

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE UNA
PLANTA MEJORADORA DE CRUDO EXTRAPESADO**

Realizado por:

CRUZMELIS C. CONTRERAS TILLERO

**Trabajo de grado presentado a la Universidad de Oriente como Requisito
Parcial para optar al Título de INGENIERO QUÍMICO.**

Puerto La Cruz, Noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE UNA
PLANTA MEJORADORA DE CRUDO EXTRAPESADO**

ASESORES

Ing. Quím. Petra Martínez, (M. Sc.)

Asesor Académico

Ing. Quím. Ana G. González

Asesor Industrial

Puerto La Cruz, Noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO
DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE UNA
PLANTA MEJORADORA DE CRUDO EXTRAPESADO**

JURADO CALIFICADOR

Ing. Quím. Petra Martínez (M.Sc.)

Asesor Académico

Prof. Hernán Raven (M.Sc.)

Jurado Principal

Prof. Lucas Álvarez (Ph.D.)

Jurado Principal

Puerto La Cruz, Noviembre de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado: “los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la universidad de oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al consejo universitario, para su autorización”

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a aquel que cada día estuvo conmigo, dándome el ánimo para continuar, dando respuesta a mis oraciones y mostrándome el camino a seguir; mí **Padre Celestial**. Tu más que nadie sabes todo lo que ha sido este camino recorrido, las espinas encontradas, las lagrimas, las alegrías y aún más el gozo y felicidad de cristalizar este sueño tan buscado.

A mis padres **Cruz Tilleroy Víctor Contreras**. Este trabajo es dedicado a ustedes, quienes me han apoyado siempre, me enseñaron que cada día se está más cerca del éxito y que el fracaso es de aquel que no lucha por alcanzar sus sueños. Todo lo que soy hoy y aún más lo que seré mañana es por todo lo que ustedes han cultivado en mí y que ahora empiezan a cosechar. Los amo.

A mis hermanos **Víctor y Yosi**. Ustedes siempre han sido un motivo para ser mejor, me han motivado a esforzarme cada día más para brindarles un ejemplo a seguir. Yosita, bueno licenciada gracias por tu ejemplo y tus logros, este logro va dedicado a ti. Víctor que este logro te impulse a obtener muy pronto el tuyo; lo esperamos. Gracias por ser los mejores hermanos.

A mi sobrino **Víctor Rafael**. El rayito de luz más grande de nuestro hogar, tus risas, besos y abrazos son la mejor recompensa ante un día agotador. Mi niño bello que sigas creciendo en sabiduría e inteligencia.

A mi nuevo sobrino **Xavier David**. Eres mí niño bello y súper inteligente que esta meta que hoy alcanza tu tía sea un modelo a seguir en tu futuro, este logro también es para ti.

A mis abuelas **Loida Contreras y María Chaguán**. Gracias por su apoyo durante mis años de estudios y por ayudarme cuando más les necesite.

A mi tío **Dario**. Gracias por tu apoyo y tu ayuda durante todas mis épocas de estudiante, por enseñarme el valor y la importancia del estudio. Ahora somos colegas “Ingeniero”. Te quiero.

A mis primas **Anais, Olmaris y Elba María**. Ustedes que más que primas son mis hermanitas, las quiero mucho; gracias por sus sonrisas, sus bailes, abrazos y alegría que me han ayudado a sonreír cuando más lo he necesitado. Recuerden que es importante estudiar para llegar a ser lo que siempre hemos soñado. Esto también es para ustedes.

A mi amiga de toda la vida **Daniela Pérez y su familia**. Gracias Dany por todos los momentos vividos, por las largas horas de estudio, de traspasado, de lucha por este sueño que ya hoy vemos cristalizado. A la familia Pérez por brindarme su hogar, su apoyo y aún más su cariño durante tantos años. Los quiero mucho.

A mis súper amigas **Graciela y Melissa**. Ustedes son el mejor ejemplo de amistad, compañerismo, solidaridad y cariño. Muchachas este trabajo va dedicado a ustedes mis amigas de ayer, hoy y para siempre. Las quiero un montón.

A mi amigo **Wlady**. Te quiero mucho amigo. Eres un gran ejemplo para mí, mil gracias por tu ayuda, tu cariño y por brindarme una hermosa amistad. Formas parte de este sueño alcanzado, por eso también va dedicado a ti. Siempre te llevare en mi corazón.

A mis amigas y compañeras de estudio **Adri, Vicky, Ruby, Zoraida, Monica y Fredy**. Siempre los recordare, forman parte de lo que ahora soy, más que las enseñanzas obtenidas en clase y el estudio, me llevo su amistad. Los tengo en mi corazón. Para ustedes va este logro.

A mi nueva familia **Rondón Toro**. Muchas gracias por su apoyo y motivación durante la redacción de mi tesis; los quiero mucho, gracias suegros por tratarme como su hija; por eso este trabajo también va dedicado a ustedes.

Finalmente a mi esposo **Rafael Rondón**. Gracias por ser mi amigo, por escucharme, entenderme, confiar en mí y darme ánimo en los momentos difíciles. Amor este logro tan buscado, esperado y hoy alcanzado va dedicado a ti. Te amo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a mi hermano mayor **Jesucristo** por escuchar mis oraciones e interceder siempre por mí, por darme consuelo, guía, ánimo e inspiración. Eres lo máximo, mi mejor amigo y mi fiel compañero. Te amo.

A mi mamita **Cruz Tiller**. Mamita, tu apoyo incondicional, tu amor, tu dedicación, me han dado la fuerza y me hacen sentir apoyada en todo lo que emprendo. Mil gracias por ayudarme en las inscripciones de los intensivos y por todos tus desvelos mientras estudiaba. Eres la mejor de todas. Te amo.

A mi papá **Víctor Contreras**. Papito eres muy importante para mí y eternamente te estaré agradecida por todo lo que me has brindado en esta vida; gracias por amarme tanto, consentirme, apoyarme y confiar en mí. Te amo papi.

A mi esposo **Rafael Rondón**. Agradezco tanto tu motivación para la redacción de mi tesis, tu apoyo constante durante los viajes para las correcciones y tu paciencia y comprensión, gracias por demostrarme con hechos tu amor. Te amo y siempre te estaré agradecida por ser mi apoyo y fortaleza.

A la empresa **PETROMONAGAS**. Por brindarme la oportunidad de desarrollar mi tesis en el mejorador, hacerme sentir parte de esta gran familia y por su apoyo; estos seis meses fueron de gran aprendizaje y conocimiento.

A mi asesora industrial **Ana González**. Anita eres única; sin duda la mejor tutora, amiga y pana. Agradezco infinitamente a mi Padre Celestial por

ponerme en tu camino, por tu ayuda incondicional y por todo lo que me haz enseñado, gran parte de este trabajo es por tu ayuda y las experiencias de vida aprendidas juntas, así como tus experiencias y consejos, los llevare escritos en mi mente y en mi corazón. Recuerda que te aprecio y cuentas conmigo siempre.

A mi asesora académica **Petra Martínez**. Profe, gracias por ser el mejor ejemplo de la enseñanza, sus clases fueron lo máximo y muy aplicables y recordadas durante mis pasantías. Gracias por brindarme la oportunidad y ante todo por confiar en mí para realizar este trabajo; que Dios la colme de múltiples bendiciones a causa de sus buenos actos y deseos de ayudarnos a ser mejores ingenieros y personas durante las horas que pasamos con usted en el salón de clase, tutorías y consultas.

A la Ing. **Arelis Parabacuto**. Gracias por todo tu apoyo en el desarrollo de mi tesis, por las fotos, las tuberías, las hojas de cálculos, gráficos, etc. A pesar de no ser mi tutora siempre me apoyaste en todo lo que estuvo a tu alcance; mucho de mi trabajo es gracias a ti.

A los Ing. **Jemmy González, Gustavo Rivas y Jesús González**. Gracias muchachos por colaborar conmigo, por brindarme la confianza de acercarme a ustedes en busca de ayuda y por tener siempre una respuesta y una solución cuando los necesité. Que sigan cosechando el éxito que se merecen.

Al Superintendente del Departamento de Ingeniería de Procesos **José Luís Moreno**. Gracias por brindarme este tema de tesis y por las presentaciones rápidas que me pedías, por todas las cosas que me pediste

hacer, todo ello me ayudó a dar aun más de mí y demostrarme que puedo lograr lo que me propongo.

A mi compañera de pasantía **Ariana Salazar**. Arianita gracias por todo tu apoyo en la recolección de los datos requeridos para este trabajo; por tus enseñanzas, por tu apoyo y por la buena relación que tuvimos que nos llevó a apoyarnos. Te estaré muy agradecida por todo tu aporte en la realización de este trabajo y gracias por ofrecerme tu amistad. La pasantía ha culminado, pero la amistad y experiencias de vida permanecerán. Éxito amiga.

Al Señor **Víctor Mustiola**. Usted fue quien me ayudo a tener una visión en aquella conversación luego del almuerzo, sobre lo que es el MEJORADOR PETROMONAGAS, esa corta enseñanza me ayudó a ubicarme más en lo que sería mi trabajo en esta empresa.

Gracias por esto y por hacerme sentir parte de la empresa. Y a pesar de sus comentarios que me hacían salir de la cocina jaja; si lo recordaré. Éxito.

Al Señor **Eddy Arias**. Gracias señor Eddy por todo su apoyo en mi trabajo de tesis y en especial por brindarme su amistad, por hacerme sentir parte del equipo de trabajo y por darme siempre ánimo para seguir. Lo extrañaré.

Al Operador **Rafael Rodríguez**. No podías faltar en los agradecimientos de mi tesis, ya que para Ariana y para mí haz sido de mucha ayuda en la recolección de nuestros datos en campo. Gracias Rafael por tu disposición de ayudar, por dedicarnos tiempo en las unidades para explicarnos su

funcionamiento, por ayudarnos a raspar las tuberías, cargar el equipo y llevarnos en la camioneta jajaja. Gracias por tu ayuda y por tu amistad. Te deseo éxito en todo lo que emprendas.

A todos los **Consolistas** del Mejorador Petromonagas y al **Personal de Operaciones**. Gracias por todas sus sugerencias, por explicarme el funcionamiento de los equipos, por tener una respuesta ante cada duda.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una evaluación del sistema de agua de enfriamiento de la unidad de servicios del mejorador de crudo extrapesado Petromonagas, con la finalidad de ubicar y cuantificar las pérdidas de agua de enfriamiento ajenas a la evaporación, purga y arrastre; las cuales ocasionan un incremento en el suministro de agua de reposición y mayor requerimiento de los químicos empleados en el tratamiento del agua de enfriamiento. Para ello se identificaron todas las características del sistema de enfriamiento a las condiciones de diseño y de operación; tomando en consideración los datos de diseño reportados en los manuales de la planta y los valores operacionales recolectados en campo. Se realizaron balances de masa y energía durante el trimestre (septiembre-noviembre), encontrándose que las pérdidas de agua no se localizan en ella y que la torre de enfriamiento mantiene un desempeño adecuado en función del calor retirado a través de esta. El estudio de los intercambiadores determinó que el intercambiador E-1305 presentó un calor operacional actual de 4MMBtu/h siendo su valor de diseño de 3,76 MMBtu/h, lo que representa un incremento de 0,24 MMBtu/h respecto al diseño; este incremento se ve reflejado en las altas temperaturas generadas en él y junto a la tendencia incrustante del agua de enfriamiento; lo transforman en un intercambiador crítico. La limitante en el estudio de los equipos que conforman el sistema de enfriamiento no permitió cuantificar ni localizar la pérdida de agua de enfriamiento presente en cada equipo; es por ello que se realizó un seguimiento de inspección visual a las líneas de tubería que conforman el sistema de enfriamiento, encontrando que no se generan pérdidas de agua por fugas en ellas. Se localizaron 85 equipos al seguir la línea de enfriamiento, en contraste con los reportados en los manuales de diseño

