferencia de calor de un cuerpo a otro mediante el movimiento de ondas electromagnéticas a través del espacio, inclusive cuando exista vacío [10].

Cuando se realizan evaluaciones que implican cálculos de transferencia de calor se deben tomar en cuenta todos los mecanismos mencionados con anterioridad que pudieran estar involucrados. Así como la presencia o no de fluido, sus características y la manera como puede ser influenciado por los mecanismos de transferencia energética.

Existen dos procesos generales de transferencia de calor: Sin cambio de fase, conocida también como calor sensible y con cambio de fase. El proceso sin cambio

de fase o calor sensible, como su nombre sugiere, involucra operaciones de calentamiento y enfriamiento de fluidos donde la transferencia de calor resulta solamente en cambios de temperatura; mientras que en el cambio de fase, la operación se traduce en una conversión de líquido a vapor o de vapor a líquido; es decir, vaporización o condensación. Muchas aplicaciones involucran ambos tipos de procesos [9].

### **2.2.5 Intercambiadores de Calor**

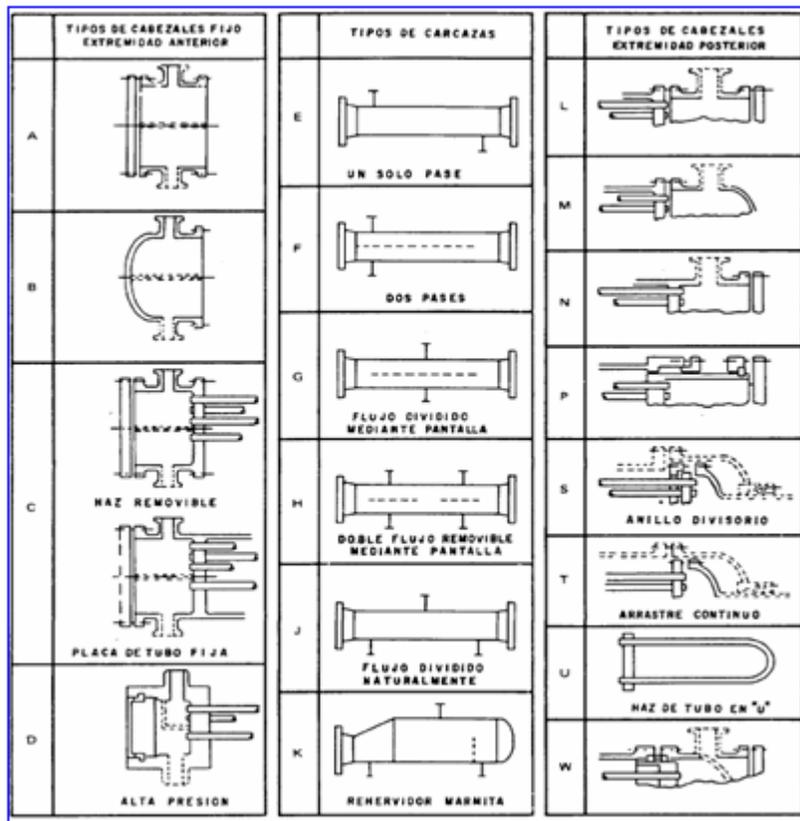
Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir energía térmica de un fluido con alta temperatura a otro de baja temperatura ambos en movimiento, estos pueden estar separados por una barrera sólida o se encuentren en contacto. Es parte esencial de los dispositivos de refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía, procesamientos químicos entre otros.

Los intercambiadores son diseñados para satisfacer requerimientos específicos, existiendo en el mercado una gran diversidad de tipos que difieren en tamaño y forma. Estos tipos son clasificados de acuerdo a diferentes criterios, tales como procesos y mecanismos de transferencia de calor, grado de compactación de la superficie, patrón de flujo, número de fluidos, geometría y tipo de construcción. Este último criterio engloba un amplio rango de intercambiadores usados en la industria petrolera.

La función básica de los intercambiadores es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas. El calor fluye como resultado del gradiente de temperatura desde el fluido caliente hacia el frío, a través de una pared de separación, a la cual se le denomina superficie o área de transferencia de calor. Es decir, no existe fuente de energía térmica en un intercambiador de calor. Por otro

lado, si los fluidos son inmiscibles, el área física de transferencia de calor puede ser eliminada, y la interfase formada entre los fluidos puede servir como área de transferencia de calor. Esto se expresa más adelante en la ecuación 2.2 la cual es un balance de energía entre los fluidos involucrados en la transferencia de calor (primera ley de la termodinámica). [5]

En el ámbito internacional existe una normativa que recoge todo lo referente al diseño y fabricación de intercambiadores de calor. Esta normativa se conoce como TEMA, que quiere decir al traducirlo Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares (Tubular Exchange Manufacturers Association). Los intercambiadores de calor utilizados a escala industrial se rigen por este estándar. A continuación se muestra en la figura 2.6 las distintas formas en las que se pueden combinar los cabezales fijos o extremidad anterior, las carcassas y la extremidad posterior para dar forma a los intercambiadores de calor según esta normativa.



*Figura 2.6 Nomenclatura TEMA, para diferentes intercambiadores de calor.*

Fuente: Asociación de manufactura de intercambiadores de calor estándares [8].

### 2.2.5.1 Funciones de los Intercambiadores de Calor

La función básica de los intercambiadores es la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferente temperatura. El calor fluye, como resultado del gradiente de temperatura, desde el fluido caliente hacia el frío a través de una pared de separación, la cual se le denomina superficie o área de transferencia de calor. Es decir, no existe fuente de energía térmica en un intercambiador de calor.

Por otro lado, si los fluidos son inmiscibles, el área física de transferencia de calor puede ser eliminada, y la interfase formada entre los fluidos puede servir como área de transferencia de calor. En resumen, las funciones típicas de un intercambiador de calor en los procesos industriales son las siguientes:

***Recuperación de calor:*** la corriente fría recupera parte del calor contenido en la corriente caliente, es decir, calentamiento y enfriamiento de las corrientes involucradas, las cuales fluyen simultáneamente a ambos lados del área de transferencia de calor.

***Evaporación:*** una de las corrientes involucradas en el intercambio de calor cambia de fase líquida a vapor.

***Condensación:*** una de las corrientes involucradas en el intercambio de calor cambia de fase vapor a fase líquida. [10]

#### **2.2.5.2 Diseño de Intercambiadores de Calor**

En el diseño de intercambiadores de calor se tienen en cuenta muchas variables entre las cuales se encuentran:

Energía calórica a intercambiar

Área de intercambio.

Disposición de los tubos.

Pérdida de carga a través del mismo

Viscosidad de las soluciones.

Corrosión.

Coefficiente de ensuciamiento.

Temperatura de entrada y salida entre ambos fluidos.

Razón o flujo másico de ambos fluidos.

Calores específicos de ambos fluidos.

Con frecuencia el procedimiento para diseñar intercambiadores de calor es el siguiente:

Establecer las condiciones de proceso tales como: composición del fluido, caudal, temperaturas y presiones.

Se deben evaluar las propiedades de los fluidos en un rango determinado.

Realizar una estimación preliminar del área del intercambiador, verificando la pérdida de carga en el mismo y la cantidad de calor intercambiado.

Además hay que tener presente que se diseña al equipo para que trabaje un cierto tiempo, antes de ser sometido a un mantenimiento. El lapso de tiempo está definido por el coeficiente de ensuciamiento dado en el diseño [8].

### 2.2.5.3 Clasificación de los Intercambiadores de Calor

Dada las múltiples aplicaciones de estos dispositivos, se puede realizar una clasificación dependiendo de su construcción o en la dirección relativa del fluido caliente y el fluido frío. Para la elección del mismo se consideran aspectos como tipo de fluido, densidad, viscosidad, contenido en sólidos, límite de temperaturas, conductividad térmica, entre otras. Una clasificación sería:

**Doble Tubo:** Este es el intercambiador más sencillo, consiste en 2 tubos concéntricos, como se muestra en la figura 2.7, por el tubo interno circula uno de los fluidos, mientras que el otro fluido circula por el espacio anular. Dependiendo del sentido del flujo se clasifica en flujo paralelo y flujo contracorriente como se muestra en las figuras 2.8 y 2.9 respectivamente.



Figura 2.7 Intercambiador de Doble tubo. Fuente: Asociación de manufactura de intercambiadores de calor tubulares.

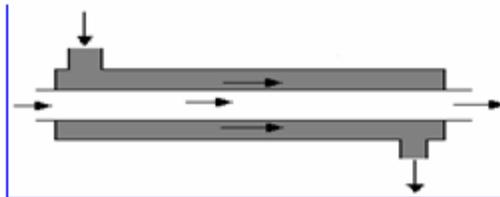


Figura 2.8 Intercambiador de doble tubo de flujo paralelo. Fuente: B. Uekler y E. Demiral [1].

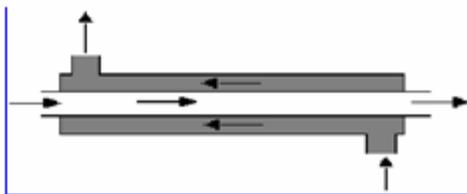
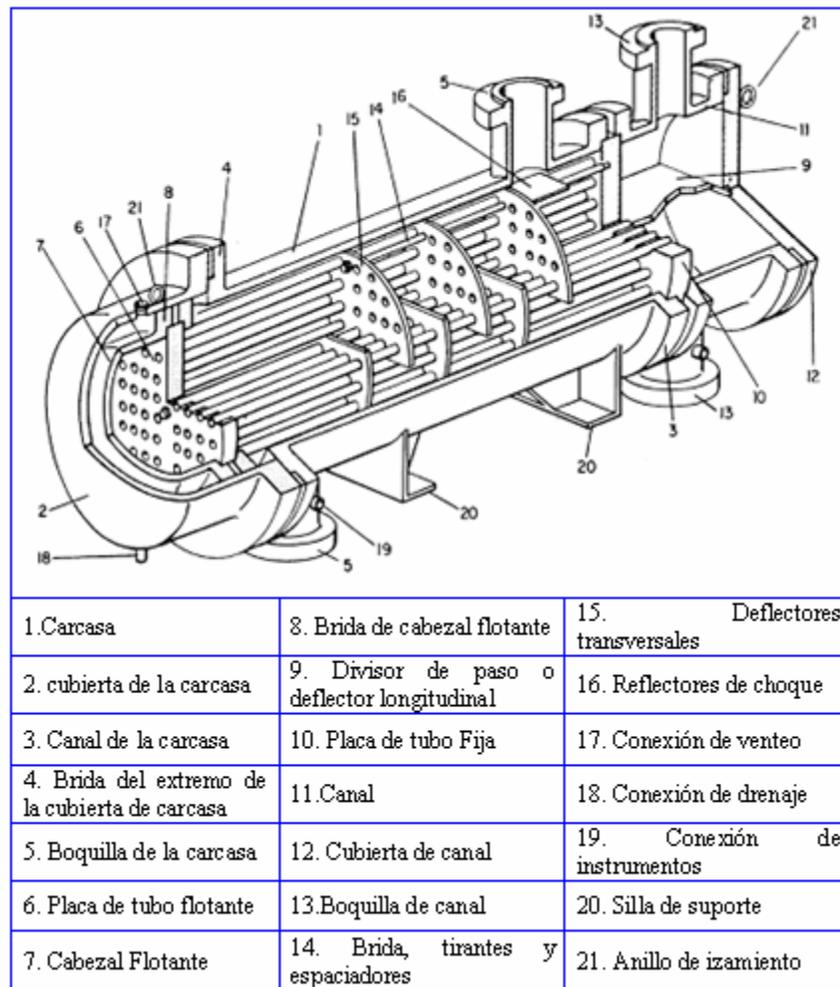


Figura 2.9 Intercambiador de doble tubo de flujo contracorriente. Fuente: B. Uekler y E. Demiral [1].

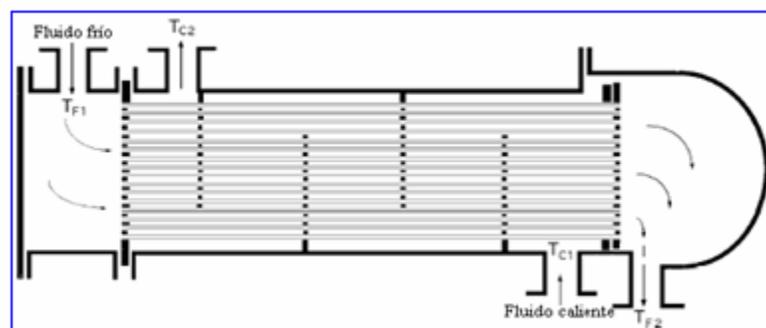
**De Placas:** formados por un conjunto de placas de metal corrugadas (acero inoxidable, titanio, u otros.) contenidas en un bastidor. El sellado de las placas se realiza mediante juntas o bien pueden estar soldadas.

**Tubulares:** formados por un haz de tubos corrugados o no, realizado en diversos materiales. El haz de tubos se ubica dentro de una carcasa para permitir el intercambio con el fluido a calentar o enfriar como se muestra en la figura 2.10 y 2.11 [11]



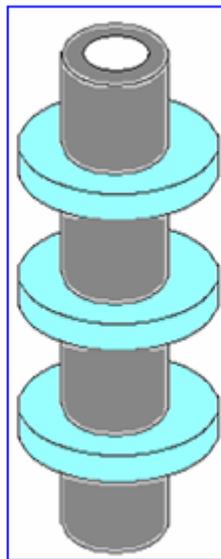
**Figura 2.10** Partes de un Intercambiador de carcasa y tubo.

Fuente: Asociación de manufactura de intercambiadores de calor estándares [8].



**Figura 2.11 Intercambiador de carcasa y tubo (circulares).** Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12]

**Tubo Aleteado:** se compone de un tubo o haz de tubos a los que se sueldan aletas de diferentes forma, tamaños y grosores. Estos tipos de intercambiadores son usados con frecuencia cuando la parte externa del mismo se encuentra en contacto con un medio gaseoso y la interna un líquido, esto es debido a que los gases tienen un coeficiente convectivo bajo ( $h_g \llll h_{liq}$ ) y se usan para incrementar el área de transferencia de calor, un ejemplo de estos modelos puede ser el radiador de un vehículo. Dentro de este grupo se encuentran: intercambiadores de aletas circulares, y espinas longitudinales como se muestran en las figuras 2.12, 2.13 y 2.14 respectivamente.



**Figura 2.12 Intercambiadores de aletas circulares.** Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12].

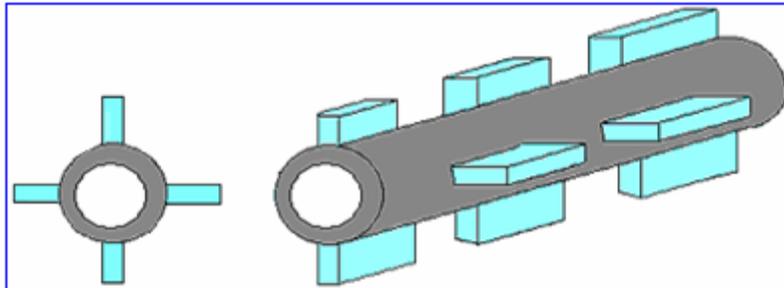


Figura 2.13 Intercambiadores de aletas de espinas. Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12].

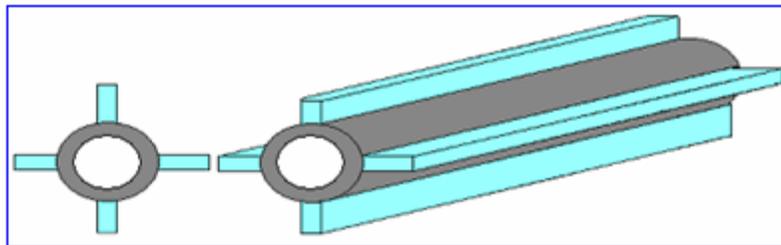


Figura 2.14 Intercambiadores de aletas longitudinales. Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12].

**Superficie Rascada:** muy similar al tubular, con la particularidad de ubicar dentro del tubo un dispositivo mecánico helicoidal que permite el paso del fluido que, por sus características, impide un trasiego normal con los medios de bombeo habituales.

También se pueden fabricar intercambiadores de calor cuando se crean pasadizos para el flujo al incrementar el número de tubos de sección circular o elíptica mediante un grupo de placas planas paralelas.

Hay un parámetro propio de los intercambiadores llamado densidad de área, esta viene dada por la razón del área de transferencia de calor al volumen del intercambiador, a mayor valor de la densidad de área (mas de  $656 \text{ m}^{-1}$ ) más compacto será el intercambiador.

Dependiendo de la dirección relativa entre los flujos (el frío y el caliente), se pueden clasificar en: intercambiadores de flujo paralelo (ambos flujos son paralelos y llevan la misma dirección), flujo cruzado (las direcciones de los flujos son perpendiculares) y flujo encontrado (ambos flujos son paralelos pero llevan sentido contrario) [6].

#### **2.2.5.4 Aplicaciones Industriales Frecuentes de los Intercambiadores de Calor**

Son prácticamente innumerables dada su tipología. Entran a formar parte de cualquier proceso donde se requiera intercambio térmico. Cabría destacar:

***Industria alimentaria:*** enfriamiento, termización y pasteurización de leche, zumos, bebidas carbonatadas, salsas, vinagres, vino, jarabe de azúcar, aceite.

***Industria química y petroquímica:*** producción de combustibles, etanol, biodiésel, disolventes, pinturas, pasta de papel, aceites industriales, plantas de cogeneración.

***Industria del aire acondicionado:*** cualquier proceso que implique enfriamiento o calentamiento de los gases.

***Calefacción y energía solar:*** producción de agua caliente sanitaria, calentamiento de piscinas, producción de agua caliente mediante paneles solares.

***Industria marina:*** enfriamiento de motores y lubricantes mediante el empleo del agua del mar. [10]

### 2.2.5.5 Análisis de Intercambiadores de Calor [12]

Al analizar un intercambiador de calor lo que se busca es encontrar la cantidad de calor extraído del fluido caliente y transmitido al fluido frío en términos del coeficiente de transferencia de calor, el área de transferencia del intercambiador y de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos que entran y salen de este. Al realizarle un balance de energía a un intercambiador nos da como resultado la siguiente expresión la cual es valida para todo tipo de intercambiadores de calor:

$$\text{Energía ganado por el fluido frío} = \text{Energía perdida por el fluido caliente} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Escrito de otra manera, tenemos:

$$Q_f = \dot{m}_f c_f (T_{s,f} - T_{e,f}) = \dot{m}_c c_c (T_{e,c} - T_{s,c}) = Q_c \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

$Q_f$  = Calor absorbido por el fluido frío, (watt).

$Q_c$  = Calor entregado por el fluido caliente, (watt).

$\dot{m}_f$  = Flujo másico del fluido frío, (Kg. /s).

$\dot{m}_c$  = Flujo másico del fluido caliente, (Kg. /s).

$C_f$  = Calor específico del fluido frío a presión constante, (J/Kg. °K).

$C_c$  = Calor específico del fluido caliente a presión constante, (J/Kg. °K).

$T_{s,f}$  = Temperatura de salida del fluido frío, (°K).

$T_{e,f}$  = Temperatura de entrada del fluido frío, (°K).

$T_{e,c}$  = Temperatura de entrada del fluido frío, (°K).

$T_{s,c}$  = Temperatura de salida del fluido frío, (°K).

### 2.2.5.5.1 Coeficiente de Transferencia de Calor Total (U)

Cuando se tienen dos fluidos separados por una pared metálica plana de conductividad  $k$ , y espesor  $t$  y las temperaturas de los fluidos involucrados se mantiene constante, como se muestra en la figura 2.15, el coeficiente de transferencia de calor se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{t}{k} + \frac{1}{h_f} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

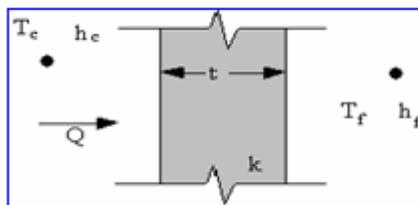
$U$  = Coeficiente de transferencia de calor total, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$h_c$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido caliente, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$h_f$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido frío, (watt/m<sup>2</sup>°K)

$k$  = Conductividad del material de la pared, (watt/m°K)

$t$  = Espesor de la pared, (m)



**Figura 2.15** Esquema de la transmisión de calor a través de una pared plana.

Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12]

Mientras que si los fluidos se encuentran fluyendo dentro y fuera de tubos, como se muestra en la figura 2.16, la relación de transferencia de calor sería entonces

$$Q = 2\pi r_o L h_o (T_1 - T_o) = \frac{2\pi k L (T_o - T_i)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} = 2\pi r_i L h_i (T_i - T_2) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

$Q$  = Razón de calor, (watt).

$T_1$  = Temperatura del fluido exterior, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$T_o$  = Temperatura de la superficie exterior del tubo, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$T_i$  = Temperatura de la superficie interior del tubo, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$T_2$  = Temperatura del fluido interior, ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$L$  = Longitud del tubo, (m)

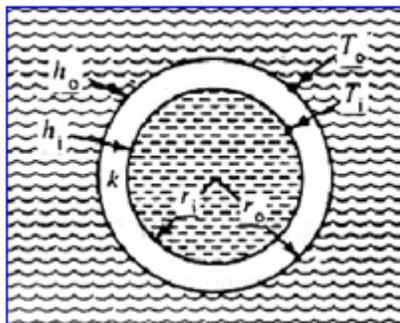
$r_o$  = Radio exterior del tubo, (m)

$r_i$  = Radio interno del tubo, (m)

$k$  = Conductividad térmica del material del tubo, (watt/m $^{\circ}\text{K}$ )

$h_o$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido externo, (watt/m $^2$  $^{\circ}\text{K}$ )

$h_i$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor del fluido interno, (watt/m $^2$  $^{\circ}\text{K}$ )



**Figura 2.16** Transferencia de calor por medio de las paredes de un tubo

Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12]

Si se agrupan los siguientes elementos de la forma:

$$A_0 = 2\pi r_0 L \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$A_i = 2\pi r_i L \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Se puede escribir nuevamente la ecuación (2.3) de la siguiente manera:

$$Q = A_0 U_0 \Delta T \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$Q = A_i U_i \Delta T \quad (\text{Ec. 2.9})$$

De donde surgen las ecuaciones:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{r_0}{k} \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) + \left(\frac{r_0}{r_i}\right) \frac{1}{h_1} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_0} \left(\frac{r_i}{r_0}\right) + \left(\frac{r_i}{k}\right) \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) + \frac{1}{h_i} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

#### 2.2.5.5.2 Factor de Impureza Para Superficies de Transferencia de Calor (Rf)

Todo intercambiador después de un determinado tiempo de uso presenta suciedad en el interior de sus tubos producto de las impurezas de los fluidos que los transitan. Estos contaminantes afectan duramente el valor del U (coeficiente de transferencia de calor total) lo cual se transforma en un incremento en la resistencia del flujo de calor y viene dada por la siguiente expresión. [6]

$$R_f = \frac{1}{U_{impuro}} - \frac{1}{U_{limpio}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

$R_f$  = Factor de impureza en superficies de transferencia de calor, (m<sup>2</sup>K/ watt)

$U_{impuro}$  = Coeficiente de transferencia de calor tota, (watt/m<sup>2</sup>K)

$U_{limpio}$  = Coeficiente de transferencia de calor total, (watt/m<sup>2</sup>K)

### 2.2.5.5.3 Intercambiadores de Calor de Pasos Múltiples

Para calcular la transferencia de calor en intercambiadores de tubos múltiples y paso en la carcasa se utilizan ciertas cartas que dependen del tipo de intercambiador estudiado. El valor de la transferencia de calor viene dada por la expresión siguiente: [12]

$$Q = UAF(LMTD) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

$Q$  = Razón de calor, (watt)

$U$  = Coeficiente de transferencia de calor, (watt/m<sup>2</sup>K)

$A$  = Área de transferencia de calor, (m<sup>2</sup>)

$F$  = Factor de corrección de LMTD, (adimensional)

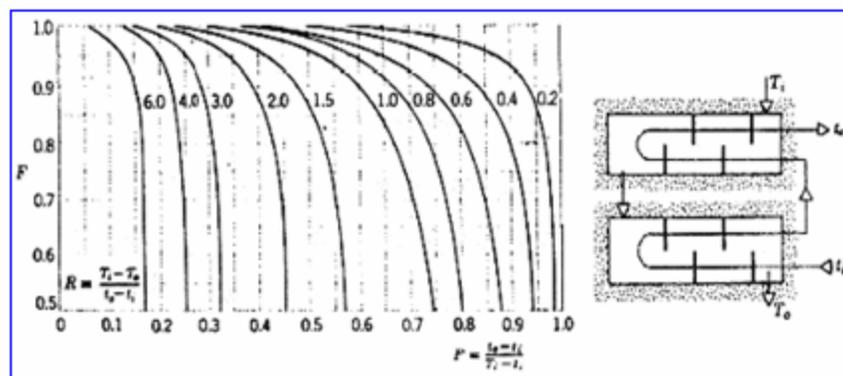
$LMTD$  = Diferencia de Temperatura Media Logarítmica, ( $^{\circ}K$ )

En la ecuación 2.13 el valor de  $F$  y el de la  $LMTD$  dependen directamente del tipo de intercambiador que se este evaluando y se explicaran a continuación.

Este  $F$  toma en cuenta los efectos en los pasos de cáscara múltiple o tubo múltiples siempre se intenta escoger parámetros tales que el valor de  $F$  sea mayor a 0.75 de no ser posible conseguir este valor para una configuración dada se debe evaluar otra configuración. Cuando el fluido frío fluye por dentro de los tubos los parámetros que se emplean en las cartas para el factor de corrección son  $P$  y  $R$  donde el primero es la razón entre la ganancia de temperatura del fluido frío y la máxima diferencia de temperatura en el intercambiador de calor, mientras que  $R$  es la razón entre la caída de temperatura del fluido caliente y la ganancia de temperatura del frío. Ambos parámetros se expresan de la siguiente manera:

$$P = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$R = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{c,i}} \quad (\text{Ec. 2.15})$$



**Figura 2.17** factor de corrección  $F$  para intercambiadores de calor de carcasa y tubo con dos pasos de carcasa y cuatro u ocho o cualquier múltiplo de cuatro tubos. Fuente: B. Karlekar y R. Desmond [12]

En la figura 2.17 se muestra un ejemplo de las cartas usadas para encontrar el valor del factor de corrección F, esta en particular corresponde a intercambiadores de calor de carcasa y tubo con dos pasos de carcasa y cuatro u ocho o cualquier múltiplo de cuatro tubos.

#### 2.2.5.5 .4 Diferencia de Temperatura Media Logarítmica

En intercambiadores de calor de flujos paralelos, la Diferencia de Temperatura Media Logarítmica, LMTD, se define como el cociente de la resta de la temperatura del fluido caliente menos la temperatura del fluido frío en un punto inicial ( $X = 0$ ), menos la misma diferencia de temperatura pero tomada en una distancia igual a la longitud del tubo ( $X = L$ ) entre el logaritmo natural del cociente de la diferencia de temperatura en  $X = 0$  y la diferencia de temperatura en  $X = L$ .

Como se muestra en la ecuación N° 2.16, para el calculo del LMTD es necesario conocer las cuatros temperaturas (entrada y salida del lado tubo y lado carcasa) de los fluidos que intercambian calor. Cuando estos parámetros no se conocen es recomendable emplear otros procedimientos para la evaluación de intercambiadores de calor como el método de NUT. La ecuación que rige la temperatura media logarítmica se puede escribir de manera más general, aplicable a cualquiera situación de la siguiente manera:

$$DTML = \frac{(\Delta T)_{X=0} - (\Delta T)_{X=L}}{\ln\left(\frac{(\Delta T)_{X=0}}{(\Delta T)_{X=L}}\right)} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

### 2.2.5.5.5 Eficiencia de los Intercambiadores ( $\epsilon$ )

La función de un intercambiador puede ser la de calentar un fluido frío que entra a una temperatura  $T_{c,i}$  a la más alta posible dentro de la que sería  $T_{h,i}$  o la de retirar energía del fluido caliente siendo el caso límite aquel en el que  $T_{h,o}$  es igual a  $T_{c,i}$ .

La energía calórica que puede ser transferida por cualquier intercambiador de calor se define, mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \frac{\text{calor real transferido}}{\text{máxima transferencia de calor posible}} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

En esta ecuación, la máxima transferencia de calor posible también es conocida como la cantidad de calor que por diseño puede extraer el intercambiador.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Este trabajo cumple con las características de una investigación documental y al mismo tiempo de campo. Como lo dicen sus objetivos específicos, se llevará a cabo la evaluación del sistema de agua de enfriamiento del mejorador PDVSA PETROPIAR mediante las comparaciones de los parámetros de diseño y los de operación actual, los primeros serán proporcionados por medio de manuales, hojas de datos, planos, entre otros de donde sale su particularidad documental puesto que esta es la que se realiza por medio de material impreso u otro tipo de documento mientras que por otro lado, es también de campo porque se necesitara realizar la recolección de datos directamente del lugar donde se generan sin proporcionarle alteración alguna para posteriormente poder realizar las comparaciones.

#### **3.2 METODOLOGÍA APLICADA**

Para lograr los objetivos de este trabajo se procedió a recopilar los datos de diseño extraídos de documentos existentes en un programa propio del mejorador, llamado documentum, donde se tiene información de toda la planta como: hojas de datos de los equipos, P&ID, diagrama de flujo de procesos entre otros, tanto de la torre de enfriamiento, sus equipos más relevante como de los respectivos intercambiadores de calor asociados a este sistema, siempre tomando en cuenta cuales fueron los criterios empleados para la fabricación de cada uno de ellos, además se realizaron mediciones y cálculos de parámetros operacionales, se compararon los datos de campo con los de diseño para determinar cual es la situación actual de la torre y cuales son los intercambiadores críticos (existentes) del conjunto (ver que

tanta diferencia presentaban los datos recogidos en el campo o los calculados a partir de estos con relación a los valores teóricos con la finalidad de revelar las condiciones operacionales del sistema de enfriamiento del mejorador) y finalmente se creó una herramienta de seguimiento en función de los parámetros evaluados y obtenidos en campo que sirve de guía en la selección de los intercambiadores críticos (futuros) que requieran ser intervenidos.

### **3.3 POBLACIÓN**

En esta investigación se tomo como población el sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar ubicado en el Complejo Industrial Jose del estado Anzoátegui.

### **3.4 MUESTRA**

En este estudio, la muestra estuvo constituida por los siguientes equipos:

- Una torre de enfriamiento de 6 celdas de contra flujo.
- Tres Bombas de agua accionadas por turbina y una bomba de repuesto accionada por motor.
- Dos filtros multimedio de corriente lateral.
- Un paquete de inyección de biocida, un paquete de inyección inhibidor de corrosión, un paquete de inyección de cloro, un paquete de inyección de ácido sulfúrico, un paquete de inyección de dispersante y un paquete de inyección de surfactante/dispersante.
- Una serie de intercambiadores de calor los cuales se detallarán en el capítulo IV (tabla N° 4.1) de este trabajo.
-

### **3.5 ALCANCE**

Lo que se busca con este trabajo es revelar las condiciones actuales del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador PDVSA Petropiar por medio de un cotejo de parámetros operacionales reales con los teóricos con la finalidad de tener una base de datos comparativa que refleje posibles desviaciones entre ambas datas y den origen a una serie de conclusiones y recomendaciones en función a la mejora de dicho sistemas.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR PDVSA PETROPIAR**

El sistema de agua de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar se encuentra constituido por los siguientes componentes: una torre de enfriamiento conformada por 06 celdas (47-CT-001), tres bombas de agua de enfriamiento accionadas por turbina (47-P-001 A-C) y una bomba de repuesto accionada por motor (47-P-001 D), dos filtros de corriente lateral (47-F-001A/B), un paquete de inyección de biocida (47-ME-001), un paquete de inyección inhibidor de corrosión (47-ME-002), un paquete de inyección de cloro (47-ME-003), un paquete de inyección de ácido sulfúrico (47-ME-004), un paquete de inyección de dispersante (47-ME-005), un paquete de inyección de surfactante/dispersante (47-ME-006), intercambiadores de calor entre otros equipos.