(31); lo que indica que en los manuales de diseño faltan 54 equipos que actualmente consumen agua de enfriamiento y no se reportan. Finalmente se realizaron balances de masa en los límites de batería de cada unidad de proceso, para cuantificar la pérdida de agua presente en cada una de ellas; obteniéndose un flujo de agua de enfriamiento enviado a los procesos de $3.321,76 \text{ m}^3/\text{h}$ de los cuales retornan $3.162,14 \text{ m}^3/\text{h}$; lo que representa una pérdida de agua de $159,59 \text{ m}^3/\text{h}$ (4,805%). La cantidad de agua de enfriamiento perdida se distribuye en: unidades 10 ($123,54 \text{ m}^3/\text{h}$); unidades 20 ($3,32 \text{ m}^3/\text{h}$); unidades 30 ($27,91 \text{ m}^3/\text{h}$); unidades 40 ($4,82 \text{ m}^3/\text{h}$). Lo que ocasiona mayor reposición de agua a la torre de enfriamiento, lo cual incide directamente en los actuales ciclos de concentración bajos (3,5) respecto al diseño (4,9), representando una pérdida de $159,59 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua de reposición. Los parámetros químicos críticos del agua de enfriamiento resultaron ser el pH y cloro residual; estos fueron identificados por su variación con respecto al rango de control. Finalmente los Índices de Langelier y de Ryznar correspondieron a un agua con tendencia incrustante.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN	xii
CONTENIDO	xiv
INDICE DE FIGURAS	xx
INDICE DE TABLAS	xxii
CAPITULO I	24
INTRODUCCIÓN	24
1.1 Reseña histórica de la empresa	25
1.2 Planteamiento del problema	26
1.3 Objetivos.....	29
1.3.1. Objetivo general	29
1.3.2. Objetivos específicos	30
CAPITULOII	31
MARCO TEÓRICO	31
2.1. Antecedentes.....	31
2.2. Sistemas de agua de enfriamiento de la unidad de servicios industriales del mejorador de crudo extrapesado PETROMONAGAS	33
2.3. Sistemas de enfriamiento	34
2.3.1 Principio de enfriamiento.....	34
2.3.2 Función de la torre de enfriamiento.....	36
2.3.3 Clasificación de las torres de enfriamiento.....	37
2.3.3.1 Clasificación por proceso.....	37
2.3.3.2 Clasificación de las torres de enfriamiento	38

2.3.3.3 Clasificación de acuerdo a la dirección del flujo de aire y el agua.....	40
2.3.4 Tratamiento químico del agua de enfriamiento	41
2.4. Problemas presentes en los sistemas de enfriamiento	41
2.4.1 Corrosión.....	41
2.4.1.1 Tipos de corrosión	42
2.4.1.2 Factores que influyen en la corrosión	42
2.4.1.3 Inhibidores de corrosión.....	43
2.4.1.4 Tratamiento químico	44
2.4.1.5 Monitoreo de la corrosión	44
2.4.2 Incrustaciones	44
2.4.2.1 Elementos que favorecen la formación de incrustaciones	45
2.4.2.2 Principales parámetros que incrementan la formación de incrustaciones.....	46
2.4.2.3 Tratamiento químico	47
2.4.3 Ensuciamiento.....	48
2.4.3.1 Formación de depósito por ensuciamiento	48
2.4.3.2 Tratamiento químico	49
2.4.3.3 Métodos generales para controlar el ensuciamiento.....	49
2.4.4 Problemas microbiológicos	51
2.4.4.1 Factores que afectan los microorganismos	51
2.4.4.2 Tratamiento químico	52
2.5. Impurezas más comunes presentes en el agua de enfriamiento.....	53
2.6 Balances de masa y energía en una torre de enfriamiento	54
2.7. Definición de términos asociados al tratamiento químico del agua y a la evaluación de la torre de enfriamiento.....	60
2.7.1 Rango de enfriamiento (R).....	60
2.7.2 Caudal de recirculación (Fw).....	61
2.7.3 Ciclos de concentración (Cc)	61

2.7.4 Purga.....	61
2.7.5 Agua de reposición.....	61
2.7.6 Arrastre (A).....	62
2.7.7 Eficiencia térmica (E)	62
2.7.8 Calor retirado en la torre de enfriamiento (Q).....	63
2.7.9 Humedad absoluta másica (y).....	63
2.7.10 Humedad relativa (%y _R)	64
2.7.11 Volumen húmedo (V _H).....	64
2.7.12 Entalpía de la mezcla gaseosa (H _G).....	64
2.7.13 Temperatura de bulbo seco (T _G)	65
2.7.14 Temperatura de bulbo húmedo (T _W)	65
2.7.15 Cartas psicrométricas.....	65
2.8. Determinación de índices de estabilidad	65
2.9. Intercambiadores de calor	69
2.9.1 Intercambiadores de tubos y coraza	69
2.9.2 Componentes y nomenclatura	70
2.9.3 Componentes o partes de un intercambiador	71
2.10. Ecuaciones asociadas a los equipos de intercambio de calor.....	72
2.10.1 Área de intercambio de calor (a)	72
2.10.2 Calor retirado en el intercambiador (Q).....	72
2.10.3 Velocidad del agua a través de los tubos (V _w)	73
2.10.4 Número de pasos por los tubos (N _p).....	73
2.10.5 Diferencia de temperatura logarítmica media (MLDT).....	74
2.10.6 Coeficiente global de transferencia de calor (U)	75
2.10.7 Factor de ensuciamiento	75
2.10.8 Factor R _d	76
CAPITULOIII	77
DESARROLLO DEL PROYECTO	77

3.1 Caracterización del sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de diseño y operación	78
3.1.1 Recopilación de los datos de diseño del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas	78
3.1.2 Recopilación de los datos a las condiciones de operación	78
3.1.2.1 Condiciones de operación de la torre de enfriamiento.....	80
3.1.2.2 Porcentajes de desviación de las condiciones de operación actual de la torre de enfriamiento con respecto a las condiciones de diseño	81
3.1.2.3 Condiciones de diseño y operación de los intercambiadores de calor	82
3.2 Realización de balances de masa y energía en la torre de enfriamiento a las condiciones actuales de operación	83
3.2.1 Determinación del rango de enfriamiento en la torre	83
3.2.2 Balance de energía en la torre de enfriamiento	84
3.2.2.1 Cálculo del flujo másico del aire que circula por la torre.....	84
3.2.2.2 Determinación de la relación líquido-gas de la torre de enfriamiento	85
3.2.3 Balance de masa en la torre de enfriamiento.....	86
3.2.3.1 Determinación de la evaporación en la torre de enfriamiento .	86
3.2.3.2 Cálculo del porcentaje de agua evaporada.....	87
3.2.3.3 Cálculo del arrastre de agua de enfriamiento producido en la torre de enfriamiento.....	87
3.2.3.4 Determinación de la cantidad requerida de agua de reposición en la torre de enfriamiento	88
3.2.3.5 Cálculo del calor retirado en la torre de enfriamiento.....	89
3.2.3.6 Determinación de la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento	89

3.3 Seguimiento a las líneas de tubería que permitan la localización de fugas o pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento	90
3.3.1 Inspección visual a las líneas de tubería.....	90
3.3.2 Balance de masa de agua en los límites de batería de cada unidad de proceso	91
3.4 Estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de enfriamiento	92
3.4.1 Calor retirado en los intercambiadores de calor	92
3.4.2 Velocidad del fluido a través de los tubos en los intercambiadores de calor	93
3.4.3 Diferencia de temperatura logarítmica media (MLDT).....	93
3.4.4 Coeficiente global de transferencia de calor	94
3.4.5 Factor de ensuciamiento Rd	95
3.5 Comprobación de la efectividad del tratamiento químico del agua de enfriamiento.....	95
3.5.1 Análisis de la tendencia corrosiva o incrustante del agua de enfriamiento	96
3.5.2 Ciclos de Concentración de la torre de enfriamiento.....	97
3.5.3 Determinación de los parámetros críticos del agua de enfriamiento	98
CAPITULOIV.....	99
RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
4.1 Caracterización del sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de diseño y operación	99
4.1.1 Condiciones de diseño y operación actual de la torre de enfriamiento	99
4.1.2 Porcentajes de desviación de las condiciones de operación actual de la torre de enfriamiento con respecto a las condiciones de diseño .	104

4.1.3 Condiciones de diseño y operación actual de los intercambiadores de calor	105
4.2 Realización de balances de masa y energía en la torre de enfriamiento a las condiciones actuales de operación	108
4.2.1 Rango de enfriamiento	108
4.2.2 Flujo másico del aire en la torre de enfriamiento.....	111
4.2.3 Relación líquido/gas	111
4.2.3 Porcentaje de agua evaporada en la torre de enfriamiento.....	113
4.2.4 Arrastre en la torre de enfriamiento.....	115
4.2.5 Calor retirado en la torre de enfriamiento.....	116
4.2.6 Eficiencia térmica de la torre de enfriamiento	118
4.3 Seguimiento a las líneas de tubería para la localización de fugas o pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento	119
4.3.1 Inspección Visual a las líneas de tubería	119
4.3.2 Balance de masa de agua en los límites de batería.....	121
4.4 Estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor	126
4.5 Comprobación de la efectividad del tratamiento químico del agua de enfriamiento.....	130
4.5.1 Tendencia corrosiva o incrustante del agua de enfriamiento	131
4.5.2 Ciclos de concentración de la torre de enfriamiento	132
4.5.3 Parámetros químicos críticos del agua de enfriamiento.....	133
4.6 Conclusiones	136
4.7 Recomendaciones.....	138
BIBLIOGRAFÍA.....	140
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	142

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.Ubicación geográfica del mejorador de crudo PDVSA Petromonagas [1].....	25
Figura 2.1. Diagrama de una torre de enfriamiento ^[9]	37
Figura 2.2. Esquema de los diferentes mecanismos de corrosión ^[10]	42
Figura 2.3. Diagrama simplificado del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas [7].....	55
Figura 2.4. Intercambiador de tubos y coraza.....	70
Figura 2.5. Esquema de un intercambiador de tubo y coraza ^[13]	75
Figura 4.1 Paquete de inyección de hipoclorito original, y el sistema portátil utilizado actualmente en el mejorador Petromonagas para sustituir el sistema de inyección original	103
Figura 4.2 Rangos de enfriamiento operacional y de diseño en la torre de enfriamiento	110
.Figura 4.3 Relación líquido/gas operacional y de diseño en la torre de enfriamiento	113
Figura 4.4 Porcentaje de agua evaporada respecto al porcentaje de diseño de la torre de enfriamiento	115
Figura 4.5 Arrastre de operación actual respecto al arrastre de diseño de la torre de enfriamiento.....	116
Figura 4.6 Calor retirado respecto al diseño en la torre de enfriamiento ...	117
Figura 4.7 Eficiencia térmica operacional respecto a la eficiencia térmica de diseño de la torre de enfriamiento.....	119
Figura 4.8 Variaciones del pH en el agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual, con respecto a sus parámetros de diseño	134

Figura 4.9 Variaciones del cloro libre en el agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual, con respecto a sus parámetros de diseño

..... 135

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Solubilidad del carbonato y sulfato de calcio ^[6]	47
Tabla 2.2. Impurezas más comunes presentes en el agua de los sistemas de enfriamiento ^[11]	53
Tabla 2.3. Constante A a diferentes Temperaturas ^[6]	67
Tabla 2.4. Constante B a diferentes valores de Sólidos totales disueltos ^[6] .	67
Tabla 2.5. Índices de estabilidad de Langelier (IL) y Ryznar (IR) y sus tendencias ^[6]	68
Tabla 3.1 Instrumentos utilizados en la recolección de datos operacionales actuales	79
Tabla 4.1 Condiciones de diseño y operación actual de la torre de enfriamiento	100
Tabla 4.2 Valores de los parámetros químicos del agua de la torre de enfriamiento a las condiciones de diseño y de operación actual (septiembre a noviembre de 2009)	102
Tabla 4.3 Porcentajes de desviación de operación actual con respecto al diseño de la torre de enfriamiento	105
Tabla 4.4 Valores de diseño y operación actual de los intercambiadores de calor	107
Tabla 4.5 Resultados de la evaluación del funcionamiento de la torre de enfriamiento	108
Tabla 4.6 Equipos asociados al sistema de agua de enfriamiento	120
Tabla 4.7 Distribución del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas en los límites de batería de cada unidad de proceso	122
Tabla 4.8 Distribución de las pérdidas de agua de enfriamiento	123
Tabla 4.9 Porcentajes de desviación de los flujos de agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual respecto al diseño	124

Tabla 4.10 Pérdidas de calor actual en la torre de enfriamiento y su porcentaje de desviación operacional respecto al diseño	125
Tabla 4.11 Variaciones en las temperaturas de entrada y de salida a las condiciones de operación, respecto a las temperaturas de diseño reportadas en los intercambiadores de calor	127
Tabla 4.12 Resultados obtenidos de las condiciones de operación actual de los intercambiadores de calor con respecto al diseño	128
Tabla 4.13 Tendencia del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas; por Langelier (IL) y Ryznar (IR).....	131
Tabla 4.14 Ciclos de concentración de la torre de enfriamiento a las condiciones actuales respecto a su diseño.....	132
Tabla 4.15 Parámetros químicos críticos del sistema de agua de enfriamiento	133

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

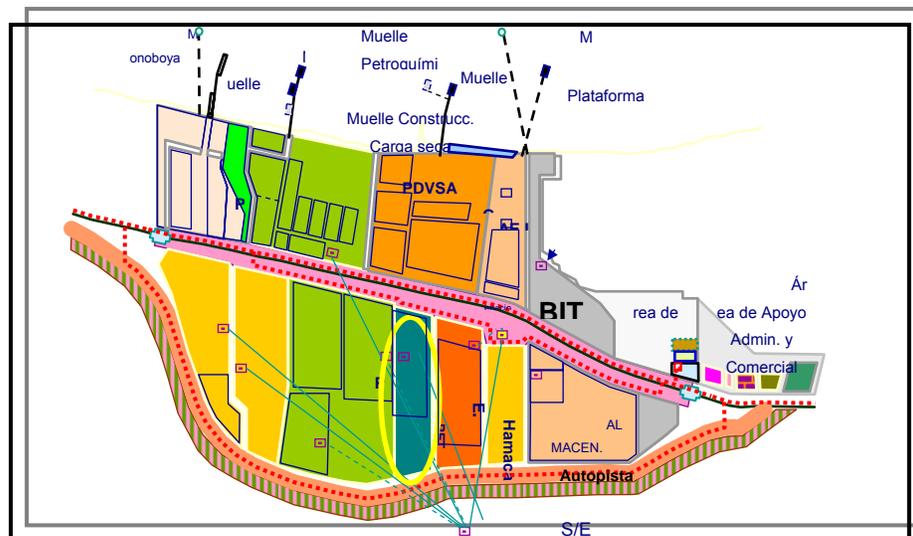
La Faja Petrolífera del Orinoco se considera única en el mundo por sus cuantiosos recursos. Venezuela posee entre 100 y 270 millardos de barriles de reservas recuperables de crudo extra-pesado, las cuales se encuentran fundamentalmente en esa zona. Por ello, PDVSA se unió con tecnología y capital a diferentes empresas petroleras multinacionales para explotar estas reservas ^[1].