Cabe considerar que dicho sistema de enfriamiento requiere de agua de reposición para reemplazar las pérdidas debidas a la evaporación, purga, arrastre y escape. El agua de reposición proviene de dos fuentes: agua de servicios industriales (en la unidad 44) y el agua de rechazo del proceso de osmosis inversa RO (en la unidad 42). La reposición del agua de servicios se realiza mediante control de nivel en la sección de los tambores de recirculación. Sin embargo, no se controla el flujo del rechazo de la Unidad de RO. La unidad 47 (donde se encuentra la torre de enfriamiento) acepta la corriente entera de agua residual que se produce en la Unidad de RO. El agua de reposición promedio se determina por la combinación de estas dos corrientes. Ya que ambas corrientes tienen diferentes propiedades, la calidad del agua de reposición promedio dependerá de los caudales relativos de estas dos corrientes.

La calidad del agua de enfriamiento es controlada indirectamente por la tasa de purga basada en el control de la conductividad y por la adición de productos químicos. La formación de depósitos y el potencial de corrosión son dos de los más importantes parámetros en la calidad del agua. La formación de depósitos hace referencia a la deposición de sales minerales en la superficie de los intercambiadores particularmente sulfato de calcio, hidróxido de magnesio, carbonato de calcio y silicatos.

Los depósitos reducen el intercambio de calor, taponan las líneas, incrementan las caídas de presión y reducen los caudales de enfriamiento. La solubilidad del sulfato de calcio se reduce a una temperatura más alta, por lo que la temperatura más alta del agua incrementa la tendencia de formación de depósitos. Los intercambiadores de calor que utilizan agua de enfriamiento se han diseñado con un límite de temperatura mayor ó igual a 120°F.

El pH deberá mantenerse en los rangos adecuados con el objeto de mantener la solubilidad de las sales disueltas en valores aceptables, sin embargo, la alcalinidad no debe eliminarse completamente por efecto de este control, la falta de alcalinidad puede hacer el agua muy corrosiva. Una capa delgada de calcio y carbonato de magnesio de protección inhibe la corrosión del acero al carbono. La corrosión del acero al carbono se reduce también por la adición de un inhibidor de corrosión (generalmente basados en cloruro de zinc, ácido carboxílico y ácido fosfórico).

#### **4.1.1 Torre de Enfriamiento**

La Torre de Enfriamiento consta de 6 celdas independientes, cada una con un ventilador y está diseñada para enfriar un total de 75,000 gpm de agua de enfriamiento de 120°F a 90°F operando con 5 celdas. Basado en los cálculos de

enfriamiento, la temperatura normal de retorno es 105°F. Por lo tanto, las celdas de enfriamiento tienen una capacidad de enfriamiento significativamente superior al requerimiento normal. Para minimizar el consumo de energía, los ventiladores de la torre de enfriamiento deben colocarse fuera de servicio, manteniendo la temperatura de suministro de agua de enfriamiento entre 85°F y 90°F. Todos los ventiladores deberán ser periódicamente rotados (con una frecuencia semanal) para mantenerlos en condición de operación óptima.

El agua de enfriamiento entra a la torre a través del cabezal de retorno. La temperatura normal de retorno esperada es de 105°F. La temperatura normal de retorno del agua usada para el diseño de la torre de enfriamiento es de 120°F.

Normalmente todas las 6 celdas de la torre están en operación. Sin embargo, la función hidráulica y térmica requerida se puede cumplir con 5 de las 6 celdas operando y así una celda pueda estar fuera de servicio sin afectar la operación. Cada celda de la torre de enfriamiento incluye un ventilador de tiro inducido, pero todos los ventiladores no están normalmente en servicio. El técnico del proceso mantiene la temperatura de suministro del agua de enfriamiento controlando el número de ventiladores en servicio.

#### **4.1.1.1 Requerimientos de Funcionamiento de la Torre de Enfriamiento**

La torre de enfriamiento y sus accesorios deberán funcionar de acuerdo con los requerimientos térmicos indicados en las hojas de datos (mostrada en el apéndice C), en operación continua y en todo el intervalo de servicio, dentro de las limitaciones de ruido y vibración del código o especificación pertinente.

Las piezas de la torre no deberán pandearse ni distorsionarse de ninguna otra forma debido a carga de agua, carga de viento o diferencias en temperatura durante la operación o espera en seco.

No deberán haber fugas apreciables de agua por los lados o extremos de la torre.

La pérdida por arrastre no deberá exceder el porcentaje especificado en hojas de datos. [14].

#### **4.1.2 Intercambiadores de Calor**

La red de intercambiadores que forman parte del sistema de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar esta conformada, en su mayoría, por intercambiadores del tipo carcasa y tubo. En la mayor parte de ellos el agua pasa por el lado tubo y el fluido a enfriar por el lado carcasa. En el caso del intercambiador 10-E-012 el fluido a enfriar pasa por el lado tubo y el agua de enfriamiento por el lado carcasa, adicionales a estos, pertenecen también al sistema de enfriamiento dos intercambiadores de placas (65-E-001-A y 65-E-001-B).

#### **4.1.3 Bombas de Agua de Enfriamiento**

La red de bombas del sistema de enfriamiento esta constituida por tres accionadas por turbinas de vapor y una accionada por motor, cada una de estas bombas cuenta con una capacidad de 27,500 gpm, suministran agua de enfriamiento a los usuarios. Las tres bombas accionadas por turbinas normalmente están en servicio, mientras que la accionada por motor está en posición de arranque automático, permanecerá como reserva para mantener el flujo de agua de enfriamiento. El técnico

del proceso tiene la flexibilidad para incrementar la disponibilidad de vapor de alta presión para otros usos del mejorador operando la bomba accionada con motor y colocando una de las bombas accionadas por turbina en modo de arranque automático.

#### **4.1.4 Filtros de Corriente Lateral Multimedia**

Con el objeto de remover sólidos suspendidos del agua de recirculación, dos filtros de corriente lateral del 50% están disponibles. Este sistema procesa 2250 gpm de agua de enfriamiento ( $\approx 3\%$  del total de la tasa de recirculación). Los filtros de corriente lateral son filtros multimedia de arena. Las partículas suspendidas se remueven del agua de enfriamiento a medida que el flujo de agua pasa a través de las capas del medio del filtro. Los filtros se someten a retrolavado en el sitio para remover los sólidos suspendidos acumulados. El sistema iniciará el retrolavado cuando la alarma de presión se active o la limpieza periódica se inicie basada en la duración predefinida.

#### **4.1.5 Sistemas de Inyección de Químicos**

Los sistemas tienen la capacidad de suministrar cloro, inhibidor de corrosión, biocida, dispersante y surfactante/dispersante al sumidero de la torre de enfriamiento. Un analizador de pH (en la línea de suministro de agua de enfriamiento) se usa para controlar el flujo proveniente de la bomba de inyección de ácido sulfúrico. Un control a distancia de arranque/parada, junto con un indicador del estado de operación de cada bomba dosificadora, está disponible. Cada paquete de inyección química tiene dos bombas de inyección al 100% que succionan de los tanques almacenamiento de químicos. La finalidad de cada uno de los productos químicos se muestra a continuación:

El Biocida no oxidante se provee para el control de bacterias, hongos y algas en el agua de enfriamiento.

El inhibidor de corrosión reduce la corrosividad del agua de enfriamiento. La Solución acuosa de cloro (biocida oxidante) controla el crecimiento biológico en el agua de enfriamiento. El cloro se provee en contenedores de una tonelada, destinados a producir cloro acuoso, y se inyecta en el fondo de la torre de enfriamiento. El cloro ataca a lo ancho del espectro de los agentes biológicos. El clorador está diseñado para una tasa de dosificación normal o para una tasa de cloración de impacto que puede mantenerse por una hora. El espacio está provisto para 6 recipientes de una tonelada: 2 en operación, 2 en espera, y 2 espacios de carga. El ácido sulfúrico al 99.8% se diluye en un sitio de mezclado y se alimenta en el sumidero de la torre de enfriamiento para mantener el pH apropiado del agua de enfriamiento.

El Dispersante de sólidos se utiliza para mantener los sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento.

El biodispersante no iónico para remoción y dispersión de depósitos de lodo. Como un surfactante, éste mejora la penetración de biocida y cloro en el fango. Como un dispersante, éste desaloja los microorganismos dentro del volumen del agua donde ellos son más fácilmente controlados por el biocida y el cloro.

#### **4.1.6 Variables del Proceso y Reacciones Químicas**

Esta sección describirá los procesos que tienen lugar en la Torre de Enfriamiento y así mismo se detalla el tratamiento químico.

La evaporación del agua de enfriamiento provee la función de enfriamiento. Ya que el proceso de evaporación remueve el agua pura, este concentra los minerales disueltos en el agua de enfriamiento remanente. Para mantener la concentración de impurezas, parte del agua de enfriamiento se remueve como purga. El agua de compensación se usa para reemplazar el agua que se pierde en la evaporización y el agua perdida en la purga.

El tratamiento del agua de enfriamiento intenta prevenir el crecimiento microbiano y reduce la desoxidación y el potencial de corrosión del agua de enfriamiento. La corrosión y desoxidación impiden la derivación del agua de enfriamiento y la adición de dispersante e inhibidor de corrosión. El crecimiento microbiano se impide por medio de la inyección de cloro, biocida y surfatante/dispersante. El ácido sulfúrico es utilizado para el control del pH, que afecta la corrosión, la formación de depósitos y el crecimiento microbiano.

## **4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS CONTROLES DEL PROCESO**

### **4.2.1 Control de Nivel y Bombas del Agua de Enfriamiento**

Cuando en el sistema de agua de enfriamiento, los filtros de corriente lateral se están retrolavando, la purga automáticamente se suspende para evitar el exceso de capacidad del sistema de alcantarillado de aceite accidental (AOS). La purga también se suspende completamente si el sumidero de la torre de enfriamiento desciende a un nivel bajo.

La conductividad del agua de enfriamiento es una medida indirecta de la concentración de minerales. El analizador de conductividad controla el setpoint para el lazo de control del flujo de purga. Los controladores de nivel (47-LIC-001-A y 47-

LIC-001-B) se proveen para controlar la cantidad de agua en el sumidero de la torre. El 47-LIC-001-A controla el grado de reposición para mantener el nivel de agua dentro de la torre de enfriamiento.

Están instaladas al sistema de agua de enfriamiento tres bombas accionadas por turbinas que normalmente se hallan en estado operativo y una cuarta bomba accionada por motor que se encuentra en condición de espera automática, es decir, es la de respaldo por si alguna de las tres primeras fallas o se presenta alguna condición que amerite que las cuatro bombas estén en funcionamiento como por ejemplo cuando se detecte un flujo bajo de agua de enfriamiento en el cabezal de descarga combinada.

#### **4.2.2 Control del Ventilador y Paro de Vibración de la Torre de Enfriamiento**

La torre de enfriamiento tiene 6 celdas. Cada ventilador tiene un interruptor local de bloqueo en la plataforma, un interruptor local de arranque/parada a nivel, y capacidad a distancia de arranque/parada manual desde el DCS. Cada celda tiene un ventilador de velocidad simple el cual puede encenderse o apagarse para controlar la temperatura de suministro de agua de enfriamiento. Adicionalmente cada ventilador podría arrancarse o pararse manualmente desde el DCS. Cada ventilador tiene un interruptor de alta vibración que desactivara el funcionamiento del ventilador para prevenir daños. El interruptor de vibración deberá ser reajustado localmente después de haberse parado. Los indicadores de estado del DCS muestran cuando los ventiladores están operando. También se proveen alarmas de alta vibración del DCS.

#### **4.2.3 Distribución del Agua de Enfriamiento del Mejorador PDVSA Petropiar**

El sistema de agua de enfriamiento es un sistema de recirculación de lazo abierto de agua fresca diseñado para cumplir con los requerimientos del agua de enfriamiento para todos los usuarios del Mejorador

El sistema de agua de enfriamiento está diseñado para distribuir 75,000 gpm de agua de enfriamiento a 90°F con un máximo de temperatura de retorno de 120°F. La torre de enfriamiento tiene 6 celdas, cada una diseñada para enfriar 15,000 gpm (una celda es de reserva, pero normalmente todas las celdas están en funcionamiento). Se cuenta con 3 bombas operando y 1 bomba de reserva de agua de enfriamiento diseñada para 25,000 gpm.

Las bombas de agua de enfriamiento deben operar cerca al punto estimado para mantener el NPSH disponible mayor que el NPSH requerido. Así, con las bombas operando, el caudal total de agua de enfriamiento debe mantenerse entre 75,000 gpm y 82,500 gpm.

La red hidráulica del agua de enfriamiento ha sido elaborada para estimar el flujo agua de enfriamiento de los usuarios principales. Los caudales estimados se calcularon utilizando el flujo definido de tres bombas de agua de enfriamiento (82,500 gpm) y la distribución de flujo como se describe en la tabla 4.1

**Tabla 4.1 Distribución del agua de enfriamiento.** Fuente: Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven (actual PDVSA Petropiar).

Tag del Equipo	Nombre	Entalpía (MMBtu/h)	Flujo de Diseño (gpm)	Caída de Presión de Diseño (psi)	Vo. Flujo Estim. (gal/min)	% Flujo de Diseño
10-E-012	Enfriador del Efluente del Desalador	18.1	1220	5.3	1,696	139%
10-E-019 A	Precondensador de Superficie	13.1	5750	6.9	6,658	116%

Tag del Equipo	Nombre	Entalpía (MMBtu/h)	Flujo de Diseño (gpm)	Caída de Presión de Diseño (psi)	Vo. Flujo Estim. (gal/min)	% Flujo de Diseño
10-E-019 B	Precondensador de Superficie	13.1	5750	6.9	6,421	112%
10-E-019 C	Precondensador de Superficie	13.1	5750	6.9	6,592	115%
10-E-020 A	Intercondensador de Superficie	27.1	4075	5.6	4,819	118%
10-E-020 B	Intercondensador de Superficie	27.1	4075	5.6	4,700	115%
10-E-020 C	Intercondensador de Superficie	27.1	4075	5.6	4,825	118%
10-E-021 A	Postcondensador de Superficie	12.0	1675	3.7	1,840	110%
10-E-021 B	Postcondensador de Superficie	12.0	1675	3.7	1,721	103%
10-E-021 C	Postcondensador de Superficie	12.0	1675	3.7	1,767	106%
10-E-024	Enfriador de Gas de Desecho	3.7	550	3.6	724	132%
12-E-001 A	Enfriador Compensador del Tope del Fraccionador	33.6	3622	13.7	3,622	100%
12-E-001 B	Enfriador Compensador del Tope del Fraccionador	Incluido en A	3622	13.7	3,635	100%
12-E-006A/B	Compresor Interetapa del Condensador	28.7	1339	13	1,563	117%
12-E-006C/D	Compresor Interetapa del Condensador	Incluido en A	1339	13	1,548	116%
14-E-005	Condensador de Superficie	66.4	4424	10	4,984	113%
15-E-001 A/B	Condensador Compensador del Separador	10.8	762	12.1	1,106	145%
15-E-003 A/B	Condensador del Compresor del Debutanizador	6.5	520	13.7	663	128%
15-E-007 A/B	Condensador del Detanizador	1.7	170	13.4	232	137%
15-E-009 A/B	Enfriador de los Fondos del Detanizador	1.9	125	13.6	176	141%
15-E-011	Enfriador de Gas de Compensación	4.1	820	11.5	964	118%

Tag del Equipo	Nombre	Entalpía (MMBtu/h)	Flujo de Diseño (gpm)	Caída de Presión de Diseño (psi)	Vo. Flujo Estim. (gal/min)	% Flujo de Diseño
15-E-012	Enfriador Compensador de la Descarga de la Primera etapa	5.9	1185	5.6	1,332	112%
15-E-013	LPG Enfriador Contactador de Amina	2.4	302	12.5	371	123%
15-E-016 A-C	Enfriador Compensador de la Mezcla de Residuo de Vacío	47.9	2940	13.3	3,383	115%
15-E-016 D-F	Enfriador Compensador de la Mezcla de Residuo de Vacío	Incluido en A	2940	13.3	3,495	119%
15-E-017	Enfriador Compensador de los Fondos del Despojador	4.9	652	13	874	134%
16-E-005	Condensador de Superficie	48.7	3244	10	3,893	120%
18-E-001A/B	Enfriador de Alta Presión	20.1	1346	14.8	1,370	102%
18-E-002	Enfriamiento Intermedio Primario del Absorbedor	3.9	527	8.9	660	125%
18-E-006	Condensador de la Columna de Aceite Rico	18.2	1747	6.06	2,081	119%
18-E-008	Enfriador Compensador de Aceite de Esponja	2.0	272	9.9	341	125%
18-E-009	Condensador del Tope del Depropanizador	4.2	412	14.9	450	109%
18-E-010	Enfriador Compensador de Aceite Pobre	4.7	627	7.9	871	139%
18-E-011	Enfriador de los Fondos del Depropanizador	3.6	240	10.4	378	158%
22-E-105	Enfriador Compensador del Proceso	8.6	863	14.5	974	113%
22-E-106	Enfriador de Recirculación	2.5	168	8.9	257	153%

Tag del Equipo	Nombre	Entalpía (MMBtu/h)	Flujo de Diseño (gpm)	Caída de Presión de Diseño (psi)	Vo. Flujo Estim. (gal/min)	% Flujo de Diseño
22-E-205	Enfriador Compensador del Proceso	8.6	863	14.5	972	113%
22-E-206	Enfriador de Recirculación	2.5	168	8.9	238	142%
24-E-103	No. 1 Enfriador Compensador del Regenerador	4.4	782	10.6	1,078	138%
24-E-203	No. 2 Enfriador Compensador del Regenerador	4.4	782	10.6	1,080	138%
28-E-108	Enfriador de Purga	0.7	76	8.1	138	182%
28-E-208	Enfriador de Purga	0.7	76	8.1	139	183%
28-E-308	Enfriador de Purga	0.7	76	8.1	137	180%
30-E-001A/B	Enfriador Compensador de Agua de Enfriamiento Brusco	15.5	1556	8	1,751	113%
30-E-002A/B	Enfriador Compensador de MDEA Pobre	9.5	802	15	904	113%
43-E-001	Enfriador de Condensado del Tambor Flash	26.8	1783	3	2,113	118%
46-ME-001A IC & OC	Paquete No 2 Enfriadores Intermedios & Enfriador de Aceite	0.7	291	5	295	101%
46-ME-001A AC	Paquete No2 Enfriadores Posteriores	0.5	189	3	208	110%
46-ME-001B IC & OC	Paquete N2 Enfriadores Intermedios & Enfriador de Aceite	0.7	291	5	299	103%
46-ME-001B AC	Paquete N2 Enfriadores Posteriores	0.5	189	3	210	111%
46-ME-001C IC & OC	Paquete N2 Enfriadores Intermedios & Enfriador de Aceite	0.7	291	5	296	102%
46-ME-001C AC	Paquete N2s Enfriadores Posteriores	0.5	189	3	208	110%
57-E-001	Enfriador de Desechos del Mechurrio HP	2.5	170	11.7	251	148%

Tag del Equipo	Nombre	Entalpía (MMBtu/h)	Flujo de Diseño (gpm)	Caída de Presión de Diseño (psi)	Vo. Flujo Estim. (gal/min)	% Flujo de Diseño
57-E-002	Enfriadores de Desechos del Mechurrio LP	2.5	170	11.7	250	147%
63-E-002	Enfriador de Desechos Livianos	6.0	400	11.8	561	140%
65-E-001	Intercambiador de Calor de Aguas Residuales	5.0	2000	10 (est.)	2,553	128%
FLUJO TOTAL DE BOMBA: 82500 gpm (27500 gpm cada una, o caudal de flujo de bomba) CABEZA DE BOMBA: 154 pies DISEÑO DE TORRE DE ENFRIAMIENTO = 1124.6 (MMBtu/Hr) Entalpía estimada para torre de enfriamiento requerida (MMBtu/Hr): 600						

#### 4.2.4 Calidad del Agua de Enfriamiento

El sistema debe seguir un programa integrado de tratamiento químico para controlar la formación de depósitos, la corrosión y el crecimiento microbiano en los intercambiadores y tuberías de agua de enfriamiento. En esta sección se describirá la calidad del agua de compensación, de agua de recirculación, y los flujos de agua de enfriamiento requeridos.

El sistema de agua de enfriamiento está diseñado para aceptar toda el agua de rechazo del sistema de osmosis inversa. La calidad del agua de rechazo se describe en la tabla 4.2 mientras que en la tabla 4.3 se detalla las condiciones y especificaciones de calidad y operación del agua proveniente del sistema de agua para servicios industriales.

#### **Tabla 4.2 Características de aguas de rechazo del sistema de osmosis inversa.**

Fuente: Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven (actual PDVSA Petropiar).

Componente	Concentración (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )
Calcio	12
Magnesio	4
Sodio	890
Sulfato	200
Cloruros	167
Silicio como SiO <sub>2</sub>	32

**Tabla 4.3 Condiciones y especificaciones de calidad y operación del agua para servicios industriales.** Fuente: Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven (actual PDVSA Petropiar).

Condiciones y Especificaciones de Calidad del Agua de Servicio Industriales	Valor
Presión mínima (psig)	75
Presión normal (psig)	90
Presión máxima (psig)	100
Temperatura mínimo (°F)	82
Temperatura normal (°F)	82
Temperatura máximo (°F)	86
Ca <sup>++</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	110 - 150
Mg <sup>+</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	12 - 25
Na <sup>+</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	30
K <sup>+</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	0
Aluminio, ppm como Al <sup>3+</sup>	0.1 - 0.3
Total hierro (ferroso), ppm como Fe <sup>2+</sup>	0.1-0.5
Cl <sup>-</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	18 - 42
Nitrato NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	0
Sulfato SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	25 - 50
Bicarbonato HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	104 - 136
Carbonato CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> , ppm como CaCO <sub>3</sub>	0
Sílice, ppm como SiO <sub>2</sub>	7.9
CO <sub>2</sub> , ppm como CO <sub>2</sub>	8
Ph	7.4 - 8.0
Conductividad, μ mhos/cm	240 - 392
Turbiedad, NTU	0.5 - 4.0
Color Actual	1 - 10

Cloro residual libre, ppm como Cl <sub>2</sub>	0.3 - 1.2
Sólidos Disueltos, ppm	140 - 240

La tabla 4.4 muestra las cantidades normal y máxima de Agua de Enfriamiento para diferentes unidades del mejorador.

**Tabla 4.4 Requerimientos del agua de enfriamiento** Fuente: Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven (actual PDVSA Petropiar).

No. Unidad	Unidad	Agua de Enfriamiento (gpm)	
		Normal	Máximo
10	Unidad de Crudo	19620	19620
12	Coker	8663	9089
14	Hidrotratadora de Aceite Liviano	4614	4614
15	Soporte de Hidroprocesamiento	12618	12618
16	Hidrocraqueador de Gasóleo	3454	3454
18	Planta de Gas	5272	5272
22	Unidad de Producción de Hidrógeno	2811	2811
24	Unidad de Regeneración de Aminas	1584	1584
26	Despojador de Agua Agria	32	32
28	Unidad de Recuperación de Azufre	227	227
30	Unidad de Tratamiento de Gas de Cola	2357	2357
32	Granulación de Azufre	0	0
41	Generación de Vapor	7	162
42	Sistema de Osmosis Inversa	20	20
43	BFW y Recuperación de Condensado	1783	1783
44	Agua Potable & de Servicios	0	0
45	Sistema de Gas Combustible	0	0
46	Sistema de Aire de Planta/Instrumentos	1216	1216
47	Sistema de Agua de Enfriamiento	60	60
48	Gas Inerte (N <sub>2</sub> Vaporización)	0	0
51	Sistema de Aceite de Lavado	0	0
52	Generación de Energía de Emergencia	0	0
57	Sistema de Alivio	370	370
61	Sistema de Patio de Tanques	10	15
63	Sistema de Aceite de Desecho	400	400

No. Unidad	Unidad	Agua de Enfriamiento (gpm)	
		Normal	Máximo
64	Unidad de Carga de Azufre	0	0
65	Tratamiento de Aguas Residuales	2000	2000
66	Tratamiento de Desechos Sanitarios	0	0
67	Sistema de Protección Contra Incendio	0	0
68	Carga de Coque	0	0
90	Transferencia de Alimentación y Productos	0	0
	Usos Misceláneos del Agua de Enfriamiento		
	Filtro de Agua de Enfriamiento	2250	2250
	Purga	480	700
	Total Consumo/(Producción)	69855	70622
	Diseño	-	75000

#### **4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS EQUIPOS QUE FORMAN PARTE DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE AGUA DEL MEJORADOR PDVSA PETROPIAR**

La recolección de los valores de los parámetros operacionales de los equipos que intervienen en el circuito del sistema de agua de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar varió según el equipo evaluado.

La medición de flujo del lado agua en los intercambiadores de calor se realizó utilizando un caudalímetro ultrasónico portátil para líquidos con montaje por el exterior de la tubería sin perforaciones, llamado también medidor de flujo ultrasónico (marca G.E. modelo PT878). Las mediciones de temperatura se realizaron de las siguientes formas: para el lado agua se utilizó de un pirómetro (pistola para medir temperatura) y los de lado proceso con el uso de un programa de monitoreo llamado Aspen Process Explorer el cual da un registro minuto a minuto del cambio de las

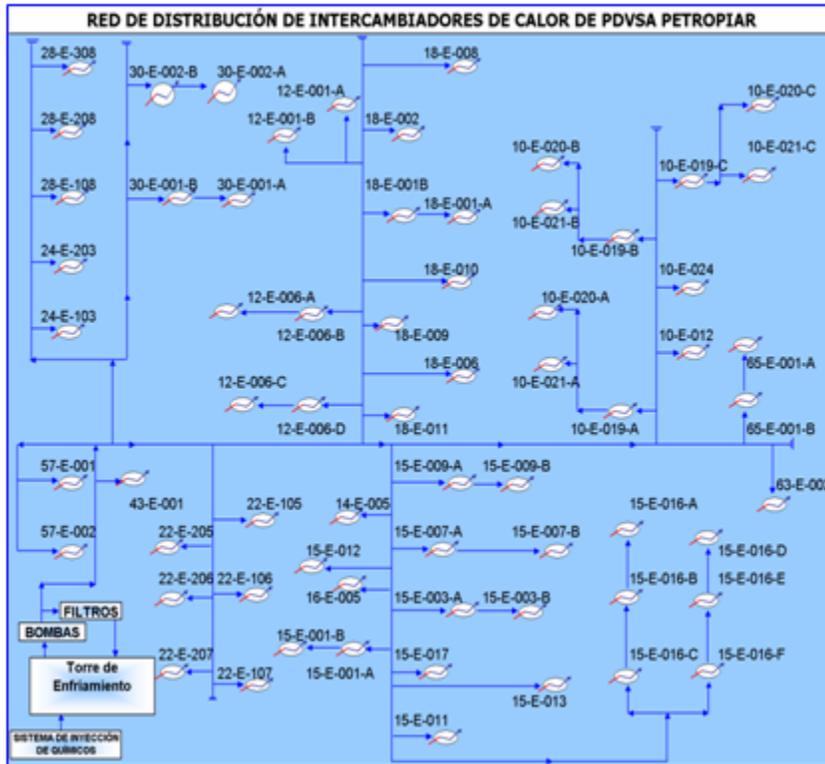
variables, este programa toma los valores directamente de consola a través de un sistema computarizado, mostrando los datos en tiempo real.

En el caso de la recolección de las condiciones del agua de enfriamiento se realizaron pruebas de laboratorio que permitieron evidencia los valores actuales de la misma para su posterior comparación con los establecidos en el diseño.

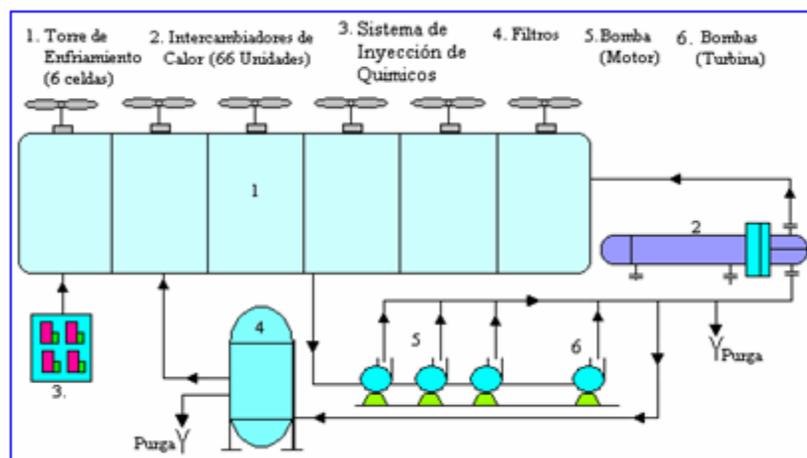
#### **4.3.1. Levantamiento de la Ubicación en Planta de los Intercambiadores de Calor en Estudio**

Se procedió a plasmar en un solo documento la posición de los intercambiadores de calor en estudio tomando en cuenta a que área y unidad pertenecían así como también en que posición estaban colocados entre ellos (serie o paralelos), con la finalidad de tener una visión amplia de cómo circulaba el agua de enfriamiento de la torre.

La actividad descrita en el párrafo anterior se realizó con la ayuda de los diagramas de flujo de procesos, planos de instrumentación (P&ID, última revisión) e isométricos documentados en la intranet del mejorador PDVSA Petropiar. El documento generado se muestra en la figura 4.1



*Figura 4.1 Esta figura muestra como están distribuidos cada intercambiador en el mejorador PDVSA Petropiar, las líneas y flechas indican el suministro de agua de enfriamiento desde que sale de la torre. Fuente: Elaboración propia.*



***Figura 4.2 Recorrido del agua a través de los equipos que conforman el sistema de enfriamiento.*** Fuente: Elaboración propia.

#### **4.3.2 Recolección de Datos de Diseño de los Equipos Evaluados**

Las condiciones de diseño de los equipos evaluados como: intercambiadores de calor, torre de enfriamiento, bombas, ventiladores y filtros que intervienen en el sistema de enfriamiento del mejorador PDVSA Petropiar fueron obtenidos a partir de la hoja de datos del fabricante (data sheets) de cada equipo, encontrada en los manuales de operación y planos de procesos de la planta que son facilitados solo al personal de trabajo por medio de una red de información interna.

En estos documentos se encuentran valores de parámetros operacionales como: potencias, caudales manejados, propiedades físico-químicas de los fluidos que intercambian calor, presiones, transferencia de calor de cada equipo, material de fabricación, modelo (según las normas TEMA), número de tubos, número de pasos, densidades, temperaturas (tanto de entradas como de salidas), entre otras variables, todas estos últimos parámetros tanto para el lado tubo como el lado carcasa de en el caso de los intercambiadores de calor.

#### **4.3.3 Recolección de Datos de Operación**

Los datos o condiciones operacionales de los equipos se obtuvieron a través de varias formas:

Mediante la utilización de un medidor de flujo ultrasónico y un pirómetro los cuales se detallan en el apéndice A de este trabajo.

El uso de una herramienta o programa de monitoreo llamado Aspen Process Explorer, el cual arroja datos reales minuto a minuto de las variables operacionales producidas en el campo y en tiempo real del cual se tomaron los valores de temperatura correspondientes al lado proceso (para el caso de los intercambiadores de calor) y ciertas características de funcionamiento de la torre de enfriamiento.

Realización de pruebas de laboratorio del agua de enfriamiento de la torre para determinar su composición y calidad.

Toma de medidas de los valores de presión y temperatura directamente de los indicadores asociados a los equipos evaluados en el área.

Todos los equipos y programas utilizados son propiedad de PDVSA Petropiar.

#### **4.3.4 Diseño de Hoja Para la Recolección de Datos en Intercambiadores de Calor**

Se elaboró una hoja o tabla la cual describe por área y tag de equipos las variables de caudal y temperatura medidos.

Para realizar las medidas o toma de datos se siguió la siguiente metodología:

Visitas diarias a los diferentes equipos a fin de tomar medidas.

Elaboración de promedios ponderados de las medidas tomadas con la finalidad de minimizar los errores de lectura tanto humanos como de instrumentos.