Estas asociaciones estratégicas tienen como propósito fundamental, el mejoramiento del petróleo extra-pesado con una gravedad de 8 a 9 °API, hasta un crudo sintético con una gravedad entre 16,5 y 32 °API.

Para 1999 en el país fueron establecidas cuatro asociaciones concebidas para el aprovechamiento de las reservas de la Faja del Orinoco:

- **Petrozuata.** Asociación entre PDVSA (49,9%) y Conoco (50,1%), para la explotación de los recursos del área de Zuata.
- **Organización Cerro Negro.** En esta asociación participaban las empresas Exxon-Mobil (41,67%) y Veba Oil (16,67%) junto a PDVSA (41,67%), con actividades en el área de Cerro Negro.
- **Sincor.** Sincrudos de Oriente, una asociación entre Total Elf (47%), Statoil (15%) y PDVSA (38%), ubicada en el área de Zuata.
- **Hamaca.** En la que participan PDVSA (30%) junto a Conoco Phillips (40%) y Chevron-Texaco (30%), para la extracción de crudo del área de Hamaca.

Las plantas de mejoramiento de crudo de estas cuatro asociaciones estratégicas fueron ubicadas en el Complejo Industrial, Petroquímico y Petrolero, General José Antonio Anzoátegui, situado en la costa centro norte del estado Anzoátegui (ver figura 1.1)



**Figura 1.1. Ubicación geográfica del mejorador de crudo PDVSA
Petromonagas [1]**

1.1 Reseña histórica de la empresa

El 28 de Octubre de 1997 se constituyó la empresa Operadora Cerro Negro; 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 (41,67%), Exxon Mobil (41,67%) y British Petroleum (16,67%).

Para el mes de octubre del año 1999 se logró la primera producción de crudo. En el mes de diciembre del mismo año salió el primer cargamento de

crudo diluido (despacho no mejorado) y fue en octubre del año 2001 cuando se tuvo el primer embarque de crudo mejorado. Según el artículo 5200 publicado en la Gaceta Oficial el 26 de febrero de 2007, Petrolera Petromonagas pasó a ser empresa mixta, de la República Bolivariana de Venezuela, una asociación entre PDVSA y British Petroleum. El 1 de mayo de 2007, la empresa fue nacionalizada y a partir del 21 de febrero de 2008, pasó a ser PDVSA Petromonagas. El crudo extra-pesado es tratado bajo procesos químicos que mejoran el crudo Hamaca proveniente de la Faja Petrolífera del Orinoco 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.

En su misión se incluye producir y mejorar hidrocarburos de manera eficiente, cumpliendo con los compromisos adquiridos, en armonía con el ambiente. Asegurando el desarrollo endógeno del entorno; alineados con el plan de la nación, transformando lo obtenido en ganancias para el pueblo con un adicional para los socios que corresponde al retorno de su inversión, manteniendo las premisas establecidas por el ente garante. Para ello Petromonagas mantiene su visión de optimizar los recursos asignados, e innovar al mínimo costo de inversión para obtener el máximo de beneficios que serán retribuidos en planes para la nación: mejorar la calidad de vida, alcanzar excelencia en gestión empresarial y trabajo mancomunado de los socios, logrando así el manejo eficiente de los recursos.

1.2 Planteamiento del problema

El sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas (Unidad 42 CWS) está constituido por 27 intercambiadores de calor, 5 condensadores, una torre de enfriamiento de tiro inducido con dos celdas de

la misma capacidad, las cuales son capaces de enfriar una corriente de entrada de 3.293,31 m³/h, distribuidos entre ambas celdas y retirar 45,74 MMkcal/h en toda la torre de enfriamiento, tres bombas de recirculación, una piscina de agua, líneas de suministro / retorno e instrumentación asociada y el paquete de inyección de químicos para el tratamiento del agua recirculante, que permiten el desempeño eficiente y la confiabilidad operacional de los diferentes equipos asociados.

Actualmente se reporta que los ciclos de concentración entre los niveles de sólidos disueltos de la purga y del agua de reposición de la torre de enfriamiento, se mantienen muy por debajo del diseño (4,9), y aún así en la piscina de la torre no se realizan purgas continuas; pero se presenta un incremento en el agua de reposición como si se realizaran purgas continuas, el cual es considerable debido a los bajos ciclos de concentración que se manejan. Si existe una reducción en los ciclos de concentración, debe aumentar la purga ya que los componentes en el agua de recirculación se concentran muy rápido, por lo que es necesario purgar el sistema, lo que trae consigo un incremento en el agua de reposición.

En el sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, deberían realizarse purgas continuas en la torre de enfriamiento para remover los iones que se concentran en el agua de recirculación, debido a los bajos ciclos de concentración reportados. Y con base en esto, debería ser aumentada la cantidad de agua de reposición. Actualmente a pesar de que no se localizan o cuantifican las pérdidas del agua ajenas a la evaporación, purga y arrastre, el sistema sigue reponiendo la cantidad de agua requerida para mantener el nivel en la piscina (80%), ocasionando un incremento en el suministro de agua de reposición y mayor requerimiento de los productos químicos empleados en el tratamiento del agua de enfriamiento.

Con respecto al tratamiento químico, se ha presentado problemas en la inyección del ácido sulfúrico, pues han ocurrido variaciones en el pH del agua de enfriamiento por encima del rango establecido de 8 a 8,5; reportándose actualmente valores mayores a 8,5 provocando así una tendencia incrustante en el agua. Asimismo en la actualidad el paquete de inyección de hipoclorito no se encuentra operativo, pues el sistema original fue sustituido por un sistema portátil contenedor de hipoclorito (*portafieed* de cloro), por pequeñas bombas dosificadoras y por líneas de suministro (mangueras). Estas condiciones han originado falta de continuidad en la dosificación debido a efectos mecánicos, fallas presentes en las bombas y la corrosión que se origina en la línea de suministro, lo que se ve reflejado en las variaciones del residual de cloro libre establecido (0,20-0,60 ppm). En los últimos meses se ha reportado residuales de cloro libre por debajo del mínimo o por encima del máximo.

Con base en lo expuesto anteriormente ha surgido la necesidad de realizar una evaluación del sistema de agua de enfriamiento a fin de poder ubicar y cuantificar las pérdidas de agua presentes en dicho sistema y luego verificar el funcionamiento del tratamiento químico. Para ello se hizo necesario identificar todos los equipos que conforman el sistema de enfriamiento y así definir sus condiciones de diseño y de operación. Adicionalmente realizar mediciones de campo a fin de caracterizar el sistema de enfriamiento a las condiciones actuales de operación. También evaluar las condiciones actuales de la torre de enfriamiento (temperaturas de entrada y salida del aire, flujo y temperaturas de entrada y salida del agua), permitiendo realizar los balances de masa y energía y determinar si es en ella donde se localizan las pérdidas ajenas a la evaporación, purga y arrastre. Además, realizar seguimiento a las líneas de tuberías que conforman el sistema de enfriamiento desde la torre de enfriamiento hacia

cada una de las distintas unidades de proceso; para visualizar la localización de fugas o pérdidas considerables del agua de enfriamiento; evaluación de los intercambiadores según el consumo de agua de enfriamiento, permitiendo así localizar cual de éstos formaban parte de los equipos críticos del sistema y en cuál de ellos se generaban pérdidas de agua de enfriamiento. Para ello hubo que determinar en campo los flujos y las temperaturas de entrada y salida de dichos equipos y calcular su factor de ensuciamiento.

Por otra parte se realizó un monitoreo de la dosis de inyección diaria de ácido sulfúrico y de hipoclorito en función del tiempo, a fin de visualizar su efecto sobre el pH y el cloro residual presentes en el agua de enfriamiento.

La cuantificación y localización de la cantidad de agua perdida y la efectividad del tratamiento químico en el sistema de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, se verá reflejada en una reducción del suministro de agua cruda así como menor requerimiento de productos químicos, lo cual representa un beneficio económico y un mejor desempeño de los equipos asociados que serán sometidos a futura automatización.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el sistema de agua de enfriamiento de la unidad de servicios industriales de una planta mejoradora de crudo extrapesado

1.3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de diseño y operación.
2. Realizar balances de masa y energía en la torre de enfriamiento a las condiciones actuales de operación.
3. Hacer seguimiento a las líneas de tubería que permitan la localización de fugas o pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento.
4. Estudiar el funcionamiento de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de enfriamiento.
5. Comprobar la efectividad del tratamiento químico del agua de enfriamiento.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Guaramata [2] en 2002 realizó una evaluación del funcionamiento de los sistemas de enfriamiento por recirculación de agua en la empresa metalúrgica, Orinoco Iron C.A. La finalidad de su estudio fue mantener las condiciones operacionales en los límites de control establecidos. Para alcanzar su objetivo determinó las fugas de agua en el sistema haciendo seguimientos a las líneas de tubería y los equipos involucrados en el sistema de enfriamiento, lo cual permitió identificar los equipos críticos del sistema y así lograr disminuir el flujo de agua de reposición. Determinó las variables operativas de la torre de enfriamiento, permitiéndole hacer una evaluación con base en el diseño. Este trabajo es tomado como referencia para determinar las pérdidas de agua no cuantificadas en el Mejorador Petromonagas, tomando en consideración su estudio de las líneas de tubería; como también hallar equipos críticos presentes en el sistema de agua de enfriamiento del Mejorador que permitan lograr una disminución en el flujo de agua de reposición en dicho sistema.

Vital [3] en el 2003 realizó una evaluación del sistema de agua de enfriamiento para la optimización del proceso productivo de una planta de fertilizantes nitrogenados. Ejecutó una recopilación de las condiciones de diseño y de operación normal del sistema de agua de enfriamiento. En dicho estudio estableció los fundamentos para la evaluación del sistema, así como los parámetros básicos para determinar los equipos críticos presentes en él;

previa a la evaluación determinó la eficiencia actual de los equipos. Realizó hojas de cálculos que permiten estimar de manera automática las condiciones generales del sistema. Esta evaluación constituye la base fundamental para estudiar los equipos críticos pertenecientes al sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas.

Rondón [4] en 2005 evaluó el control de los parámetros de calidad del agua en los sistemas de generación de vapor y enfriamiento en una industria cervecera. La evaluación consistió en la revisión del funcionamiento del sistema de control automático de purga en las unidades de generación de vapor; se estudiaron los procedimientos empleados para la dosificación de químicos en ambos sistemas, donde se realizó ajustes a las bombas dosificadoras de químicos mediante la revisión de la programación de las mismas y el ajuste de la dosificación con respecto al flujo de reposición. Elaboró un manual de aplicación del tratamiento químico de los sistemas de enfriamiento, dirigido al personal de la sala de máquinas contentivo de la información necesaria para la correcta operación del sistema. Este trabajo será tomado como base en el control de los parámetros de calidad del agua presentes en el sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas.

Martínez [5] en el 2008, evaluó la eficiencia del tratamiento químico aplicado a las torres de enfriamiento de la refinería Puerto La Cruz; en ella realizó pruebas de pH, alcalinidad, dureza, entre otros parámetros para el cálculo de los índices de Langelier y Ryznar. En segundo lugar realizó cálculos en función de las cantidades de tratamiento químico anticorrosivo y anti-incrustante, con la finalidad de analizar la tendencia corrosiva e incrustante de los sistemas de enfriamiento. Con base en este estudio se realizaron los respectivos análisis y cálculos necesarios para

determinar la eficiencia química del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas.