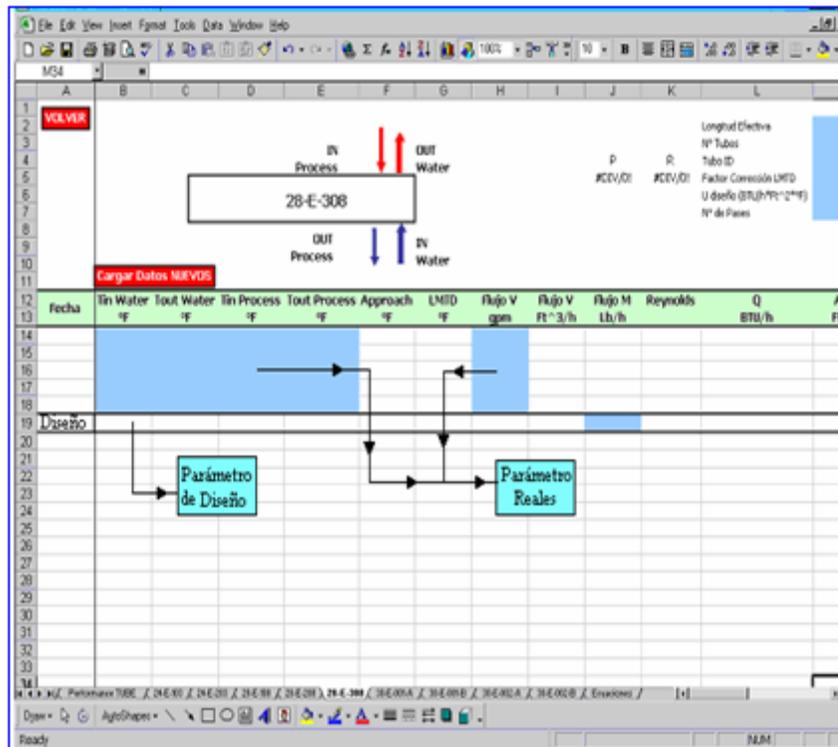
En la tabla 4.5 se muestra una parte de esta hoja de datos y en el apéndice B se aprecia en su totalidad. Cabe destacar que la recolección y manejo de los datos reales es crucial para la producción de resultados pues de estos depende la veracidad de la evaluación del sistema de enfriamiento de agua.

**Tabla 4.5 Muestra de valores de caudales y temperaturas (reales) en intercambiadores de calor.** Fuente: Elaboración propia

Caudales y Temperaturas en Intercambiadores (c.w.) PDVSA Petropiar											
Área	Tag Equipo	D. N. (in)	Schedul e.	Lado Agua de Enfriamiento				Lado Proceso			
				Fecha Q (gpm) V (ft/s) T. 1 (F) T. 2 (F)	Fecha Q (gpm) V (ft/s) T. 1 (F) T. 2 (F)	Fecha Q (gpm) V (ft/s) T. 1 (F) T. 2 (F)	Prom. Q (gpm) V (ft/s) T. 1 (F) T. 2 (F)	Fecha T. 1 (F) T. 2 (F)	Fecha T. 1 (F) T. 2 (F)	Fecha T. 1 (F) T. 2 (F)	Prom. T. 1 (F) T. 2 (F)
Azufre	24-E-203	6	STD WT 40	02/06/08	19/06/08	08/07/08		02/06/08	19/06/08	08/07/08	
				705.4	4475.0	685.3.	1955.23				
				7.83	28.06	7.61	14.50				
				87.5	82.0	83.0	84.17	150.65	146.07	146.43	147.72
				94.0	87.0	87.0	89.33	108.91	106.05	104.88	106.61
Coker	18-E-008	6	STD WT 40	03/06/08	16/06/08	01/07/08		03/06/08	16/06/08	01/07/08	
				408.8	396.5	403.3	402.87				
				4.57	4.41	4.49	4.49				
				78.0	84.0	83.0	81.67	104.00	135.80	124.20	121.33
				96.0	94.0	91.0	93.67	89.10	96.90	94.80	93.60
Hidro-procesos	15-E-012	8	STD WT 40	27/05/08	5/6/2008	28/07/08		27/05/08	5/6/2008	28/07/08	
				1400	1830.4	1649.5	1626.63				
				8.98	11.72	10.58	10.43				
				84.6	84	84	84.20	173.12	173.50	172.00	172.87
				88.2	91	95	91.40	99.03	97.83	98.00	98.29

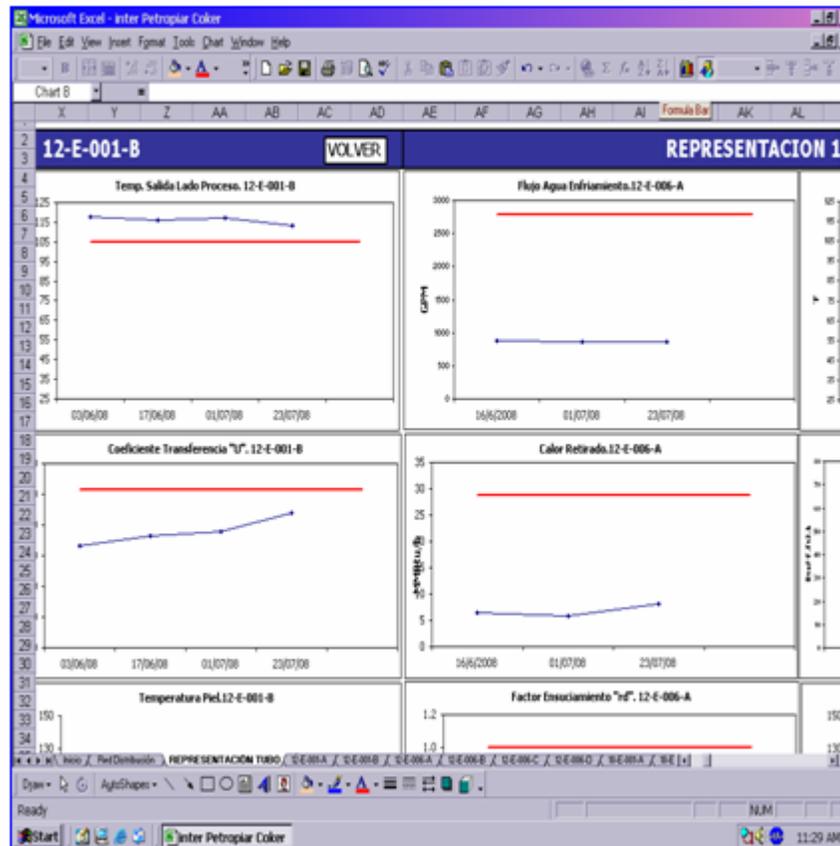
#### 4.3.5 Diseño de Herramienta para Evaluar el Funcionamiento de los Intercambiadores de Calor

Para la realización de esta herramienta se empleo el programa Excel donde se colocaron los parámetros de diseño como: longitud, diámetros externo e interno, cantidad de tubos número de pasos, coeficiente global de transferencia de calor, flujo másico, temperaturas de entrada y salida de los fluidos involucrados y parámetros operacionales recogidos en el campo como: caudales de agua manejado y temperaturas de entradas y salidas tanto de lado agua como de lado proceso. La herramienta permite generar una serie de valores de variables de funcionamiento (como: calor retirado, coeficiente de transferencia de calor, factor de ensuciamiento, temperatura de piel y velocidades dentro de los tubos, temperatura media logarítmica, eficiencia, número de Reynolds) mediante la aplicación de formulas pertinentes de mecánica de los fluido s y transferencia de calor. Lo cual permitieron cotejar los valores teóricos con los reales para posteriormente evidenciar las desviaciones entre ambas datas. La herramienta permite crear gráficas de ciertos parámetros en función de las fechas de recolección de los valores reales que nos permitieron ver de una manera mas práctica, sencilla y directa el funcionamiento de los equipos evaluados y en función a las desviaciones decidir cuales de ellos necesitan de intervención para mejorar su operatividad empleando para ellos algunos criterios para demostrar la criticidad de estos. Cabe acentuar que esta herramienta es de fácil aplicación y que podrá ser manejada por el personal que labore y así lo requiera dentro de las instalaciones de mejorador PDVSA Petropiar. A continuación, en las figuras 4.3 y 4.4 se presentan unas muestras de dicha herramienta.



*Figura 4.3 Muestra de la hoja de cálculo para cada intercambiador de calor. Las celdas con fondo azul son las que deben ser llenadas con los parámetros de diseño y los reales para la posterior generación de las demás variables. Fuente:*

Elaboración propia



*Figura 4.4 Muestra de las gráficas generadas para la fácil interpretación de los resultados. Las líneas rojas corresponden a los valores de diseño mientras que las azules a los valores reales (los cuales en algunos casos fueron recogidos mediante la utilización de equipos y en otros casos fueron calculados).*

Fuente: Elaboración propia

#### **4.3.6 Criterios Utilizados para Evidenciar Desviaciones del Funcionamiento de los Intercambiadores de Calor**

La desviación los de parámetros que afectan el funcionamiento de los intercambiador de calor dependerá de las variaciones que presenten los datos de

diseño con los de funcionamiento actual. Algunos de los que se tomaron en cuenta para esta evaluación fueron:

- Altas velocidades ( $> 7$  ft/s), estas podrían generar cierta tendencia a la corrosión por erosión, arrastre, desgaste en la superficie.
- Bajas velocidades ( $< 2$  ft/s), propician tendencias a la deposición y ensuciamiento, por sólidos en suspensión que suelen adherirse a las superficies con las que están en contacto.
- Altas Temperaturas ( $>122$  °F/ $50$  °C) debido a que a partir de este valor se inicia la precipitación de sales como el carbonato de calcio, de acuerdo a la solubilidad de las sales en el agua y al mismo tiempo se tomarán en cuenta las temperaturas a la cual deberían salir los fluidos a enfriar.
- Tubos de diámetros pequeños, ocasionan una alta caída de presión, aumenta la velocidad del fluido.
- Equipos en posición vertical, estos suelen presentar corrosión en su parte baja debido a los sólidos suspendidos que se favorecen por efecto de la gravedad.
- La compatibilidad del tipo de material de construcción del intercambiador (entre los que se pueden nombrar: aceros inoxidable, cobre, cobre-níquel, titanio) y los fluidos con los que está en contacto. Cada uno de los materiales mencionados presenta un comportamiento en particular dependiendo del medio en el que se encuentre, en algunos casos se pudiera llegar a la degradación del mismo.
- Intercambiadores de placas, debido a que son compactos facilita la deposición de partículas.
- Agua de enfriamiento por la carcasa, en este caso el agua debe ocupar un diámetro mayor lo que aumentara el área disponible para su paso dentro del equipo, esto generara bajas velocidades y al mismo tiempo sus consecuencias.

#### **4.3.7 Pruebas y Evaluaciones Asociadas a la Torre de Enfriamiento**

A la torre de enfriamiento se le efectuó una serie de pruebas que puso en manifiesto su funcionamiento actual. Se realizaron varias visitas de inspección a la estructura de la torre lo cual permitió evidenciar las condiciones de esta, que tan efectivo estaba funcionando el biocida en cuanto al control de limo, bacterias y algas que se detectan a simple vista.

Se le realizaron entrevistas al personal de operaciones y mantenimiento encargados de velar por el buen funcionamiento de la torre de enfriamiento y los equipos asociados a esta como las bombas, filtros, motores, entre otros.

Se efectuó una serie de pruebas de laboratorios (con frecuencias de una semanal por dos meses con la finalidad de promediar los resultados producidos y que sean lo más confiable posible) a cientos parámetros operacionales, desde el punto de vista químico, como: pH, conductividad, cloruros, turbidez, sílice, hierro soluble, sulfato, polímero activo, alcalinizad, entre otros cuyos valores fueron posteriormente cotejados con los mostrados en la hoja de datos del fabricante de la torre de enfriamiento la cual se puede verificar en el apéndice C de este trabajo.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Después de haber recopilado todas las hojas de datos de diseño y la información del funcionamiento real de los equipos evaluados, se procedió a compararlas y poner en manifiesto las diferencias existentes entre ambas, buscando con esta actividad ver que tanta discrepancias presentaba una con respecto a la otra, saliendo a flote la calidad del agua que circula por el sistema, cuales son los intercambiadores de calor críticos (los que requieren intervención), el estado de la torre de enfriamiento, de los motores, de las bombas, de los ventiladores, de los filtros y de los paquetes de inyección de químicos que conforman el sistema de enfriamiento de agua del mejorador PDVSA Petropiar.

Los resultados arrojados de este cotejamiento fue la base de la discusión de resultado de la presente evaluación.

#### **5.1 Torre de Enfriamiento**

Se le realizaron inspecciones visuales a la estructura de la torre de enfriamiento, se ejecutaron pruebas de laboratorio al agua y se evaluaron los principales equipos que la conforman el sistema como lo son: ventiladores, bombas, sistemas de inyección de químicos y filtros con la finalidad de saber como se encontraban en la actualidad dejando en evidencia lo siguiente:

El Biocida oxidante y no oxidante agregado al agua de enfriamiento de la torre esta haciendo su función (control de bacterias, hongos y algas) debido a que se ve claramente como la estructura (madera) dentro de la torre se encuentra limpia, no presentando esta pulcritud en las zonas húmedas que están expuestas al aire donde el

agua es fácilmente evaporada y no le da tiempo al biocida de ejecutar su labor (en este espacio el aspecto es verdoso).

En la actualidad solos cinco ventiladores están en funcionamiento y como dice la hoja de diseño de la torre, ella puede trabajar con esa cantidad pero el sexto ventilador esta totalmente fuera de servicio por lo que si se genera un imprevisto con cualquiera de los que están activo se pondría en riesgo la cantidad de calor que se debería extraer del agua y por ende no se garantiza de que recorra nuevamente el circuito de enfriamiento con las características operativas requeridas.

Por el punto antes explicado no se cumple con la recomendación del fabricante de la torre de enfriamiento que dice que se puede colocarse fuera de servicio uno de los seis ventiladores por semana y dejar cinco en funcionamiento ya que este número de unidades puede cumplir con las funciones hidráulicas y térmicas requerida para los distintos proceso y así una celda estará fuera de servicio permitiendo prolongar la vida útil de estos equipos.

A continuación se muestran las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 que reflejan las veces que a la torre, bombas o filtros que forman parte del sistema de enfriamiento de agua a presentado alguna eventualidad, recibido mantenimiento (bien sea preventivo o correctivo) o han sido sujetas a inspecciones.

Los paquetes de inyección de químicos no se encuentran en estas tablas debido a que el suministro y control de estos están a cargo de compañías especializadas en ese ramo y son ellas las que velan por el buen funcionamiento de dichos paquetes.

**Tabla 5.1 Esta tabla muestra las actividades realizadas a la torre de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo.**Fuente: Sistema Operativo Meridium.