2.2. Sistemas de agua de enfriamiento de la unidad de servicios industriales del mejorador de crudo extrapesado PETROMONAGAS

El sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas está constituido por 27 intercambiadores de calor, 5 condensadores y una torre de enfriamiento que comprende dos celdas, cada una de ellas tiene 60 % de la capacidad de diseño. La torre es de tiro inducido y está constituida por dos celdas independientes, de la misma capacidad; capaz de enfriar una corriente de entrada de 3.293,31 (m³/h) y retirar 45,74 MMKcal/h entre ambas celdas, dos ventiladores, tres bombas de recirculación. Normalmente una bomba accionada por turbina y otra accionada por motor se mantienen en servicio, mientras que la tercera bomba también accionada por motor, permanece disponible en posición automático. También se dispone de una piscina de agua, líneas de suministro / retorno y la instrumentación asociada. Su función principal es remover el calor absorbido por el agua durante el proceso de enfriamiento de los diferentes equipos que integran el Mejorador.

Éste es un sistema recirculante, es decir que el agua es retornada a la torre una vez que cumple su proceso, utilizando para ello un sistema de recirculación abierta, en el cual el calor es expulsado en la torre de enfriamiento a través de la evaporación de una fracción del agua, causando pérdidas de agua producto de la evaporación, arrastre y concentración de los sólidos disueltos. La capacidad de diseño del sistema de agua de enfriamiento es para circular 3293,31 m³/h (14.500 gpm) y enfriar el agua de retorno de 45,56 °C a 31,67 °C, (114 a 89) °F. La capacidad de diseño

incluye un margen de alrededor de 25 % de la capacidad de enfriamiento requerido en el funcionamiento normal de todas las unidades.

El agua perdida por evaporación y purga debe ser repuesta con agua fresca (agua de reposición) por medio del control de nivel de la piscina LIC-42001 / LV-42001, al sistema a través de las bombas P-4101 A/B/C desde el tanque de agua cruda TK-4101. En el diseño de este sistema de agua de enfriamiento, los ciclos de concentración de los iones presentes en el agua recirculante y los iones del agua de reposición están ajustados para estar en 4,9 ciclos, asignando un flujo de 108,34 m³/h (477 gpm) de reposición y 22,26 m³/h (98 gpm) de flujo de purga, respectivamente. El total de sólidos disueltos (TDS) del agua de circulación no debe exceder 1.176 mg/l. Si los sólidos disueltos totales son mayores que 1.176 mg/l, los ciclos de concentración se incrementan y puede causar la formación de incrustaciones en el sistema.

2.3. Sistemas de enfriamiento

2.3.1 Principio de enfriamiento

La transferencia de calor es una operación común en la mayoría de los procesos industriales.

En sus sistemas de enfriamiento y refrigeración, el fluido más utilizado para realizar la transferencia es el agua, la cual, debido a sus características requiere de un acondicionamiento o tratamiento para controlar y minimizar los problemas de corrosión, incrustaciones, ensuciamiento de tipo microbiológico que se presentan en estos sistemas, a fin de mantenerlos en

condiciones operativas confiables, preservar los equipos e incrementar su eficiencia ^[6].

El agua generalmente es utilizada como medio de enfriamiento a escala industrial, por poseer una baja viscosidad, alta densidad, alto calor específico y alta conductividad térmica, pero sobre todo es abundante y de bajo costo ^[7].

A partir de la creación de rigurosas leyes que rigen la protección ambiental se toma la decisión de reutilizar el agua en lugar de eliminarla, y esto se logra mediante el uso de torres de enfriamiento. Básicamente en la torre ocurren dos tipos de transferencia de calor entre el agua caliente y el aire. Una es la conversión de una porción de agua líquida a vapor, por la absorción de calor de vaporización, ocasionado una disminución en la temperatura del agua. La otra transferencia de calor ocurre cuando la temperatura del aire es menor que la temperatura del agua. En este caso se transfiere calor del agua al aire, aumentando éste su temperatura y bajando la temperatura del agua (calor sensible).

La posible eliminación teórica de calor por libra de aire circulando en una torre de enfriamiento, depende por una parte de la temperatura de bulbo húmedo, la cual se define como la temperatura de no equilibrio que para estado estacionario alcanza una pequeña masa de líquido cuando se encuentra sumergido, en condiciones adiabáticas, en una corriente continua de gas. Esta temperatura indica el contenido de humedad presente en el aire; por lo tanto, es la temperatura teórica más baja a la que puede enfriarse el agua; por otra parte indica el contenido de humedad del aire ^[8].

Cuando un líquido caliente se pone en contacto con un gas no saturado, parte del líquido se evapora, disminuyéndose su temperatura. Este enfriamiento del líquido es el propósito de muchas operaciones de contacto gas-líquido, especialmente en el caso del sistema aire-agua.

La finalidad de una torre de enfriamiento es conservar el agua de enfriamiento reutilizando numerosas veces el agua fría. El agua caliente que procede generalmente de un condensador u otra unidad de transmisión de calor, se introduce por la parte superior de la torre y se distribuye mediante bateas y vertederos de rebose, cayendo en forma de cascada sobre un enrejado de tablillas que proporciona grandes áreas de contacto entre el aire y el agua. El flujo ascendente de la torre es inducido por el viento y por la flotación del aire caliente en la torre. En principio, una torre de enfriamiento es un tipo especial de torre de relleno.

En la torre, una parte del agua se evapora en el aire y se transfiere calor sensible desde el agua caliente hacia el aire más frío. Ambos procesos disminuyen la temperatura del agua. Para mantener el balance de agua, solamente se requiere reponer las pérdidas por evaporación y de arrastre por el viento. La pérdida de agua por evaporación durante el enfriamiento es pequeña. Puesto que aproximadamente se necesitan 1000 Btu para vaporizar una libra de agua, además se producen pérdidas por arrastre mecánico, aunque en una torre bien diseñada este efecto solamente supone un 0,2% [8].

2.3.2 Función de la torre de enfriamiento

Las torres de enfriamiento (ver figura 2.1) son los equipos encargados de disipar grandes cantidades de calor, que se generan en los procesos

industriales. El agua es el medio más utilizado para la eliminación de calor, y las torres de enfriamiento son los equipos más eficientes para su disipación. En ellas, el agua caliente se pone en contacto con una corriente de aire para favorecer el enfriamiento.

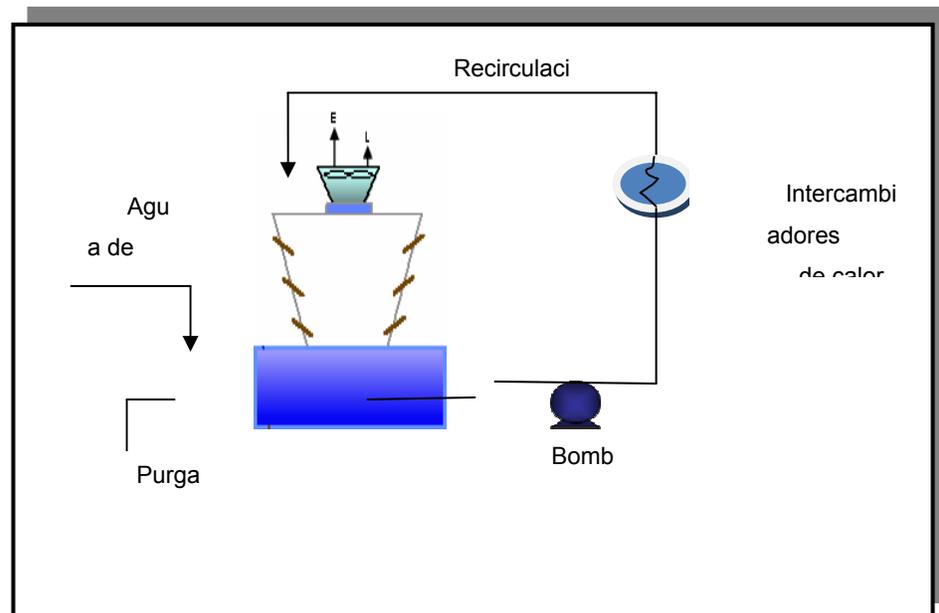


Figura 2.1. Diagrama de una torre de enfriamiento ^[9]

2.3.3 Clasificación de las torres de enfriamiento

2.3.3.1 Clasificación por proceso

A. Enfriamiento directo: el agua fría va directamente al proceso y regresa como agua caliente a la parte superior de la torre.

B. Enfriamiento indirecto: el agua fría intercambia calor con un equipo (intercambiador de calor) y regresa como agua caliente a la parte superior de la

torre, en el intercambiador de calor el fluido frío pasa por el proceso, intercambia calor y regresa al intercambiador como fluido caliente ^[9].

2.3.3.2 Clasificación de las torres de enfriamiento

A. Torre de tiro natural: en las torres de tiro natural, el flujo de aire depende de la atmósfera circundante, la que establece la diferencia en densidades entre el aire más caliente dentro de la torre y la atmósfera externa; la velocidad del viento también afecta el funcionamiento ^[7].

Las torres de tiro natural se clasifican en:

- **Torres atmosféricas:** son torres relativamente altas y se caracterizan por no poseer ningún mecanismo para circular el aire a lo largo de la torre y donde el contacto entre las fases se produce entre el rociado del líquido y el aire que pasa a través de la torre, debido a que no existe un relleno que facilite la transferencia de calor entre las mismas. Se utilizan cuando la temperatura del agua es muy alta. Las pérdidas de agua por arrastre son muy elevadas.
- **Torres hiperbólicas:** tienen forma de chimenea para facilitar la salida del aire. Son construidas de cemento armado, a veces de varios metros de altura e igual longitud en la base. Deben su nombre al diseño hiperbólico de la carcasa; el cual facilita la salida del aire. El aire fluye a través de ella por medio de la diferencia de densidades que existe entre el aire caliente (menos denso) dentro de la torre y el aire frío del ambiente. No utilizan un dispositivo mecánico para circular el aire.

Estas torres manejan grandes cantidades de flujo de agua y las pérdidas por arrastre son pequeñas. Su funcionamiento está sujeto a cambios de dirección e intensidad del viento, humedad relativa, presión

atmosférica y temperatura. Su costo operacional es menor que las torres convencionales. Son utilizadas en sitios donde la energía es muy costosa [7].

B. Torre de tiro mecánico: utilizan ventiladores para mover el aire con mayor velocidad, lo cual permite acelerar el enfriamiento del agua y aumentar la eficiencia de la torre. Poseen empaques para proporcionar un buen contacto entre el aire y el agua pero con una mínima caída de presión del aire.

La máxima caída de presión en el aire es de 2 pulgadas. El régimen del agua de circulación es de 500-2.000 lb/hpie² (1-4 gpm/pie²). La relación líquido a gas (L/G) es de 0,75 a 1,50. el número de unidades de transferencia varía entre 0,5 a 2,50. Las torres de tiro mecánico se clasifican en:

- **Torres de tiro forzado:** el ventilador se coloca en el fondo de la torre de enfriamiento y se hace entrar el aire por el fondo de la misma y se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta disposición tiene la ventaja de ubicar el ventilador y el motor propulsor fuera de la torre, sitio muy conveniente para la inspección, el mantenimiento y la reparación de los mismos. Como el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está sometido a condiciones corrosivas; sin embargo dada la escasa velocidad del aire a la salida, la torre de tiro forzado está sujeta a una recirculación excesiva del gas húmedo de salida que retorna a las entradas del aire. Existe una reducción en la eficiencia térmica de la torre debido a que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circundante.

- **Torres de tiro Inducido:** es el tipo de torre más ampliamente usado en la industria de procesos. Los ventiladores están colocados a la salida del flujo de aire. Tienen una velocidad de descarga del aire de 3 a 4 veces mayor que la velocidad del aire de entrada, evitándose la recirculación del aire húmedo y caliente. La distribución del aire es mucho más uniforme. La localización de los

ventiladores en una posición elevada puede conducir a problemas estructurales y de ruido. Se pueden construir en grupos o celdas que son pequeñas subdivisiones de la torre, las cuales pueden funcionar como una unidad independiente. Los grupos de celdas dan la apariencia de una sola torre^[7].

2.3.3.3 Clasificación de acuerdo a la dirección del flujo de aire y el agua

A. Torres a contracorriente o contra flujo: el aire se mueve verticalmente a través de la torre y se pone en contacto sobre el relleno, con el líquido que se descarga por las boquillas y desciende hasta llegar al fondo (piscina). Estas torres requieren mayor altura de bombeo. Su configuración es más eficaz ya que el agua más fría entra en contacto con el aire frío en el fondo de la torre, obteniéndose un potencial máximo de entalpía. Presenta un incremento en la potencia del ventilador como resultado del flujo de aire en la dirección opuesta al flujo de agua. Son las más utilizadas en la industria de procesos^[10].

B. Torres de flujo cruzado: tienen una configuración a través del cual el aire fluye horizontalmente y se pone en contacto en forma cruzada con el agua que desciende. Ofrecen menos resistencia al flujo de aire ya que operan a velocidades más elevadas y presentan una reducción en la potencia del ventilador. Sin embargo, pueden presentar problemas por inducción del aire saturado que sale por la parte superior de la torre si el inducido de los ventiladores no es el adecuado. De acuerdo al número de relleno se clasifican en:

- **Torres de flujo cruzado:** el ventilador induce el flujo de aire a través de dos entradas y cruza dos bancos de relleno.
- **Torres de flujo simple:** la torre solo tiene una entrada de aire y un banco de relleno^[10].