Tag	TIPO DE TRABAJO	DESCRIPCIÓN	FECHA
47-CT-001	Logística	Apoyo descarga de químicos para torre enfriamiento	10/25/04
	Mantenimiento Correctivo	Limpieza de maderas en lado sur torre de enfriamiento	10/28/04
	Mantenimiento Correctivo	Revisión, acondicionamiento y mantenimiento de instrumentación asociado al sistema de la torre	03/08/05
	Logística	Movimiento quincenal de hipoclorito para la torre de enfriamiento	08/08/05
	Logística	Instalar andamios en la 47-CT-001 para colocar 2 ton de hipoclorito	08/16/05
	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de válvula check en línea de dosificación de ácido a la torre de enfriamiento	09/19/05
	Mantenimiento Correctivo	Cambio de membrana de válvula de sistema de diluvio de unidad 47	11/09/05
	Mantenimiento Correctivo	Mantenimiento trampas de vapor área 70	11/29/05
	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de válvula asociada al sistema de rociadores modelo F3021.	01/04/06
	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de válvula 1" atascada entrada de vapor a la turbina 47-P-001-c	01/19/06
	Mantenimiento Correctivo	Agregar Soda cáustica a torre de enfriamiento	05/17/06
	Mantenimiento Correctivo	Realizar limpieza de las rejillas en la 47-CT-001	06/19/06
	Mantenimiento Correctivo	Cambio de las válvulas de bloqueo del sistema de agua contra incendio de los ventiladores 47-CTM-001A/B/C	09/19/06
	Mantenimiento Correctivo	Chequear y reparar sistema de diluvio de la 47-CT-001	08/07/07
	Mantenimiento Correctivo	Fabricación de Diques para Químicos	08/20/07

**Tabla 5.2 Esta tabla muestra las actividades realizadas a las cuatro bombas que forman parte del sistema de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo. Fuente: Sistema Operativo Meridium.**

Tag	TIPO DE TRABAJO	DESCRIPCIÓN	FECHA
47-P-001A	Evento	Realizar ajuste de la válvulas de cierre rápido de vapor	05/18/05
	Inspección	Reemplazo Elemento Filtrante 47-P-001A	08/10/05
	Logística	Recomendaciones para solucionar falsa alarma censor 47_XT_106 presente en caja reductora 47-P-001A	08/27/05
	Mantenimiento Preventivo	Limpieza de Pantallas Ubicadas en la Succión de las Bombas 47-P-001 A/B/C/D	10/19/05
	Mantenimiento Preventivo	Chequeo y/o corrección de alineación 47-P-001 <sup>a</sup>	11/18/05
	Mantenimiento Correctivo	Revisar la 47-PG-001A Bomba de Lubricación 47-P-001A	11/24/05
	Mantenimiento Preventivo	Reemplazo de Elementos de Filtros 47-P-001A	11/29/05
	Logística	Reemplazo Filtro de Aceite 47-P-001A	08/27/08
47-P-001B	Proyecto	Revisar y/o corregir escape de aceite cojinete caja engranaje lado turbina de 47-P-001B.	03/17/05
	Evento	Verificar causa de alarma 47-XAH-147 Alta vibración carcasa Bomba 47-P-001B Unidad 47	03/31/05
	Evento	Chequear 47-PDI-143	11/29/05
	Logística	47-P-001B. Ajustar probetas de vibración en turbina lado libre.	03/14/06
47-P-001C	Mantenimiento Preventivo	Inspección y/o Corrección de Alineación 47-P-001C	11/22/05
47-P-001D	Logística	Reponer tornillos de alineación (gatos) motor bomba 47-p-001d	01/13/05
	Evento	revisión de las conexiones de las RTD,s del motor	01/14/05
	Evento	47-P-001D, corregir fuga por descarga de la bomba	08/04/05
	Evento	Reemplazo Junta Expansión Descarga Bomba CW 47-P-001D	12/08/05
47-P-001D	Evento	Reemplazo Junta de Expansión Descarga 47-P-001D	03/03/06
	Evento	Evaluación detallada del montaje de la junta de expansión 47-P-001D	04/07/06
	Evento	Reemplazar la junta de expansión asociada a 47-P-001D	05/31/06
	Evento	47-P-001D Reemplazar junta de expansión de 30" instalada en descarga de la bomba.	11/07/08

**Tabla 5.3 Esta tabla muestra las actividades realizadas a los filtros que forman parte del sistema de enfriamiento. Indica el tipo de trabajo, la fecha de ejecución y la descripción del mismo.** Fuente: Sistema Operativo Meridium.

Tag	TIPO DE TRABAJO	DESCRIPCIÓN	FECHA
47-F-001A	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de abrazaderas, limpieza y lubricación	12/21/07
47-F-001B	Mantenimiento Correctivo	Reemplazo de abrazaderas, limpieza y lubricación	5/26/08

Es de hacer notar que de las fallas o eventos reflejados en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 pocas resultaron de gran impacto para la operatividad del sistema de enfriamiento y en su mayoría son actividades de mantenimiento preventivo las cuales se realizan con la finalidad de evitar males mayores o la interrupción del proceso operativo.

### **5.1.1 Análisis de Laboratorios Efectuados al Agua de la Torre de Enfriamiento**

A continuación se muestran tres tablas en las que se reflejan los parámetros evaluados en la torre de enfriamiento a lo largo de diez semanas con la finalidad de promediar los valores y dar uno solo que sirva como punto comparativo con los que fueron mostrados en las tablas 4.2 y 4.3 de este trabajo (las cuales corresponden a las características de diseño del agua de la torre de enfriamiento) y poder así evidenciar las diferencias entre ambas datas.

En las tablas 5.4 y 5.5 se muestran varios valores en color rojo (cloro libre, polímero activo) lo cual indica que están fuera del margen permitido pero esta diferencia no es constante y al hacer un promedio de todos los resultados de las pruebas realizadas se nota que el valor resultante entra en el rango, dichas diferencias no son relevante para lograr alteraciones en el nivel de concentración de estas sustancias y por ende de la labor que realiza.

A manera general se nota en la tabla 5.6, que es la que muestran los valores de las pruebas de laboratorio pero promediados, que ningunos de los parámetros evaluados (pH, O-fosfato filtrado, O-fosfato s/filtrado, cloruros, sulfato, polímero activo alcalinidad, cloro libre, hierro soluble, sílice, turbidez, conductividad) se encuentran fuera del rango permitido, dicho de otra manera, el agua de enfriamiento de la torre cumple con los requerimientos químico teóricos de operación lo que quiere decir que no deberían haber problemas en el sistema relacionados con: incrustaciones, ensuciamientos, corrosiones o microorganismos (algas, limos u hongos).

**Tabla 5.4 En esta tabla se muestra los resultados de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento desde el 5 de agosto de 2008 hasta el 2 de septiembre de 2008.** Fuente: Elaboración propia

<b>Resultado da las Pruebas de Laboratorio Hechas al Agua de la Torre de Enfriamiento</b>							
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>	<b>5-Ago</b>	<b>12- Ago</b>	<b>19-Ago</b>	<b>26-Ago</b>	<b>2-Sep</b>
pH	Adm.	7,8 - 8,2	8.12	8.00	8.00	8.34	8.16
Conductividad	us/cm.	< 2800	1929	1867	1990	2041	1950
Cloruros	ppm	< 200	127	126	145	165	157
O-Fosfato Filtrado	ppm	6 - 10	7.5	10.2	9.8	9.1	11.0
O-Fosfato S/Filtrado	ppm	6 - 10	7.7	10.4	10.0	9.3	11.2
Cloro Libre	ppm	0,3 - 0,5	0.06	0.53	0.24	0.14	0.07
Turbidez	NTU	< 25	2	1	0	1	1
Sílice	ppm	< 200	60	48.3	49.1	46.1	54
Hierro Soluble	ppm	< 1	0.15	0.17	0.05	0.11	
Alcalinidad	ppm	< 350	110	70	90	100	100
Polímero Activo	ppm	8 - 12		8.1		6.7	5.6

**Tabla 5.5 En esta tabla se muestra los resultados de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento desde el 9 de septiembre de 2008 hasta el 7 de octubre de 2008 (continuación de la Tabla 5.4). Fuente: Elaboración propia**

<b>Resultado da las Pruebas de Laboratorio Hechas al Agua de la Torre de Enfriamiento (Continuación)</b>							
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>	<b>9-Sep</b>	<b>18-Sep</b>	<b>23-Sep</b>	<b>30-Sep</b>	<b>7-Oct</b>
pH	Adm.	7,8 - 8,2	8.10	8.20	8.20	8.20	8.20
Conductividad	us/cm.	< 2800	2010	2090	2080	1530	1962
Cloruros	ppm	< 200	175	167	164	117	122
O-Fosfato Filtrado	ppm	6 - 10	6.7	6.5	6.2	5.2	6.2
O-Fosfato S/Filtrado	ppm	6 - 10	6.9	6.9	6.6	5.4	6.4
Cloro Libre	ppm	0,3 - 0,5	0.20	0.80	0.05	0.80	0.07
Turbidez	NTU	< 25	2	2	2	2	1
Sílice	ppm	< 200	50.2	55.6	51.3	40	40
Hierro Soluble	ppm	< 1	0.2	0.16	0.16	0.11	0.1
Alcalinidad	ppm	< 350	90	100	100	100	100
Polímero Activo	ppm	8 - 12	12.8	9	10.6	8	8

**Tabla 5.6 Esta tabla muestra los valores promedios de las pruebas hechas al agua de la torre de enfriamiento con la finalidad de tener un solo valor comparativo por cada parámetro evaluado. Fuente: Elaboración propia**

<b>Resultado de las Pruebas de Laboratorio Hechas al Agua de la Torre de Enfriamiento (Promediados)</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>	<b>Promedio de Valores Reales</b>
pH	Adm.	7,8 - 8,2	8.15
Conductividad	us/cm.	< 2800	1944.90
Cloruros	ppm	< 200	146.50
O-Fosfato Filtrado	ppm	6 - 10	7.84
O-Fosfato S/Filtrado	ppm	6 - 10	8.08
Cloro Libre	ppm	0,3 - 0,5	0.30
Turbidez	NTU	< 25	1.40
Sílice	ppm	< 200	49.46
Hierro Soluble	ppm	< 1	0.13
Alcalinidad	ppm	< 350	96.00
Polímero Activo	ppm	8 - 12	8.60

## 5.2 Intercambiadores de Calor Críticos

Como se menciona en el punto 4.3.6 de este trabajo, fueron varios los criterios que se usaron para evidenciar cuales son los intercambiadores de calor críticos, la tabla 5.7 muestra la ubicación de los equipos y el motivo de sus fallas, en dicha tabla se nota que 11 intercambiadores de calor presentan las fallas relacionadas con la velocidad del agua de enfriamiento dichas en el punto 4.3.6 lo que representan aproximadamente un 17 % de los equipos evaluados, pues, se estudió el funcionamiento de 66, es de resaltar que en la actualidad no todos muestran la misma intensidad de criticidad pero que si no se le realiza un mantenimiento a tiempo las desviaciones entre las gráficas reales y teóricas que se muestran desde la figura 5.6 hasta la 5.10 y las consecuencias de estas diferencias serán mayores. Todos estos equipos fueron evaluados empleando la herramienta de seguimiento que se explica en el punto 4.3.5.

Dos de los problemas notados fueron las elevadas temperatura (por encima de la cual empieza la precipitación de sales  $>122$  °F/50 °C) y las velocidad del agua de enfriamiento dentro de los tubos que se encuentra muy cercana al límite superior o inferior del rango óptimo lo cual eleva en estos equipos las posibilidades de ser críticos, estos se muestran en la tabla 5.8.

Algunos equipos, como por ejemplo en el del 12-E-006-A presentaron más de una causa para ingresarlos en la lista de intercambiador en alerta, estos son los que aun no han fallado pero están cerca de hacerlo.

Solo uno de los intercambiadores evaluados (el 15-E-013) presentó problemas desde el punto de vista metalúrgico y posición vertical, es tanta la gravedad del equipo que en la actualidad no está en funcionamiento puesto que el haz de tubo fue

parcialmente desintegrado por el hidrocarburo que estaba en contacto con él, en evaluaciones anteriores se contactaron fugas internas desde el haz tubular hasta el sistema de enfriamiento.

De las fallas de los equipos mostrados en la tabla 5.7, las altas velocidades fueron las que se hicieron presente en mayor cantidad lo cual da paso a la corrosión por erosión, arrastre, desgaste en la superficie produciendo fugas internas en los intercambiadores de calor.

**Tabla 5.7 Muestra los equipos que resultaron críticos una vez terminada la recolección de los valores de los parámetros operacionales en la planta y su posterior comparación con los valores de diseño de cada uno.** Fuente: Elaboración Propia

Cantidad	Unidad	Tag del Equipo	Vel. Ft/seg.	T. de Piel De Tubo (Ft)	Tipo de Falla
1	10	10-E-012	3.35	128.03	Agua por la Carcasa
2	18	18-E-009	1.50	100.31	Baja Velocidad de Agua
		18-E-011	7.32	170.45	Alta Velocidad del Agua
3	22	22-E-106	9.01	130.04	Alta Velocidad del Agua
		22-E-107	7.98	148.6	Alta Velocidad del Agua
		22-E-207	12.14	150.61	Alta Velocidad del Agua
2	28	28-E-208	7.96	156.60	Alta Velocidad del Agua
		28-E-308	7.98	145.00	Alta Velocidad del Agua
2	65	65-E-001-A	----	106.33	Intercambiador de Placa
		65-E-001-B	----	105.20	Intercambiador de Placa
1	43	43-E-001	11.07	163.26	Alta Velocidad del Agua
Total= 11					

**Tabla 5.8. Intercambiadores propensos a criticidad por manejan velocidades cercanas a los limites recomendados.** Fuente: Elaboración Propia

Tag de Equipo	V. Dentro de los Tubos (Ft/seg)	T de Piel del Tubo (°F)	Q Diseño (Btu/h)	Q Real (Btu/h)
10-E-021-A	6,3	175,08	12,000,320	8,615,244
10-E-021-B	6,4	178,46	12,000,320	10,578,995
10-E-021-C	6,46	165,6	12,000,320	9,924,278
12-E-006-A	2,84	137,73	28,730,000	6,785,039
12-E-006-B	2,84	109,93	28,730,000	2,777,971
15-E-001-A	2,84	103,12	10,810,000	4,223,149
15-E-001-B	2,82	132,36	10,810,000	7,072,750
15-E-007-A	2,12	104,05	1,700,000	713,234
15-E-007-B	2,42	116,13	1,700,000	689,776
18-E-001-A	2,14	123,05	20,100,000	7,682,566
18-E-001-B	2,11	106,8	20,100,000	6,872,679
22-E-206	2,93	144,13	2,521,000	303,558
30-E-002-A	2,54	115,6	9,538,000	3,036,037
30-E-002-B	2,54	121,1	9,538,000	3,639,631
Total = 14				

Los intercambiadores 15-E-016/A/B/C/D/E/F presentaron una gran dificultad a la hora de tomar el valor del caudal de agua que ellos manejan debido a que el medidor de flujo que se empleó requiere de ciertas condiciones en cuanto al arreglo físico del sitio donde se tomará la medición, se necesita una distancia libre de accesorios (codos, válvulas, ampliación o reducciones de diámetros de las tuberías) de aproximadamente diez veces el diámetro de la tubería aguas arriba o veinte veces aguas abajo (y esta condición se cumplía en zonas muy altas), puestos que estos accesorios generan turbulencias en el fluido a medir y el instrumento requiere que la sustancia sea laminar para proporcionar lecturas confiable. Solo se realizaron medidas de temperaturas y les fue calculada la temperatura de piel del tubo y se muestran en la tabla 5.9

**Tabla 5.9. Intercambiadores que no presentaron accesibilidad para tomar mediciones del caudal de agua.** Fuente: Elaboración Propia

Cantidad	Unidad	Tag del Equipo	Vel. Ft/seg.	T de piel de tubo (°F)
6	15	15-E-016-A	-----	156.80
		15-E-016-B	-----	158.86
		15-E-016-C	-----	133.56
		15-E-016-D	-----	159.66
		15-E-016-E	-----	158.46
		15-E-016-F	-----	129.45

Las elevadas temperaturas que predominan en esta serie de equipos también fue un factor en contra para realizar la toma de datos, se registraron temperaturas de hasta 176°F (80°C) para el caso del 15-E-016-A como se muestra en la tabla B.2 siendo la temperatura límite de trabajo seguro del instrumento de medición de flujo 90°C.

De este grupo de intercambiadores los más críticos, por el arreglo físico que presentan son los 15-E-016A y 15-E-016 D, estos dos son los últimos de dos trenes de tres equipos cada uno, se encuentran en serie y por ende por ellos pasará el agua de enfriamiento más caliente que por los primeros dos (15-E-016-C y 15-E-016-F)

Se puso en evidencia un grupo de 11 intercambiadores de calor que en la actualidad están extrayendo una cantidad de calor muy por debajo a la que por diseño debería ser, estos equipos se muestran en la tabla 5.10

**Tabla 5.10. Intercambiadores que poseen alta demanda calórica pero que todavía no son críticos.** Fuente: Elaboración Propia

Cantidad	Unidad	Equipo	Q <sub>real</sub> BTU/h	Q <sub>diseño</sub> BTU/h	ΔQ BTU/h
3	10	10-E-021-A	8,615,244	12,000,320	3,385,076
		10-E-021-B	10,578,995	12,000,320	1,421,325
		10-E-021-C	9,924,278	12,000,320	2,076,042
4	12	12-E-001-A	21,613,523	33,660,000	12,046,477
		12-E-001-B	18,687,096	33,660,000	14,972,904
		12-E-006-A	6,785,039	28,730,000	21,944,961
		12-E-006-C	2,777,971	28,730,000	25,952,029
1	15	15-E-001-B	7,072,750	10,810,000	3,737,250
1	18	18-E-001-A	7,682,566	20,100,000	12,417,434
2	30	30-E-002-A	3,036,037	9,538,000	6,501,963
		30-E-002-B	3,639,631	9,538,000	3,385,076
<b>Total = 11</b>					

### 5.3 Herramienta de Seguimiento del Desempeño de los Intercambiadores de Calor

La preparación de esta herramienta de seguimiento se llevó a cabo mediante la aplicación del programa Excel, como se explica en la sección 4.3.4 de este trabajo, por medio de esta se realizó parte del presente estudio de una manera sencilla, confiable y practica produciendo resultados para cada intercambiador de forma individual pero tomando en cuenta de que el número de equipos evaluados fue

elevado, solo se mostrarán los resultados de algunos de ellos (entre críticos y no críticos).

A continuación se muestra todas las partes de la herramienta de seguimiento para un intercambiador, en este ejemplo se usará el intercambiador 18-E-001-B.

Como se muestra en la figura 5.1, este intercambiador pertenece al mejorador PDVSA Petropiar y se encuentra ubicado en el área de coker. En esta parte, la herramienta de seguimiento nos permite hacer clic sobre el *tag del equipo*, este es un código que indica la unidad donde se encuentra, el tipo y número de equipo y lo tienen casi todos los activos del mejorador (se muestran en los recuadros blanco de la figura 5.1), posteriormente la herramienta nos llevara hasta una hoja de cálculo propia para el intercambiador evaluado como se muestra en la figura 5.2 donde el usuario procederá a llenar las casilla de color azul con los valores diseño y los de operación actual (según sea el caso) y la herramienta generará el resto de los valores como se ilustra en esa misma figura y en la 5.3.

Es de destacar que si se desea visualizar la ubicación en la planta y la relación que tenga el intercambiador evaluado con los demás intercambiadores se debe hacer clic en la pestaña que se encuentra en la parte inferior de la pantalla llamada *Red de Distribución* y se mostrara la figura 4.1 la cual nos dará esa información.

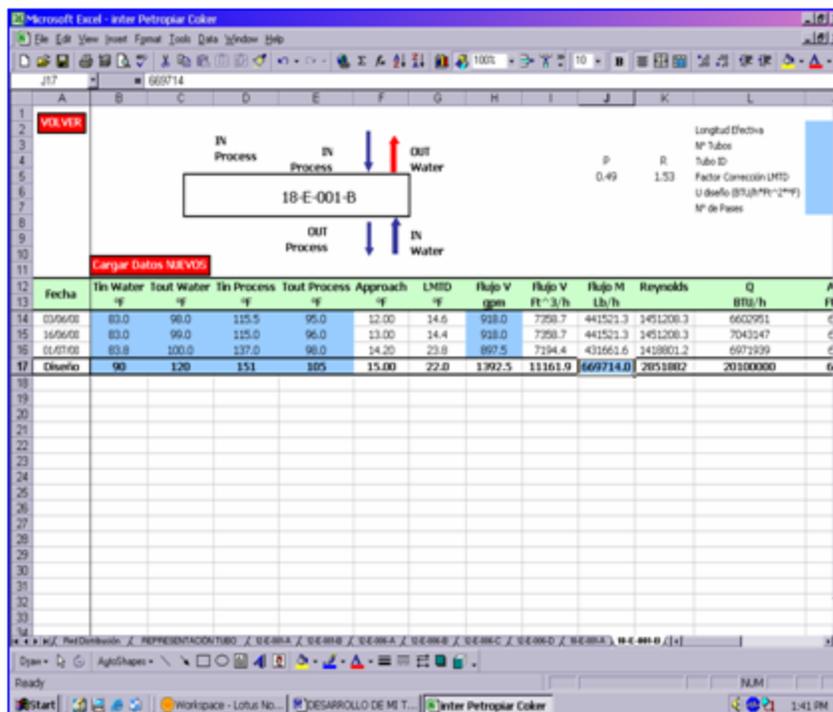
INTERCAMBIADORES DE CALOR PDVSA PETROPIAR (COKER)		
RED DISTRIBUCIÓN		
Red de Distribución-Temperatura Proceso.....		<input type="button" value="Cargar DATA"/>
TUBE SIDE		
1	Gas de Refinería	12-E-001-A
2	Gas de Refinería	12-E-001-B
3	Gas de Refinería	12-E-006-A
4	Gas de Refinería	12-E-006-B
5	Gas de Refinería	12-E-006-C
6	Gas de Refinería	12-E-006-D
7	Gas de Refinería	18-E-001-A
8	Gas de Refinería	18-E-001-B
9	Nafta	18-E-002

**Figura 5.1** En esta parte de la herramienta de seguimiento se muestran todos los intercambiadores que pertenecen a una misma unidad. Fuente: Elaboración propia.

Como lo indica las figuras 5.2 y 5.3 la última fila de datos se encuentra resaltada con líneas negras más anchas que las demás, estas muestran los valores de diseño para cada parámetro lo que nos permite comparar de manera rápida cada valor real por separado con el de diseño.

De forma automática haciendo clic en la pestaña que aparece en la parte inferior de la pantalla llamada *Representación tubo* o *Representación placas* (dependiendo del caso) la herramienta de seguimiento nos mostrará una serie de graficar, para cada equipo donde se representan, en función de la fecha de recolección de los valores operacionales, parámetros como: volumen de agua manejado por el intercambiador, temperatura de salida del fluido que se esta enfriando, cantidad de calor retirado, coeficiente de transferencia de calor, factor de ensuciamiento, temperatura de piel del tubo y velocidad del agua dentro de los tubos. Ejemplo de estas gráficas son las

figuras 5.4 y 5.5 donde se muestran series con líneas de color rojo (las cuales representan los valores de diseño) y series con líneas de color azul (que son las correspondiente a los valores de los parámetros tomados en planta o calculados, es decir, los reales).



**Figura 5.2** Esta es la hoja de cálculo que se preparo para cada intercambiador a evaluar. Fuente: Elaboración propia

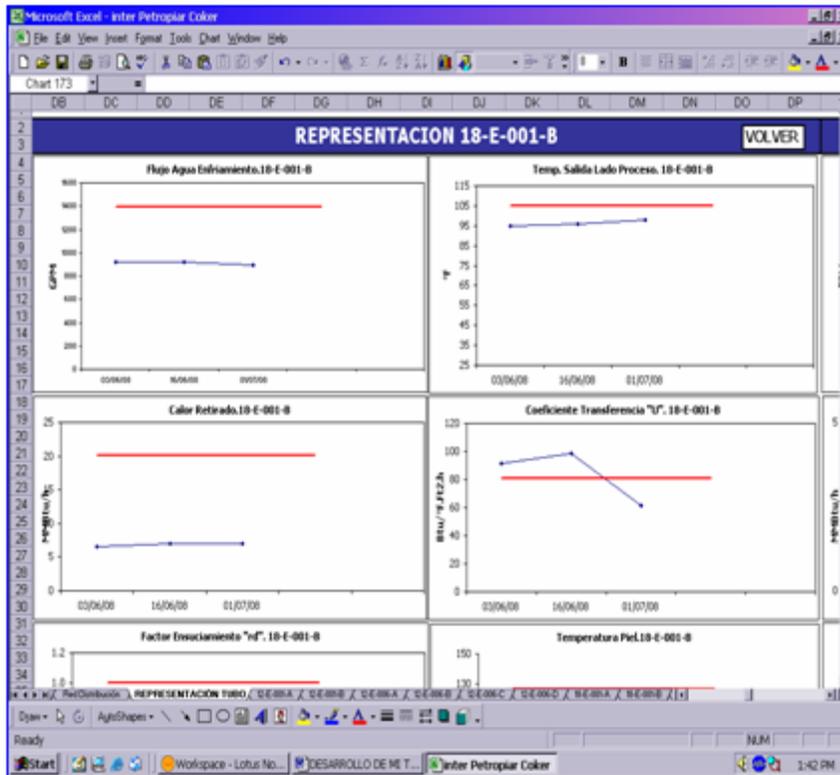
Para este caso en particular (intercambiador 18-E-001-B), al vaciar los datos de diseño y los recogidos en campo, la herramienta de seguimiento arrojó los resultados mostrados desde la Figura 5.2 hasta la 5.5 pudiendo analizar los valores y graficas generados de la siguiente manera:

El caudal de agua de enfriamiento manejado por el equipo en la realidad es menor que el que dice la hoja de diseño pero se nota (en la Figura 5.2) que tanto las temperaturas de entrada y las de salidas de los fluidos que intercambian calor (en este caso agua y gas de refinería) están entrando a una temperatura menor.

Fecha	Q BTU/h	Area ft <sup>2</sup>	Heat flux BTU/h/ft <sup>2</sup>	P	R	F	U Btu/ft <sup>2</sup> h/°F	f ft/pipe2h/BTU	rd	Velocity (ft/s)	Skin Temp. °F
03/06/08	6602951	6796	973	0.46	1.37	0.73	91.4	-0.001	0.81	2.13	302.5
16/06/08	7043347	6796	1038	0.50	1.19	0.73	96.4	-0.002	0.87	2.13	302.2
31/07/08	6972939	6796	1027	0.30	2.41	0.70	61.7	0.004	0.54	2.08	125.7
Diseño	20100000	6796	2962	0.5	1.5	1.00	88.6	0.000	1.00	4.10	126.6

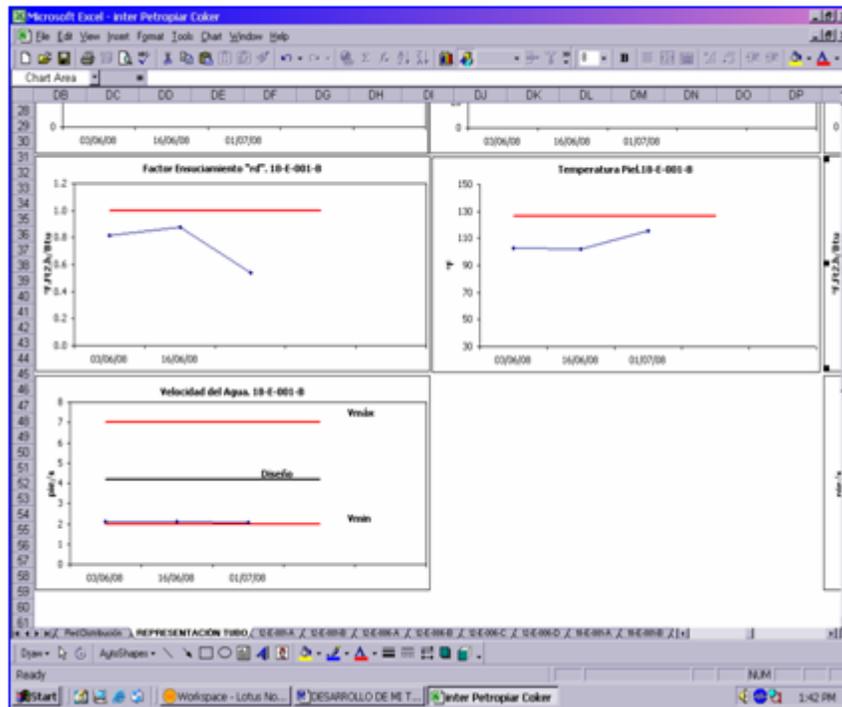
**Figura 5.3** Continuación de la hoja de cálculo que se preparo para cada intercambiador Fuente: Elaboración propia

Lo descrito en el párrafo anterior da como consecuencia de que el calor que el agua le retira al gas sea menor que el teórico y se tenga unos valores de rendimiento aceptables (alrededor de 75 %) pero si se diera el caso de que el fluido de proceso entrara al intercambiador a una temperatura mayor el equipo no extraería la cantidad de calor requerida para la continuidad del proceso.



*Figura 5.4 Gráficas generadas por la herramienta de seguimiento*

Fuente: Elaboración propia

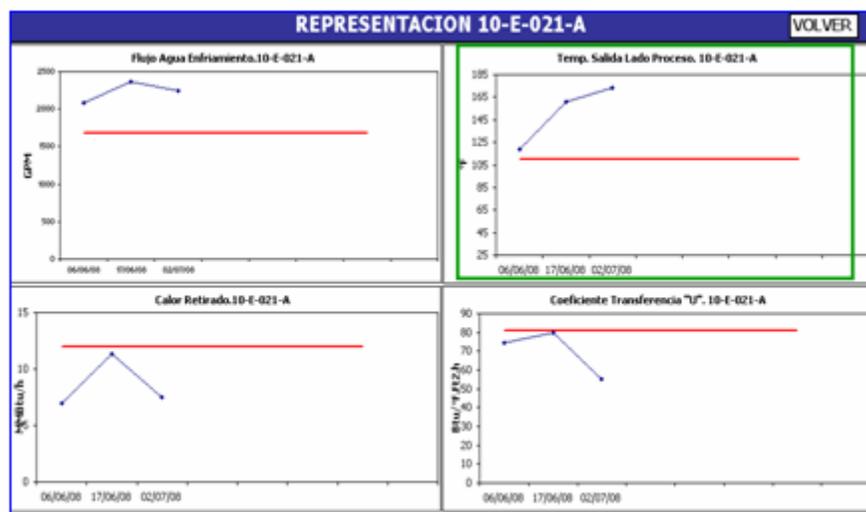


**Figura 5.5 Gráficas generadas por la herramienta de seguimiento** Fuente: Elaboración propia

En la primera gráfica (superior izquierda de la figura 5.4) se nota la diferencia ya mencionada entre los caudales la cual es de aproximadamente 500 gpm (teórico mayor que el real) al mismo tiempo en la grafica vecina se representa la temperatura a la cual el fluido de proceso está abandonando el equipo evidenciándose la línea azul por debajo de la roja lo que quiere decir que está saliendo más frío comparándolo con lo que dice la hoja de fabricación, esto también se debe al hecho de que están entrando los fluidos al equipo a temperatura menores a las de diseño. La diferencia que muestra la grafica titulada calor retirado (figura 5.4) también se debe a la discrepancia entre los caudales, puesto que si el flujo del fluido que se encarga de remover el calor es poco por consiguiente la cantidad de calor que este puede transportar también disminuirá.

Los saltos o valores con cambios drásticos mostrados en las siguientes gráficas de las figuras 5.4 y 5.5 se debe fundamentalmente a que el número de muestras tomados fue poco por el tiempo del cual se dispuso para la evaluación tomando en cuenta la cantidad de equipos estudiado, es recomendable que se realicen varias medidas con la finalidad de que las gráficas obtenidas sean lo más cercanas a lo que realmente esta ocurriendo en el equipo.

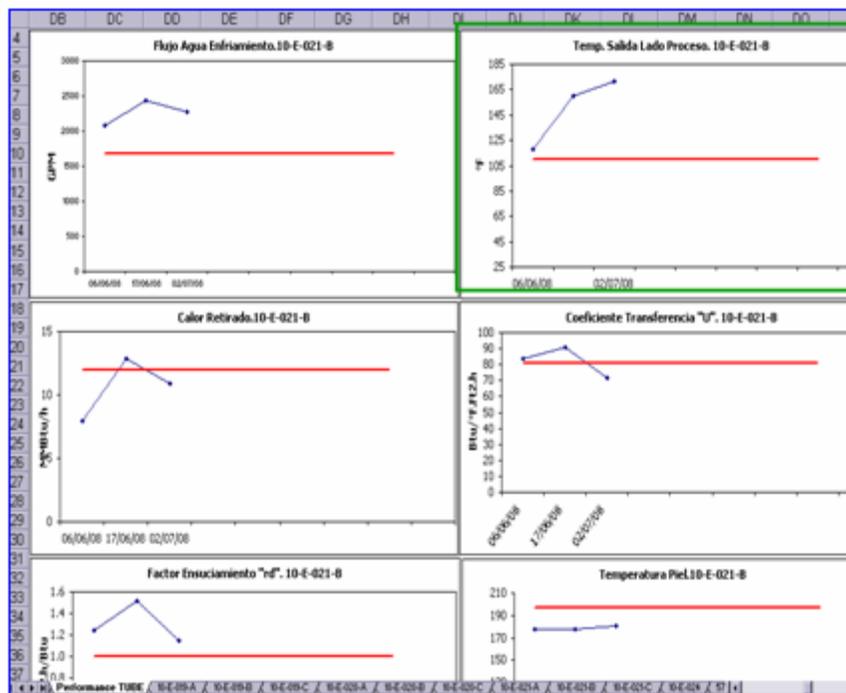
A continuación se muestran gráficas generadas por la herramienta de seguimiento de alguno de los intercambiadores críticos mostrados en la tabla 5.7. o de los que esta cercanos a producir fallas. Estas figuras nos permitieron ver diferencias entre los comportamientos reales y teóricos de los equipos evaluados y por ende seleccionar cuales son los que requieren intervención.