2.3.4 Tratamiento químico del agua de enfriamiento

Los sistemas abiertos recirculantes (evaporativos) y los sistemas de un solo paso están expuestos a grandes cantidades de solutos, sólidos suspendidos y materiales biológicos. En consecuencia, la suciedad y la corrosión asociadas son generalmente más significativas en los sistemas abiertos que en los sistemas en realidad cerrados ^[7]. El enfriamiento por evaporación es el resultado de la evaporación de una parte del agua circulada. A medida que el agua se evapora los sólidos en suspensión se quedan en el sistema. La concentración de estos sólidos hace que se precipiten rápidamente y puedan llevar a niveles de concentración inaceptables. Además, una variedad de microorganismos son introducidos a través del aire usado para el enfriamiento o a través del agua de reposición y también ciertas impurezas. De no ser controlados dichos agentes pueden causar corrosión, formación de lodos o contaminación biológica. Los principales objetivos de un tratamiento químico del agua de enfriamiento son minimizar la corrosión, las incrustaciones, los depósitos o ensuciamiento y el crecimiento microbiológico ^[9].

2.4. Problemas presentes en los sistemas de enfriamiento

2.4.1 Corrosión

La corrosión puede definirse como el deterioro que sufre un material (habitualmente un metal) en sus propiedades, por interacción química, electroquímica o metalúrgica debido a una reacción con el medio que lo rodea. Generalmente es lenta, pero de carácter persistente, y no siempre involucra un cambio de peso o un deterioro visible, ya que muchas formas de

corrosión se manifiestan por un cambio de las propiedades de los materiales, disminuyendo su resistencia.

2.4.1.1 Tipos de corrosión

Los mecanismos de corrosión en un sistema de enfriamiento se clasifican en dos tipos: corrosión general y corrosión localizada. De éstas la más peligrosa y dañina es la segunda. Los diferentes mecanismos de corrosión se visualizan en la siguiente figura.

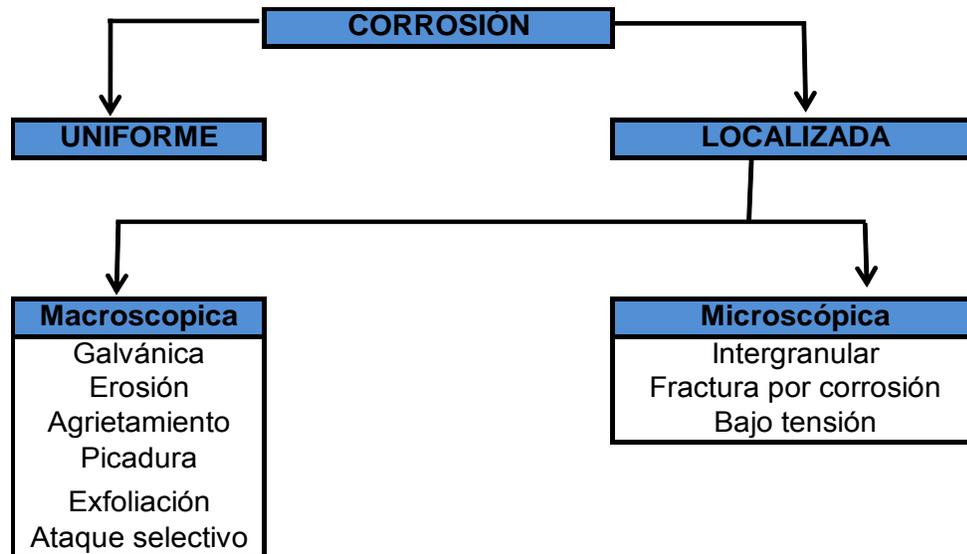


Figura 2.2. Esquema de los diferentes mecanismos de corrosión ^[10]

2.4.1.2 Factores que influyen en la corrosión

- **Temperatura:** la velocidad de corrosión tiende a aumentar con el incremento de la temperatura. La temperatura tiene efectos secundarios por su influencia sobre la

solución del aire (oxígeno), que es la sustancia oxidante más común que influye en la corrosión.

- **Oxígeno disuelto:** el efecto del oxígeno disuelto sobre la rapidez de corrosión es doble: actúa en la formación de óxidos y como despolarizador catódico. Si la formación de óxido elimina los iones metálicos del metal, se incrementará la corrosión.
- **Agentes oxidantes:** son frecuentemente aceleradores poderosos de la corrosión y, en muchos casos, el poder oxidante de una solución es su propiedad simple más importante, en lo que se refiere a corrosión.
- **Velocidad:** un aumento de la velocidad del movimiento relativo entre una solución corrosiva y una superficie metálica tiende a acelerar la corrosión, debido a la mayor rapidez con que los productos químicos corrosivos llegan a la superficie que se corroe y a la mayor rapidez con que los productos de la corrosión, que podría acumularse y reducir la corrosión de la misma, se retiran.
- **pH de la solución:** afecta la velocidad de corrosión de la mayor parte de los metales; el pH afecta según la combinación del metal y el ambiente ^[6].

2.4.1.3 Inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión son sustancias que cuando son agregadas a un medio acuoso disminuyen la velocidad de ataque del medio sobre el metal. Los inhibidores son comúnmente agregados en pequeñas cantidades y en forma continua para mantener la concentración requerida y, de esta forma, lograr su efecto inhibitor. Existen tres tipos de inhibidores de corrosión para agua de enfriamiento: anódicos, catódicos y orgánicos ^[6].

2.4.1.4 Tratamiento químico

La inyección de inhibidores de corrosión (inhibidores pasivantes anódicos) es la manera más práctica para controlar la corrosión, ya que éstos forman una película protectora del óxido sobre la superficie de metal. Ellos son los mejores inhibidores porque pueden ser usados en concentraciones económicas, y sus películas protectoras son tenaces y tienden a ser reparadas rápidamente, en caso de que se dañen ^[6].

2.4.1.5 Monitoreo de la corrosión

Existen dos métodos para medir la corrosión en un sistema de enfriamiento. Uno es mediante cupones de corrosión, a los cuales se les determina la pérdida de peso en un determinado período para un metal específico, y el otro método es por medidas eléctricas, donde la pérdida del metal es determinada por el cambio en la resistividad o polarización de la muestra. En este caso se utilizan equipos denominados *corrater* ^[7].

2.4.2 Incrustaciones

Reciben el nombre de incrustaciones los depósitos minerales duros y fuertemente adheridos a una superficie metálica, que provienen de la precipitación de ese mineral desde el seno del agua ^[7]. Los depósitos y/o incrustaciones son formados por la precipitación y crecimiento de cristales en una superficie en contacto con el agua. La precipitación ocurre cuando las concentraciones de materiales sólidos exceden su límite de solubilidad en el volumen de agua o sobre la superficie. En los sistemas de enfriamiento pueden consistir en sales precipitadas por el agua de enfriamiento o en productos de corrosión formados “in situ” o en otras partes del sistema. Las aguas duras

pueden formar incrustaciones de carbonato de calcio, pero también en sistemas recirculantes pueden formarse incrustaciones de sulfato de calcio^[7].

2.4.2.1 Elementos que favorecen la formación de incrustaciones

A. Supersaturación: ocurre cuando la concentración de una sal excede su solubilidad en el agua. En un sistema de enfriamiento ésta se produce por evaporación, cambios de pH o de temperatura.

B. Nucleación: la formación inicial de un precipitado ocurre a través de una semilla origina lo que se denomina nucleación. Existen dos tipos de nucleación. La homogénea, que se manifiesta espontáneamente debido a un grado de supersaturación de las especies incrustantes que origina su propia semilla. Y la heterogénea, que ocurre cuando partículas extrañas actúan como semillas para la formación de la incrustación.

C. Tiempo de contacto: lograda la supersaturación y la nucleación, debe haber un suficiente tiempo de contacto entre la solución y los sitios nucleantes.

El tiempo puede variar de segundos a varios años, dependiendo del grado de supersaturación, del tipo y número de sitios de nucleación, temperatura, pH, etc. Cuando la incrustación está recientemente precipitada, su estructura es generalmente porosa y se puede remover con poco esfuerzo mecánico.

Por otro lado, cuando la incrustación tiene tiempo precipitada, es dura, densa, muy adherente y difícil de remover^[6].

2.4.2.2 Principales parámetros que incrementan la formación de incrustaciones

A. Temperatura: todo aumento de temperatura disminuye generalmente la solubilidad de las sales involucradas (ver tabla 2.1).

B. Concentración de los iones: en las aguas de enfriamiento recirculadas se concentran las sales disueltas producto de la evaporación, superando su punto de saturación, lo que provoca que precipiten. Cuando la cantidad de una especie incrustante disuelta en agua excede su punto de saturación se producen incrustaciones. También otros sólidos disueltos pueden influenciar la tendencia a formar incrustaciones. En general mientras mayor sea el contenido de sólidos mayor será la posibilidad de formación de incrustaciones.

C. pH: el incremento del pH ocasiona que el bicarbonato que se encuentra en el agua de recirculación se descomponga para formar CO_2 y carbonato de calcio; este comportamiento lo manifiesta la mayoría de las sales presentes en el agua, las cuales disminuyen su solubilidad cuando aumenta el pH.

Entre las sales más comunes encontradas en un sistema de enfriamiento, están el carbonato de calcio, hidróxido de zinc, óxido de hierro, silicato de magnesio, fosfato de calcio y fosfato de zinc.

Tabla 2.1. Solubilidad del carbonato y sulfato de calcio ^[6]

Sal	Solubilidad (g/l)	T (°C)
Carbonato de calcio (CaCO₃)	0,07	10
	0,065	20
	0,056	25
	0,052	30
	0,044	40
Sulfato de calcio (CaSO₄)	0,038	50
	0,232	182
	0,13	207
	0,073	244
	0,042	316

C. Sólidos suspendidos: un mayor contenido de sólidos suspendidos favorece la formación de incrustaciones porque incrementan los sitios de nucleación ^[6].

2.4.2.3 Tratamiento químico

Las incrustaciones pueden ser controladas eficazmente por uso de agentes secuestrantes y quelatos que son capaces de formar complejos solubles con iones de metal. Las propiedades de precipitación de estos complejos no son las mismas que las de los iones del metal. Este acercamiento requiere cantidades químicas estequiométricas. Cuando se produce un aumento de carbonato de calcio en el agua (CaCO₃), se realiza un choque de dispersante en la torre. Este procedimiento consiste en la inyección de gran cantidad de dispersante para eliminar los depósitos de (CaCO₃). Entonces es necesario aumentar el flujo de agua de purga ya que la cantidad de sólidos disueltos en el agua de enfriamiento aumenta ^[9].

2.4.2.4 Métodos generales para el control de las incrustaciones

A. Suavización: en aguas con altos contenidos de calcio y magnesio puede ser económicamente viable la aplicación de una suavización con cal en frío o en caliente. Muy raras veces se justifica económicamente una suavización total con resinas intercambiadoras.

B. Purga: la limitación de la concentración de las especies incrustantes, a través de la purga de parte del agua del sistema, es un método muy usado.

C. Alimentación de ácido: los ácidos especialmente el sulfúrico, se emplean para reducir la alcalinidad y el pH, con lo cual se logra de manera económica un mayor control en el potencial de formación de incrustaciones.

2.4.3 Ensuciamiento

En un sistema de enfriamiento, el ensuciamiento se define como la precipitación de materiales que no forman incrustaciones. Otra definición los señala como depósitos originados por material suspendido en el agua que se diferencia de las incrustaciones, porque estos últimos se forman a partir de material disuelto o que está en solución [7].

2.4.3.1 Formación de depósito por ensuciamiento

- Sólidos suspendidos (lodo, hierro, materia orgánica) presentes en el agua de reposición.
- Precipitación de aditivos químicos debido a un mal control.
- Sólidos suspendidos producto de la corrosión y de sales incrustantes.
- Contaminación orgánica por fuga de proceso.

- Crecimiento microbiológico.
- Partículas provenientes del aire que son introducidas al sistema de enfriamiento durante el contacto aire-agua.

El ensuciamiento descontrolado en un sistema de enfriamiento causa severos problemas de corrosión, incrustaciones y crecimiento microbiológico, que a su vez originan una baja eficiencia del sistema, altos costos de mantenimiento y pérdidas de producción por paradas no programadas ^[6].

2.4.3.2 Tratamiento químico

Se utiliza la inyección de dispersantes o reforzadores de carga ya que estos productos se adsorben sobre el material suspendido en el agua y refuerzan su carga, incrementando la fuerza repulsiva con otra película y evitando su aglomeración y posterior crecimiento, para luego precipitarse ^[9].

2.4.3.3 Métodos generales para controlar el ensuciamiento

A. Ajustes mecánicos: existen una serie de ajustes mecánicos que se pueden realizar para prevenir y controlar el ensuciamiento en un sistema de enfriamiento ^[6].

- **Clarificación y filtración del agua:** para aguas de reposición con alto contenido de sólidos suspendidos se utiliza la clarificación del agua mediante equipos convencionales o lagunas de retención. Estas son formas muy económicas de lograr la reducción de sólidos suspendidos. Otra forma de realizar la eliminación es mediante el uso de filtros que se diseñan de acuerdo con las características del agua y la calidad final que se quiere lograr.

- **Filtración colateral:** es un método muy efectivo para eliminar sólidos suspendidos. Se lleva a cabo mediante la filtración continua de un porcentaje del agua recirculante; normalmente este porcentaje se ubica entre 1 y 5 %.
- **Desviadores:** se colocan en el lado de la carcasa de un intercambiador para minimizar la vibración y servir de soporte a los tubos, además de establecer características turbulentas de flujo para mejorar la transferencia de calor.
- **Inyección de aire:** la práctica operativa consiste en la aplicación de aire en distintos puntos del intercambiador. La aplicación del aire, en términos de duración y frecuencia, depende de los resultados que se quieran lograr y otras disponibilidades que se tengan. Sin embargo, un buen inicio de esta aplicación es con inyecciones entre 15 y 30 segundos, repetida cada minuto y ejecutadas durante 5 ó 10 minutos.
- **Inversión de flujo:** este método es usado también para remover sólidos suspendidos que se han sedimentado en áreas de bajo flujo. El método es muy simple y consiste en invertir el sentido del flujo del intercambiador, de modo que las zonas estacionarias alrededor de los desviadores se conviertan en un área de flujo turbulento que permita remover la materia sólida acumulada.
- **Limpieza de la piscina de la torre:** la piscina de la torre es una zona de muy baja velocidad de flujo y alto tiempo de residencia, lo que permite a los sólidos suspendidos sedimentarse. El problema principal que ocasiona un alto volumen de sólidos suspendidos precipitados en la piscina de la torre es de tipo microbiológico, es decir, se favorece al crecimiento microbiológico con todos los problemas que esto produce en un sistema de enfriamiento.
- **Ubicación de los intercambiadores:** se refiere a la posición que tienen unos intercambiadores con respecto a otros y que puede ser determinante para la precipitación de sólidos suspendidos.

B. Productos químicos: existen dos familias de productos químicos que ayudan a controlar el problema de ensuciamiento:

- **Dispersantes:** estos productos se adsorben sobre la partícula y refuerzan su carga, incrementando la fuerza repulsiva con otra partícula y evitando su aglomeración y posterior crecimiento para luego precipitarse.
- **Reductores de tensión superficial:** la alta tensión superficial que tiene el agua se debe a que las moléculas de agua se atraen unas con otras. Para disminuir la tensión superficial se utilizan productos químicos que tienen una molécula con un extremo hidrofílico (atracción por el agua) y otro extremo hidrofóbico (repulsión por el agua)

2.4.4 Problemas microbiológicos

Los sistemas de enfriamiento y, en particular, los sistemas recirculantes abiertos son medios muy favorables para el crecimiento microbiológico, lo que contribuye a la formación de depósitos, ensuciamiento y corrosión dentro del sistema. El hecho de que en los sistemas de enfriamiento recirculantes abiertos haya actividad microbiológica, radica en que una gran variedad de microorganismos son introducidos continuamente al sistema a través del aire usado para el enfriamiento, o a través de la reposición. Estos microorganismos son bacterias, algas, hongos y protozoarios [6].

2.4.4.1 Factores que afectan los microorganismos

A. pH: los sistemas de enfriamiento recirculantes abiertos normalmente se encuentran en el lado alcalino, es decir, entre 7 y 9,5. Las algas y bacterias son insensibles a los cambios de pH; sin embargo para la mayoría de las algas su rango óptimo está entre 6 y 9,5.

B. Temperatura: la respiración, que es el estado de liberación de energía de los microorganismos, es afectada por la temperatura. Y para la mayoría de

estos, su valor óptimo de crecimiento es a 38 °C, temperatura muy común en los sistemas de enfriamiento. Las bacterias más numerosas en el sistema de enfriamiento son las Pseudomonas y las Aerobacter, y su temperatura preferida es 37 °C y 34 °C.

C. Requerimientos Nutricionales: todos los microorganismos requieren una fuente de energía para su proceso metabólico. Las lavas requieren luz solar, algunas bacterias usan el ión sulfato mientras que otras usan el hierro. También los microorganismos requieren una fuente de carbono, unos usan el dióxido de carbono, otros el carbono de fuentes orgánicas. El azufre y el fosfato son también requeridos por los microorganismos ^[6].

2.4.4.2 Tratamiento químico

En el tratamiento para controlar la actividad microbiana a menudo se requiere biocidas para matar las colonias de microbios, y dispersantes para aflojarlas y sacarlas por lavado. Los biocidas no oxidantes en algunas ocasiones han probado ser más efectivos que su contraparte oxidante. En general, se usan en combinación con los agentes oxidantes para ampliar el control. Algunos de los biocida no oxidantes son: fenoles clorinados, compuestos orgánicos de estaño, amonios e izotioazolinas.

Es preferible evitar la formación de microbios que tener que destruirlos una vez formados. Dos tipos de medidas que pueden recomendarse son:

- Evitar el uso de los productos de acondicionamiento que constituyen un posible nutriente de los microorganismos.
- Destruir las materias nutritivas presentes en el agua de circulación, empleando biocida ^[11].

2.5. Impurezas más comunes presentes en el agua de enfriamiento

El agua en estado puro no existe y dependiendo de la fuente de donde provenga contiene un sin número de impurezas. En la tabla 2.2 se muestra una lista de impurezas más comunes que afectan el tratamiento interno de las aguas utilizadas en los sistemas de enfriamiento, las cuales pueden encontrarse presentes como materia en suspensión o bien en solución.

Las impurezas presentes en el agua tienen su origen en los minerales, aire y tierra. Aquellas impurezas formadas por los minerales son conocidas como sólidos disueltos (entre ellas: calcio, magnesio, sodio, hierro), las que se originan en el aire son conocidas como gases disueltos (oxígeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono) y los de la tierra como materia en suspensión (arcilla, limo, arena, etc.).

Tabla 2.2. Impurezas más comunes presentes en el agua de los sistemas de enfriamiento ^[11]

IMPUREZAS	FORMULA QUIMICA	PROBLEMAS OCASIONADOS POR LAS IMPUREZAS
Sales de calcio y magnesio	CaCO ₃ , MgCO ₃	Fuente principal de incrustaciones en tuberías >1000ppm
Acidez mineral y libre	H ₂ SO ₄ , H ₂ S, HCl	Corrosión en tuberías de hierro y acero al carbono >500ppm a 50°F(260 °C)
Dióxido de carbono	CO ₂	Corrosión en líneas de tuberías
Sulfatos	SO ₄	Aumenta el contenido de sólidos en el agua. Se combina con el calcio para formar sales incrustantes de sulfato de calcio (CaSO ₄)
Cloruros	Cl como NaCl	Aumenta el contenido de sólidos e incrementa el carácter corrosivo del agua > 500ppm
Sílice	SiO ₄	Incrustación en sistema de agua de enfriamiento >200ppm
Hierro	Fe+2 Ferroso	Fuentes de depósitos en las tuberías < 1ppm
	Fe+3 Férrico	
Oxígeno	O ₂	Oxidación en tuberías de hierro y acero
Sólidos disueltos	—	Elevadas concentraciones de sólidos son indeseables ya que originan formación de lodos y espumas
Sólidos suspendidos	—	Originan depósitos en equipos como intercambiadores de calor y tuberías, ocasionando formación de lodos o incrustaciones
Microorganismos	Algas, limos y hongos	Formación de adherencia, suciedad biológica, corrosión, olores desagradables > 25000 bact/ml

2.6 Balances de masa y energía en una torre de enfriamiento

En la figura 2.3 se muestra un diagrama de flujo simplificado de una torre de enfriamiento donde se exponen las variables involucradas. En el diagrama, el aire con una humedad y_1 y temperatura t_1 entra por el fondo de la torre y la abandona por la parte superior con una humedad y_2 y temperatura t_2 . El agua entra por la parte superior a temperatura T_2 y sale por el fondo a la temperatura T_1 .

El flujo másico del gas es G_s expresado en kg aire seco/h. Los flujos másicos de agua a la entrada y a la salida son respectivamente L_2 y L_1 expresados en kg agua /h.

La evaluación de la torre de enfriamiento del mejorador de crudo a las condiciones actuales de operación, se realiza a través de balances de masa y energía; por lo que se hace necesario conocer diariamente todas las variables involucradas y anteriormente mencionadas.

Conocer las temperaturas de entrada y de salida a la torre, tanto del aire como del agua, así como el flujo de agua de retorno, permitirán obtener un valor diario de las pérdidas de agua que se producen en la torre de enfriamiento producto de la evaporación, purga y arrastre.

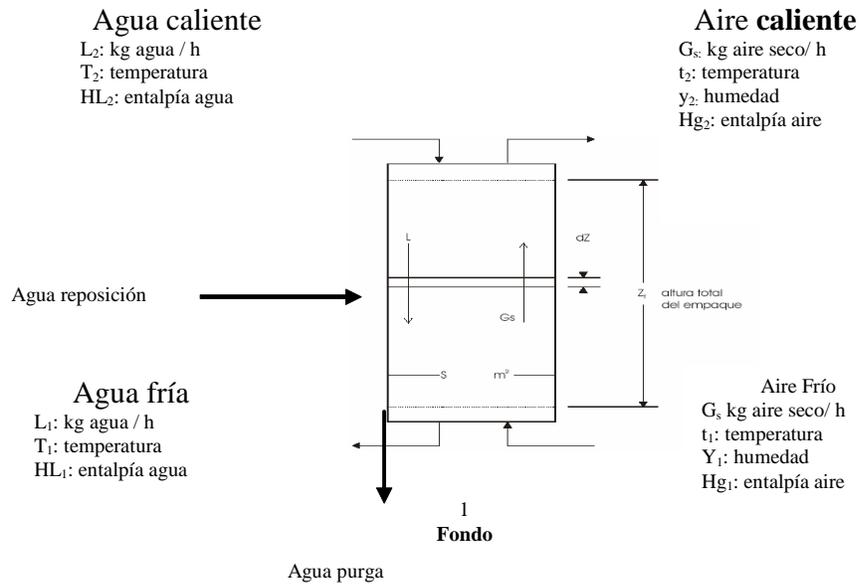


Figura 2.3. Diagrama simplificado del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas [7]

A continuación se muestran los balances de masa y de energía requeridos para realizar los cálculos en las torres de enfriamiento

- **Balance global**

Entra = Sale
 (Sin reacción química)

$$L_2 + G_s = L_1 + G_s \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

L_1 : flujo de agua fría (kg agua / h)

L_2 : flujo de agua caliente (kg agua / h)

G_s : flujo másico del aire seco (kg aire seco/ h)

• **Balance de masa referido al agua**

$$L_2 + G_s \cdot y_1 = L_1 + G_s \cdot y_2 \quad (\text{Ec.2.2})$$

Agrupando términos:

$$L_2 - L_1 = G_s (y_2 - y_1) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Agua evaporada = Agua absorbida por el aire

$$E = G_s (y_2 - y_1) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

E: cantidad de agua evaporada (kg vapor/ h)

La cantidad de agua evaporada es la cantidad de agua perdida a la atmósfera producto del enfriamiento. La tasa de evaporación depende de la cantidad de agua que se esté enfriando y del porcentaje de agua evaporada

[8]

El porcentaje de agua evaporada en una torre de enfriamiento se obtiene a partir de la siguiente expresión ^[8]:

$$\% E = \frac{E}{F_w} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

%E: porcentaje de agua evaporada (m³/h)

F_w: caudal de agua de recirculación (m³/h)

A partir del balance de masa a la torre de enfriamiento también se puede obtener el porcentaje de agua evaporada, el cual es el porcentaje de agua de recirculación perdida a la atmosfera por efecto del enfriamiento a través de la torre.

$$\% E = \frac{G_s (y_2 - y_1)}{L_2} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

%E: porcentaje de agua evaporada (%)

Otra forma de obtener el porcentaje de agua evaporada es a partir de la siguiente ecuación^[9] :

$$\% E = \left[\left(\frac{5}{9} \right) \cdot (1,8 \cdot R + 32) \right] \cdot \left[\left(\frac{5}{9} \right) \cdot ((1,8 \cdot T_{BS} + 32) - 33,667) \cdot K + 0,01098 \right] \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

K: constante de evaporación

T_{BS} : temperatura de bulbo seco del aire de entrada a la torre ($^{\circ}$ C)

R: rango de enfriamiento ($^{\circ}$ C)

• **Balance de Energía en una torre de enfriamiento**

Considerando que la torre opera en forma adiabática $Q = 0$

$$G_s \cdot Hg_1 + L_2 \cdot HL_2 = G_s \cdot Hg_2 + L_1 \cdot HL_1 + Q \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$G_s \cdot Hg_1 + L_2 \cdot HL_2 = G_s \cdot Hg_2 + L_1 \cdot HL_1 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