**Figura 5.6 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento.**

Fuente: Elaboración Propia

La figura 5.6 y 5.7 muestran gráficas correspondientes al intercambiador 10-E-021-A y 10-E-021-B respectivamente, estas son gráficas de dos series, la línea roja representa los valores de diseño y la azul el desempeño que tiene el equipo en la actualidad. Los recuadros verdes destacan diferencia entre ambas datas, en este caso las temperaturas a la cual debería salir el fluido que se está enfriando es mucho mayor a la que teóricamente tendría que ser.

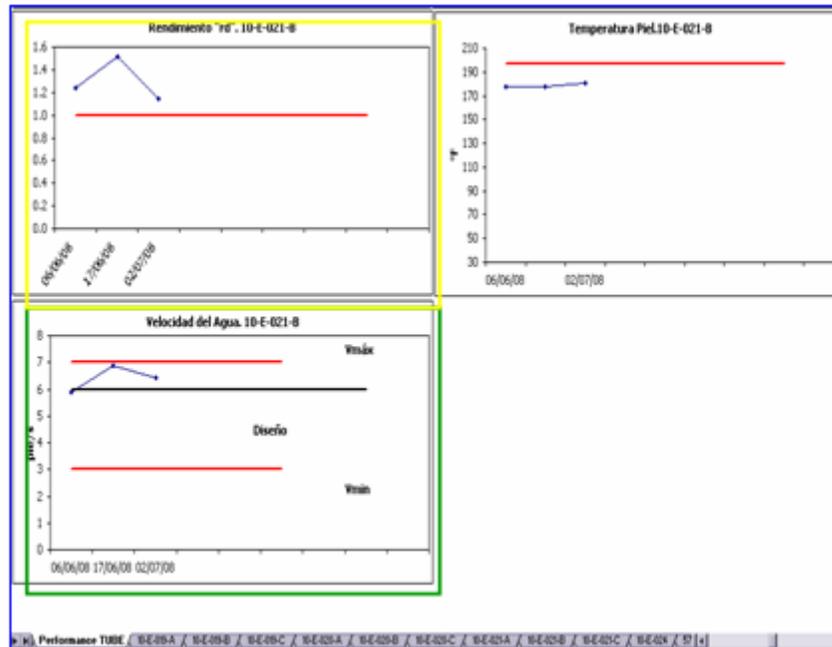


**Figura 5.7** Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento.

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado estos dos equipos en la actualidad manejan un caudal de agua de enfriamiento mucho mayor al de diseño, pero por lo visto esto no siempre favorece a la disminución de la temperatura del fluido de proceso hasta los valores dichos por la hoja de fabricación del equipo, también hay evidencia de valores de velocidad muy

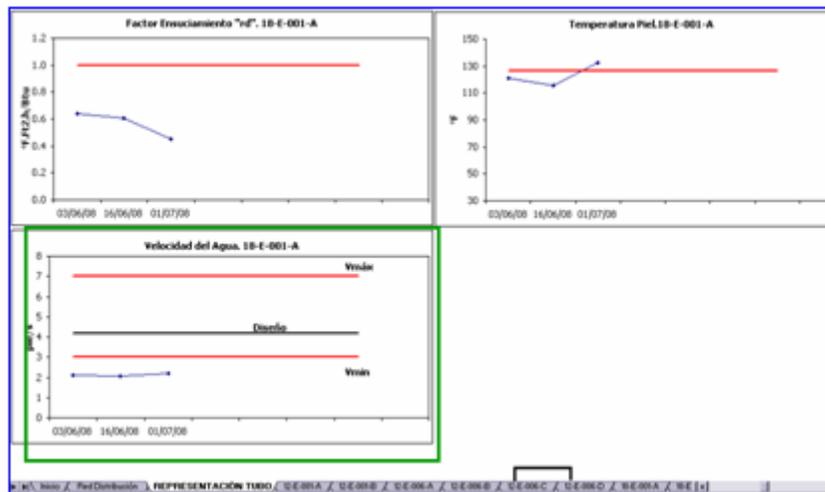
cercanos al límite superior permitido, tal como se muestra en el recuadro verde de la figura 5.8 (para el caso del intercambiador 10-E-021-B), mientras más rápido pase el agua por el interior de los tubos del intercambiador menos tiempo estará en contacto con el fluido caliente y menos calor podrá extraerle.



**Figura 5.8 Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento.**

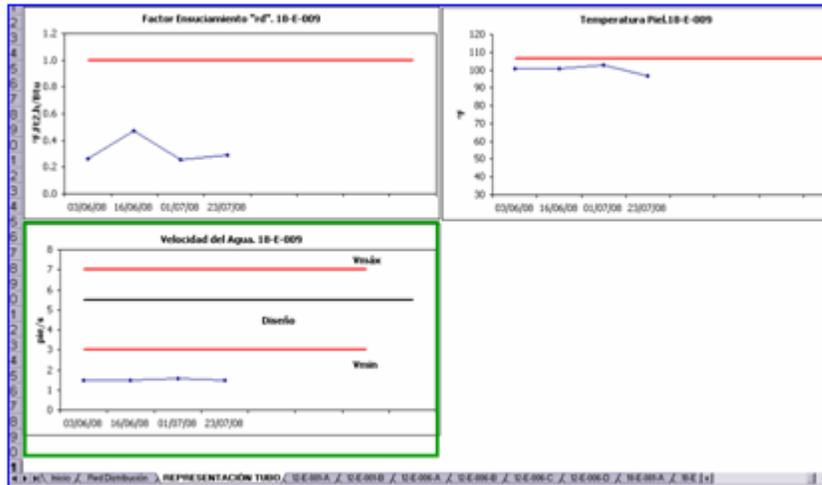
Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera, la figura 5.8 muestra en el recuadro de color amarillo se nota las variaciones de la eficiencia del equipo en estudio. Es de recalcar que por el hecho de que el caudal manejado por el intercambiador es mucho mayor al que en la realidad debería tener (600 gpm por encima), los parámetros operacionales que dependen de este valor se verán incrementado proporcionalmente, es por esta razón que en algunos caso se encuentran valores de eficiencia mayores a la unidad, lo cual teóricamente es imposible pero que al aplicar las fórmulas para el cálculo de este parámetro y ser mayor el denominador que el numerador el lo esperado.



**Figura 5.9** Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento.  
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 5.9 se observa un recuadro verde que destaca la gráfica del equipo 18-E-001-A correspondiente a la velocidad del agua dentro de los tubos del intercambiador la cual, durante todas las mediciones fue baja (menor al límite inferior permitido). En esta figura se nota (en la parte superior del recuadro verde) que el caudal manejado por este intercambiador es menor al requerido pero aun así la temperatura de salida del lado proceso no esta tan alejada de la teórica, lo que es un indicio de que el equipo está diseñado por encima de lo requerido.



**Figura 5.10** Muestra de las gráficas generadas por la herramienta de seguimiento.

Fuente: Elaboración Propia

Lo explicado en el párrafo anterior pasa igual con el intercambiador 18-E-009, con un caudal muy por debajo al de diseño se retira la cantidad de calor requerido para satisfacer las condiciones de proceso pero se genera un factor de criticidad, se evidencia bajas velocidades para el agua lo que se transforma en deposiciones y ensuciamiento para el interior de los tubos y por ende a una reducción de la transferencia de calor y la eficiencia del equipo.

## CONCLUSIONES

- 3** Basados en la velocidad del agua de enfriamiento y en la temperatura de piel de tubo se detectaron 11 intercambiadores críticos de 66 que fueron evaluados los cual corresponde al 16.66% de los equipos estudiados.
- 4** Los intercambiadores de placas (el 65-E-001-A y 65-E-001-B) y el intercambiador 10-E-012 (agua por la carcasa) poseen una configuración por diseño crítica.
- 5** Se encontraron 11 equipos que no son críticos por el lado agua de enfriamiento pero que poseen alta demanda calórica debido a las elevadas temperaturas de entrada del lado proceso.
- 6** Las bombas de recirculación del sistema de enfriamiento no presentan desviaciones operacionales en función al diseño.
- 7** Los valores de temperatura de entrada y salida del lado agua de enfriamiento como lado proceso en un mismo equipo, varían entre si dependiendo de los niveles de producción del mejorador.
- 8** La torre de enfriamiento no presenta facilidad de realizar mantenimiento debido a que tiene una piscina común y no se puede sectorizar las celdas.
- 9** El sistema de rociado de seguridad de la torre de enfriamiento no se encuentra en funcionamiento debido a que presenta fallas y se activa con frecuencia.
- 10** Desde el punto de vista químico, los parámetros operacionales evaluados al agua de enfriamiento se encuentran entre los rangos recomendados.

## RECOMENDACIONES

- 2 Realizar limpieza interna a los equipos que resultaron críticos en la siguiente parada programada para que puedan seguir operando y vuelvan a satisfacer las condiciones requeridas por el proceso.
- 3 Se recomienda prestar atención a los intercambiadores que no son críticos pero que están propensos a serlos por manejan velocidades cercanas a los límites recomendados.
- 4 Se recomienda realizar planes de mantenimiento preventivo a los intercambiadores que presentan alta demanda calórica, estos no son críticos pero presentan gran posibilidad de serlos.
- 5 Es conveniente seguir con los planes de mantenimiento preventivos realizados hasta el momento al sistema hidráulico de la torre para mantener sus buenos resultados.
- 6 Se recomienda realizar mediciones de los parámetros requeridos por la herramienta de seguimiento con una frecuencia de dos meses para que los resultados sean confiables.
- 7 Con el objeto de disminuir costos operacionales, es recomendable buscar un tiempo de frecuencia de lavado de los filtros mayor al actual (24 horas) por que en este tiempo el agua aun es de buena calidad.
- 8 Se recomienda sectorizar la piscina de la torre de enfriamiento con la finalidad de aumentar la accesibilidad para la realización de mantenimientos.
- 9 Poner en funcionamiento el sistema de rociado de la torre de enfriamiento debido a que en la actualidad se encuentra bloqueado.
- 10 Se recomienda mantener el tratamiento químico del agua de la torre como hasta el momento debido a que han dado buenos resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

### Bibliografía Citada

- 2 J. Ramírez, **“Evaluación del sistema de bombeo de una unidad de agua de enfriamiento de un complejo mejorador de crudo”**, Trabajo de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela (2004).
- A. Benítez, **“Evaluación del desempeño de los intercambiadores de calor de carcasa y tubo del mejorador de crudo extrapesado de Petrolera Ameriven en el complejo industrial de Jose, Edo. Anzoátegui”** Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Metropolitana, Venezuela (2004).
- 3 Petrolera Ameriven, **“Inducción en los Procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven”**, Volumen I Descripción General Plantas de Procesos, Alfonso y Asociados, Caracas (2004).
- 4 Petrolera AMERIVEN, S.A. **“Manual de Operaciones de la Unidad de Crudo del Proyecto Hamaca”**. Revisión N° 12. Anzoátegui. (2002).

- 5 Barzotti, Grupo Alvica **“Manual de operaciones de la Unidad 47 Sistema de Agua de enfriamiento Mejorador de Crudo Hamaca de Petrolera Ameriven”**. Volúmenes No 1 y 2. (2002).
- 6 Barzotti, **“Asistencia Técnica al Área Operacional en las Fases de pre-arranque y arranque de las unidades de Servicios Industriales y Suministro”**. Petrozuata.(2000).
- 7 Quiminet, **“Sistemas De Enfriamiento”** México (2000)  
[http://www.quiminet.com.mx/art/ar\\_%25DD%25F4%2951%25D7Kt.php](http://www.quiminet.com.mx/art/ar_%25DD%25F4%2951%25D7Kt.php).
- 8 TEMA, **“Standards of the Tubular Exchanger Manufacture Association”**, Octava edición, Tubular Exchanger Manufactures Association, INC., Broadway (1999).
- 9 E. Avallone y T.Baumeister, **“Manual del Ingeniero Mecánico”**, Editorial Mc Graw Hill, México (1999).
- 10 Perry, R. **“Manual del Ingeniero Químico”**, Sexta edición, Tomo III, Editorial McGraw Hill, México (1998).
- 11 F. Pietro, **“Evaluación y mejora de una torre de enfriamiento de la línea de producción de una planta productora de cemento”**, Trabajo de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz, Venezuela (1994).
- 12 Karlekar y R. Desmond, **“Transferencia de Calor”**, Nueva Editorial Interamericana C.A., México (1985)

- 13 PDVSA, **“Manual De Inspección, Procedimiento de Inspección de Torres de Enfriamiento”** volumen 8. (1980).

### **Bibliografía Adicional**

1. S. Espinoza y G. Masini, **“Fundamentos de transferencia de Calor”**, (2000).
2. **“Manuales Electrónicos de Operación”**, Venezuela, [intranet.ameriven.com/departments/downstream/es/index.htm](http://intranet.ameriven.com/departments/downstream/es/index.htm). (2000).
3. F Incropera, **“Fundamentos de Transferencia de Calor”**, Editorial Prentice Hall, Cuarta edición, México, (1999).
4. Lenntech, **“Torre De Enfriamiento”**, Holanda, <http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/torres-enfriamiento.htm> (1998).
5. V Streeter, **“Mecánica de los Fluidos”** Editorial McGraw-Hill, Octava edición, México, (1996).
6. R. Burghardt, **“Ingeniería Termodinámica”**, Editorial Harla, Quinta Edición, México, (1984)
7. Y. Cengel y M. Boles, **“Termodinámica”**, segunda edición Editorial Mc Graw Hill, México (1982).

8. Mataix, “**Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas**”, Editorial Harla, México (1982)
9. V. Faires, “**Termodinámica**” Editorial McGraw-Hill, Primera edición, México, (1972).
10. T. Asmut, “**Manual del Ingeniero Técnico**” Editorial Urmo, Octava Edición, España (1972).
11. Welty, “**Transferencias de Calor Aplicada a la Ingeniería**”, Editorial Limusa, Primera Edición.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y  
ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL MEJORADOR PDVSA PETROPIAR</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>Elmerida S., Yeglys Del Valle</b>	<b>CVLAC: 15.036.414 E MAIL: yes81080@hotmail.com</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Sistema de enfriamiento

---

Intercambiadores de calor

---

Torre de enfriamiento

---

Herramienta de evaluación

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Mecánica

**RESUMEN (ABSTRACT):**

En el presente trabajo se realizó la evaluación del sistema de enfriamiento de agua del mejorador de crudo extra pesado PDVSA Petropiar, dicho estudio permitió evidenciar las condiciones de funcionamiento actuales de sus principales componentes. Paralelamente a la evaluación del sistema se creó una herramienta de seguimiento del desempeño de la funcionalidad de los intercambiadores de calor. De la evaluación hecha al sistema de enfriamiento se obtuvo que de los 66 intercambiadores evaluados 11 resultaron críticos. La torre de enfriamiento, sistema hidráulico, filtros y sistema de inyección de químicos se encuentran operando en buenas condiciones

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
Luís Pereira			X		
	CVLAC:	8.679.452			
	E_MAIL	lpereira@petropiar.pdvsa.com			
	E_MAIL				
Simón Bittar				X	
	CVLAC:	3.957.961			
	E_MAIL	sbittar@hotmail.com			
	E_MAIL				
Henry Espinoza					X
	CVLAC:	4.363.950			
	E_MAIL	hespinoza@cantv.net			
	E_MAIL				
Melchor Ledezma					X
	CVLAC:	11.175.872			
	E_MAIL	melchorjledezma@hotmail.com			
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2009	03	09
AÑO	MES	DÍA

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis. Evaluación sistema de enfriamiento.doc	application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H  
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u  
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** Departamento de servicios técnicos, Petropiar José  
(OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Mecánico

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Mecánica

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente – Núcleo Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo a Artículo 44 del Reglamento de Trabajos de  
Grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la  
Universidad de Oriente, sólo podrán ser utilizados para otros fines  
con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo  
participará al Consejo Universitario”

**Elmerida Sucre Yeglys Del Valle**

**AUTOR**

**Simón Bittar**

**TUTOR**

**Henry Espinoza**

**JURADO**

**Melchor Ledezma**

**JURADO**

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**