Hg_1 : entalpía del aire de entrada (kj / kg aire seco)

Hg_2 : entalpía del aire de salida (kj / kg aire seco)

$H L_1$: entalpía del agua fría (kj / kg agua)

$H L_2$: entalpía del agua caliente (kj / kg agua)

Considerando que L_2 es aproximadamente igual que L_1 e igual a L; donde L es toda el agua que entra a la torre, se obtiene que:

$$L(HL_2 - HL_1) = G_s (Hg_2 - Hg_1) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Utilizando la definición de entalpía del líquido:

$$HL_1 = Cp_{L1}(TL_1 - Tr) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$HL_2 = Cp_{L2}(TL_2 - Tr) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

Cp_{L1} : calor específico del agua a la TL_1 (4,18 kJ / kg agua . °C)

TL_1 : temperatura del líquido a la salida de la torre (°C)

Cp_{L2} : calor específico del agua a la TL_2 (4,18 kJ / kg agua . °C)

TL_2 : temperatura del líquido a la entrada de la torre (°C)

Tr : temperatura de referencia (0 °C = 32 °F)

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y sustituyendo las Ec. 2.11 y Ec. 2.12 en la Ec. 2.10 se tiene:

$$L(Cp_{L2}(TL_2 - Tr) - Cp_{L1}(TL_1 - Tr)) = Gs(Hg_2 - Hg_1) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Considerando que el calor específico del agua no cambia apreciablemente con la temperatura, se tiene que:

$$Cp_{L1} = Cp_{L2} = 4,18 \text{ kJ / kg agua . } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo en Ec. 2.13 el calor específico del agua

$$L \cdot Cp_L(TL_2 - TL_1) = Gs(Hg_2 - Hg_1) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Reordenando la Ec. 2.14 se obtiene la ecuación para la línea de operación en una torre de enfriamiento.

$$(H_{g_2} - H_{g_1}) = \frac{L \cdot C_{pL}}{G_s} (TL_2 - TL_1) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

A partir de la ecuación de la línea de operación, se puede calcular el flujo másico del aire seco, tal como se muestra en la ecuación 2.16

$$G_s = \frac{L \cdot C_{pL} (TL_2 - TL_1)}{H_{g_2} - H_{g_1}} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde:

G_s: flujo másico del aire seco (kg aire seco/ h)

2.7. Definición de términos asociados al tratamiento químico del agua y a la evaluación de la torre de enfriamiento

2.7.1 Rango de enfriamiento (R)

Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente que entra a la torre y la temperatura del agua fría que sale ^[9].

$$R = TL_2 - TL_1 \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

T_{L1}: temperatura del agua fría a la salida de la torre (° C)

T_{L2}: temperatura del agua caliente a la entrada de la torre (° C)

2.7.2 Caudal de recirculación (Fw)

Es el caudal de agua que se está recirculando en el sistema de enfriamiento; normalmente su valor se obtiene de los datos de las bombas recirculantes. Para efectos de cálculos se utiliza entre 80% y 90% del valor teórico señalado en los datos de la bomba. Tanto el caudal de recirculación como el rango son necesarios para calcular el agua de evaporación ^[7].

2.7.3 Ciclos de concentración (Cc)

Es la relación que existe entre las concentraciones de sales del agua de recirculación y las de reposición. También se define como el número de veces que un componente del agua de reposición se concentra en el agua recirculante ^[9].

$$\text{Ciclos de concentración} = \frac{\text{concentración de sólidos en la recirculación}}{\text{concentración de sólidos en la reposición}} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

2.7.4 Purga

En un sistema de enfriamiento, se define como la cantidad de agua que se libera o se drena en una torre de enfriamiento; para desconcentrar y remover los sólidos que están presentes en el agua ^[6].

2.7.5 Agua de reposición

Es el agua necesaria para reemplazar el agua perdida por la purga, arrastre, más el agua perdida por evaporación. Para mantener el equilibrio, el agua que entra es igual a la que sale.

$$\text{Reposición} = \text{purga} + \text{arrastre} + \text{evaporación} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Actualmente en el mejorador Petromonagas no se realizan purgas continuas por lo que al reordenar la Ec. 2.19, se obtiene que la reposición es:

$$\text{Reposición} = \text{arrastre} + \text{evaporación} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

2.7.6 Arrastre (A)

Cantidad de agua perdida por la inducción del aire hacia la torre a través de los ventiladores. El arrastre en la torre es de 0,02% de la recirculación ^[6].

$$A = 0,0002 \cdot F_w \quad (\text{Ec. 2.21})$$

2.7.7 Eficiencia térmica (E)

La eficiencia térmica de una torre de enfriamiento se define como la fracción de calor absorbido que se obtiene como trabajo producido. También se puede definir como una relación de rango real a rango teórico ^[6].

$$E = \frac{R_{real}}{R_{teórico}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

E: eficiencia térmica

R_{real} : $(T_{L2} - T_{L1})$ (°C)

$R_{teórico}$: $(T_{L2} - T_{bh})$ (°C)

2.7.8 Calor retirado en la torre de enfriamiento (Q)

Se refiere a la cantidad de calor que la torre transfiere al aire para lograr el enfriamiento evaporativo del agua dentro de la misma ^[9].

$$Q = (Hg_2 - Hg_1) \cdot G_s \cdot 2.39 \times 10^{-07} \quad \text{(Ec. 2.23)}$$

Donde:

Q: calor retirado en la torre (MMkcal/h)

Hg₁: entalpía del aire a la entrada de la torre (kJ/kg aire seco)

Hg₂: entalpía del aire a la salida de la torre (kJ/kg aire seco)

G_s: flujo másico del aire seco que circula por la torre (kg aire seco/h)

2,39x10⁻⁰⁷: factor de conversión de kJ/h a MMkcal/h

A continuación se definen los términos relacionados con la fase gas, los cuales serán obtenidos diariamente en campo y haciendo uso de las cartas psicrométricas del sistema aire-vapor de agua; permitiendo realizar los balances de masa y energía en la torre de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, y evaluar el funcionamiento actual de esta:

2.7.9 Humedad absoluta másica (y)

Es la relación masa de vapor a masa de gas seco ^[12].

$$y = \frac{kg_{vapor}}{kg_{gas\ sec\ o}} \quad \text{(Ec. 2.24)}$$

2.7.10 Humedad relativa (%y_R)

Es la relación parcial del vapor contenida en la mezcla a la presión de vapor del líquido a la temperatura establecida ^[12].

2.7.11 Volumen húmedo (V_H)

Es el volumen ocupado por 1kg de mezcla gaseosa (gas seco más el vapor) a la temperatura de bulbo seco y presión considerada ^[12].

$$V_H = V_B + (V_S - V_B) \cdot \left(\frac{\%y}{100} \right) \quad \text{(Ec. 2.25)}$$

Donde :

V_H: volumen húmedo de la mezcla (m³ / kg gas seco)

V_B: volumen específico del gas seco (m³ / kg gas seco)

V_S: volumen del gas saturado con vapor (m³ / kg gas seco)

%y: porcentaje de humedad

Estos valores se obtienen por las cartas psicrométricas a la temperatura de bulbo seco de la mezcla.

2.7.12 Entalpía de la mezcla gaseosa (H_G)

Es la entalpía total de los componentes que conforman la mezcla.

$$H_G = H_B + (H_S - H_B) \cdot \left(\frac{\%y}{100} \right) \quad \text{(Ec. 2.26)}$$

Donde:

H_B : entalpía del gas seco (kJ / kg gas seco)

H_s : entalpía del gas saturado con vapor (kJ / kg gas seco)

Estos valores se obtienen por las cartas psicrométricas a la temperatura de bulbo seco de la mezcla ^[12].

2.7.13 Temperatura de bulbo seco (T_G)

Es la temperatura que alcanza una mezcla gaseosa cuando se mide con un termómetro.

2.7.14 Temperatura de bulbo húmedo (T_W)

Es la temperatura de estado estable que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de líquido (agua) con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas. Se mide con un termómetro de bulbo húmedo.

2.7.15 Cartas psicrométricas

Las cartas psicrométricas o también llamadas cartas de humedad, son gráficas donde se representan las propiedades de las mezclas gas-vapor a la presión total del sistema, que con frecuencia es la presión atmosférica ^[12].

2.8. Determinación de índices de estabilidad

Uno de los principales problemas en un sistema de enfriamiento es la formación de incrustaciones de carbonato de calcio en las áreas de transferencia de calor. En este sentido se han propuesto y establecido

algunos métodos para predecir la formación del carbonato de calcio. Estos métodos están basados en el equilibrio termodinámico del ácido carbónico, la alcalinidad y sólidos disueltos. Los índices de estabilidad más comunes son el de Langelier y el de Ryznar, los cuales se calculan mediante las ecuaciones siguientes ^[4]. Estos índices indican solamente la tendencia del carbonato de calcio a depositarse o si un agua es corrosiva, medianamente corrosiva o no corrosiva. La tabla 2.5 muestra los índices y sus respectivas tendencias.

$$\text{Indice de Langelier (IL)} = pH - pH_s \quad \text{(Ec. 2.27)}$$

$$\text{Indice de Ryznar (IR)} = 2pH_s - pH \quad \text{(Ec. 2.28)}$$

Donde:

pH: pH del agua

pH_s: pH de saturación

$$pH_s = A + B - \text{Log} [Ca^+] - \text{Log} [M] \quad \text{(Ec. 2.29)}$$

Donde:

pH_s: pH de saturación (adimensional)

A y B: constantes relacionadas con la temperatura y el contenido de sólidos disueltos

Log [Ca⁺]: logaritmo de la concentración de la dureza cálcica (ppm CaCO₃)

Log [M]: logaritmo de la concentración de la alcalinidad total (ppm CaCO₃)

Para el cálculo del pHs se necesitan conocer los valores de las constantes A y B. Estos valores se detallan en las tablas 2.3 y 2.4, respectivamente.

Tabla 2.3. Constante A a diferentes Temperaturas ^[6]

°C	° F	Constante
0	32	2,6
4	32,9	2,5
8	46,4	2,4
12	53,6	2,3
16	60,8	2,2
20	68	2,1
25	77	2
30	86	1,9
40	104	1,7
50	122	1,55
60	140	1,4
70	158	1,2
80	176	1,15

Tabla 2.4. Constante B a diferentes valores de Sólidos totales disueltos ^[6]

Total de sólidos disueltos (ppm)	Constante
0	9,7
100	9,77
200	9,83
400	9,86
800	9,89
1000	9,9

Tabla 2.5. Índices de estabilidad de Langelier (IL) y Ryznar (IR) y sus tendencias ^[6]

IL	IR	Tendencia del agua
2	< 4	Severa formación de depósitos (agua no corrosiva)
0,5	5 a 6	Ligeramente incrustante (medianamente corrosiva)
0	6 a 6,5	Agua en equilibrio
-0,5	6,5 a 7	No incrustante (ligeramente corrosiva)
	> 8	Extremadamente corrosiva

Otra forma de expresar los índices de Langelier y de Ryznar es mediante las siguientes correlaciones empíricas: ^[6].

• **Correlación empírica para el cálculo del Índice de Langelier**

$$IL = pH - [44,15 + 0,1 \cdot \text{Log}(0,5 \cdot \text{Cond})] - [1312 \cdot \text{Log}(T^{\circ}\text{C} + 273)] - (\text{LogAlc}) - (\text{LogDurezaT}) \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde:

IL: índice de langelier (adimensional)

ph: pH del agua (adimensional)

Cond: conductividad del agua ($\mu\text{mho/cm}$)

T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Alc: alcalinidad del agua (ppm)

Dureza T: dureza total del agua (ppm)

- **Correlación empírica para el cálculo del Índice de Ryznar**

$$IR = 2 \left[4415 + 0,1 \cdot \text{Log}(0,5 \cdot \text{Cond}) \right] - \left[1312 \cdot \text{Log}(T^{\circ}C + 273) \right] - (\text{LogAl}) - (\text{LogDurezaTotal}) - \text{pH} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

2.9. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores son equipos que se utilizan para recuperan calor entre dos corrientes en un proceso. Cuando un intercambiador está funcionando, el calor pasa desde el fluido más caliente a través de las paredes metálicas de los tubos hacia el fluido que está circulando a través del sistema. Los intercambiadores de calor tienen dos diseños comunes: tubos y coraza, y de placas y armazón. Los intercambiadores de calor de coraza y tubos son muy comunes y constituyen la mayoría de los intercambiadores de calor industriales utilizados hoy en día.

2.9.1 Intercambiadores de tubos y coraza

En este intercambiador, un medio fluye por un haz de tubos, mientras que el otro medio circula por fuera de este haz de tubos en una coraza. Los intercambiadores de tubos y coraza (como el mostrado en la figura 2) son los más importantes entre los equipos de transferencia de calor sin combustión en las plantas de procesos químicos (aun cuando se está haciendo cada vez mayor hincapié en otros diseños).

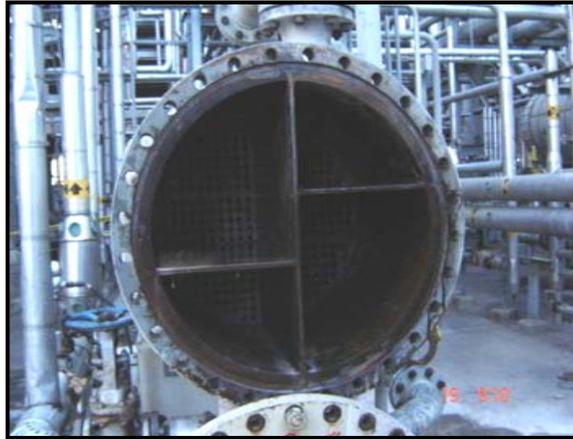


Figura 2.4. Intercambiador de tubos y coraza

El intercambiador de tubos y coraza consiste en una serie de tubos lineales colocados dentro de un tubo muy grande llamado coraza (como se aprecia en la figura anterior) y representan la alternativa a la necesidad de una gran transferencia de calor ^[13].

2.9.2 Componentes y nomenclatura

Los tamaños de las corazas y de los haces de tubos se designan por medio de números que describen los diámetros y longitudes de la coraza, y haces de tubo de la forma siguiente:

- **Diámetro nominal:** es el diámetro interior de la coraza en cm, redondeado a un número entero.
- **Longitud nominal:** es la longitud del tubo en cm. Cuando la longitud de los tubos son rectos aquella se considera como la longitud real total; mientras que cuando los tubos tienen una forma de “U” se considera como la longitud recta desde el extremo del tubo a la tangente de la curva ^[14].

2.9.3 Componentes o partes de un intercambiador

- **Corazas:** son recipientes cilíndricos en las que se instalan las otras piezas del intercambiador. La disponibilidad de distintos diseños de carcasa aumentan al máximo la superficie eficaz de transferencia de calor. Las carcasas están hechas de tuberías de acero con diámetro nominal de hasta 30 cm. Por encima de 30 y hasta 60 cm, el diámetro exterior real y el diámetro nominal de la tubería son los mismos ^[14].

El espesor normal de las paredes para corazas con diámetros interiores de 30 a 60 cm es de 0,95 cm; el cual se considera satisfactorio para presiones de operación del lado de la coraza de hasta 20 kgs/cm²; sin embargo, se pueden lograr mayores espesores de pared para mayores presiones.

- **Tubos:** son los conductos finos ubicados dentro de la coraza que transporta uno de los dos medios de intercambio de calor. Los tubos de un intercambiador de calor también se denominan tubos de condensador ^[14]. Estos pueden ser de distintas clases de metal como acero, cobre, Admiralty, metal Muntz, latón, cobre/níquel 70/30, bronce de aluminio, aluminio y acero inoxidable.
- **Chapa de tubos:** es la pieza de metal ubicada en el externo de un haz de tubos que sujeta los extremos de los tubos, e impide totalmente el paso de fluidos o gases excepto por los tubos.
- **Deflectores:** normalmente consisten en tabiques verticales que hacen que los fluidos cambien de dirección al circular por la coraza de un intercambiador de calor. En algunos casos, dependiendo del servicio, los deflectores también pueden ser horizontales o longitudinales. Para inducir la turbulencia fuera de los tubos es habitual usar deflectores que hagan que el líquido circule por la coraza perpendicularmente a los ejes de los tubos. Esto produce una turbulencia

considerable, incluso cuando circula una pequeña cantidad de fluido por la coraza ^[14].

- **Haz de tubos:** es un grupo montado de tubos, chapa(s) y deflectores fabricados en forma de conjuntos separados que caben dentro de la coraza. Los cabezales de los canales son los extremos de los intercambiadores de calor (a veces forman parte de la coraza misma y a veces están sujetos por medio de pernos al extremo de la coraza) que tiene la función de dirigir el fluido del lado de los tubos hacia la chapa.

2.10. Ecuaciones asociadas a los equipos de intercambio de calor

2.10.1 Área de intercambio de calor (a)

Representa el área efectiva a través del cual el calor se transfiere desde el medio más caliente al más frío ^[14].

$$a = N \cdot L \cdot \pi \cdot d \quad \text{(Ec. 2.32)}$$

Donde:

N: número de tubos en el intercambiador

L: longitud efectiva de tubos en el intercambiador (m)

d: diámetro de los tubos (m)

2.10.2 Calor retirado en el intercambiador (Q)

Se refiere a la cantidad de calor que recibe el fluido más frío desde el más caliente ^[14].

$$Q = F_w \cdot Cp(T_{sal} - T_{ent}) \quad (\text{Ec. 2.33})$$

Donde:

Q: cantidad de calor transferido (kcal / h)

F_w : flujo de agua (kg/ h)

C_p : capacidad calorífica del agua (1kcal / kg. °C)

T_{sal} : temperatura del agua a la salida del intercambiador (°C)

T_{ent} : temperatura del agua a la entrada del intercambiador (°C)

2.10.3 Velocidad del agua a través de los tubos (V_w)

Es la velocidad promedio que mantiene el flujo de agua a través de los tubos del intercambiador de calor ^[14] .

$$V_w = \frac{0,125 \cdot (F_w \cdot 4,40) \cdot N_p}{N(D_{int} \cdot 39,37)} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Donde:

V_w : velocidad promedio (m/s)

N_p : número de pasos por los tubos (adimensional)

N : número de tubos (adimensional)

D_{int} : diámetro interno (m)

2.10.4 Número de pasos por los tubos (N_p)

Se refiere al número de tramos rectos que se encuentran dentro de los compartimientos del intercambiador ^[12] .

$$N_p = N_c + (N_c - 2) \quad (\text{Ec. 2.35})$$

Donde:

Nc: número de compartimientos del intercambiador

2.10.5 Diferencia de temperatura logarítmica media (MLDT)

Permite describir la variación de la temperatura y de las propiedades de un líquido cuando el mismo fluye a través de un tubo absorbiendo o cediendo calor sensible. La diferencia logarítmica media de temperatura para aquellos intercambiadores cuyos sentidos de flujo van en contracorriente (figura 3), es determinada mediante la siguiente ecuación ^[14].

$$MLDT = \frac{[(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)]}{Ln \left[\frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right]} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

Donde:

t_1 : temperatura de entrada del fluido frío (°C)

t_2 : temperatura de salida del fluido frío (°C)

T_1 : temperatura de entrada del fluido caliente (°C)

T_2 : temperatura de salida del fluido caliente (°C)

MLDT: diferencia de temperatura logarítmica media (°C)

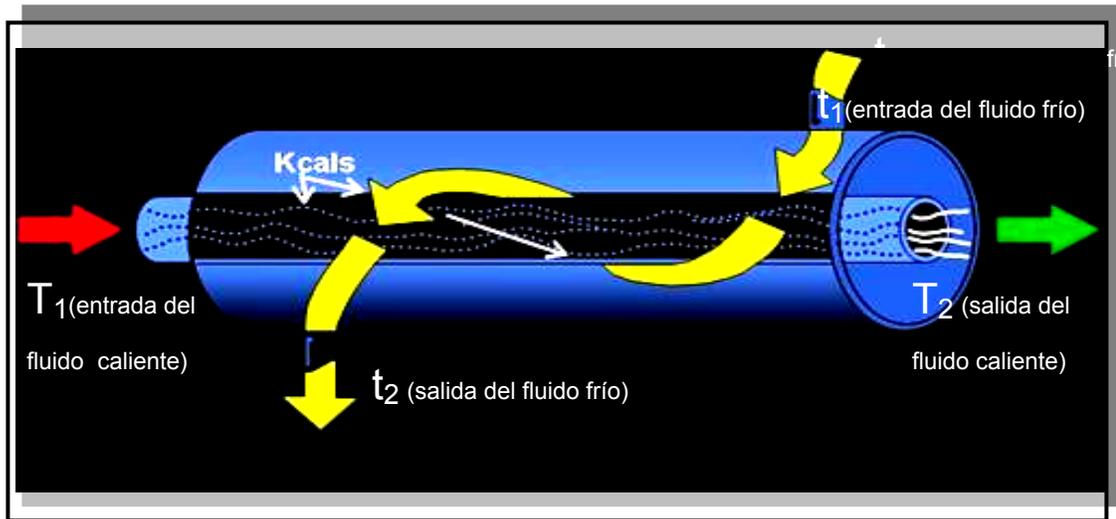


Figura 2.5. Esquema de un intercambiador de tubo y coraza ^[13]

2.10.6 Coeficiente global de transferencia de calor (U)

Relaciona todas las resistencias involucradas en el intercambio de calor dentro del intercambiador ^[12].

$$U = \frac{Q}{a \cdot Ft \cdot MLDT} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

Donde:

U: coeficiente global de transferencia de calor ($\text{kcal} / \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)

Ft: factor de corrección de la diferencia logarítmica media de temperaturas.

a: área de intercambio de calor (m^2)

2.10.7 Factor de ensuciamiento

Es un indicativo del potencial de deposición que existe dentro de un intercambiador. El factor de ensuciamiento puede estar en función de los

coeficientes globales de transferencia de calor (R_d) o de la caída de presión (factor C) dentro del intercambiador de calor ^[14].

2.10.8 Factor R_d

Relaciona el coeficiente global de transferencia de calor de operación normal (U_a) con un coeficiente de referencia. Este último puede ser el de diseño (U_d), de operación (U_d), o aquel que se obtiene al limpiar el intercambiador denominado “ U_{limpio} ” (U_c) ^[14].

$$R_d = \left(\frac{F_{Wa}}{F_{Wd}} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{U_a}{U_d} \right) \quad (\text{Ec. 2.38})$$

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{U_c} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

Donde:

U_d : coeficiente global de transferencia de calor a las condiciones de diseño (kcal / h. m^2 °C)

U_a : coeficiente global de transferencia de calor a las condiciones de operación normal (kcal / h. m^2 .°C)

F_{wa} : flujo de agua a las condiciones de operación normal (m^3 /h)

F_{wd} : flujo de agua a las condiciones de diseño (m^3 /h)

CAPITULOIII

DESARROLLO DEL PROYECTO

La parte inicial en el desarrollo del proyecto consistió en la búsqueda de información relacionada a los sistemas de agua de enfriamiento, y los principales equipos que lo conforman, haciendo énfasis en la torre de enfriamiento. Se conoció el área de trabajo; con la finalidad de obtener más información acerca del proceso, los equipos y las variables a evaluar.

Para comprobar la existencia de fuga de agua en el sistema de enfriamiento, fue necesario realizar un balance de masa a la torre de enfriamiento para determinar la cantidad de agua de retorno. Se realizó un seguimiento a cada una de las tuberías que suministran el agua de enfriamiento desde la torre hacia los equipos asociados con el sistema; esto con el fin de localizar y cuantificar los puntos en los cuales existían fugas de agua de enfriamiento. Se realizó un estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de enfriamiento, con el fin de determinar su índice de desempeño actual. También fue necesario realizar un monitoreo diario de los análisis del agua de enfriamiento en la piscina de la torre y en el agua de reposición, para así determinar las desviaciones presentadas por las variables operativas en el sistema.

3.1 Caracterización del sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de diseño y operación

3.1.1 Recopilación de los datos de diseño del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas

Para recopilar los datos de diseño del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas se realizó un estudio de aquellos documentos en los cuales se establecieron los lineamientos de construcción de la planta (documentos de diseño). Estos documentos fueron ubicados en los archivos del departamento de ingeniería de procesos de la planta, a través de hojas de datos de los equipos, manuales de la unidad 42, diagramas de flujo de proceso, diagramas de tuberías y balances de agua de enfriamiento, realizados por los diseñadores a las condiciones de diseño y de operación normal, así como revisión bibliográfica para conocer las características de los sistemas de agua de enfriamiento y obtener los parámetros fisicoquímicos establecidos por diseño para el agua de enfriamiento.

3.1.2 Recopilación de los datos a las condiciones de operación

La recopilación de datos a las condiciones operacionales reales del sistema de enfriamiento se fundamentó en la realización de medidas en campo, las cuales se basaron en la distribución actual del agua de enfriamiento consumida y en las temperaturas a la entrada y salida del agua en cada equipo del sistema de enfriamiento; así como la temperatura de entrada y salida del aire en la torre mencionada.

La inspección visual permitió ubicar cada equipo asociado al sistema de enfriamiento, para lograr una recopilación de los datos operacionales a las condiciones actuales.

Se realizaron observaciones de los valores en tiempo real, reportados por los analizadores que se encuentran enlazados con el sistema de control distribuido de la empresa (DCS); el cual es el encargado de almacenar y mostrar todos los valores reportados por los medidores, transmisores y analizadores que miden las variables más importantes del proceso.

Los instrumentos de medición utilizados en la obtención de los valores de las variables de operación más importantes de cada uno de los equipos, que conforman el sistema de enfriamiento se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Instrumentos utilizados en la recolección de datos operacionales actuales

Equipo	Variable	Instrumento de medición
TORRE DE ENFRIAMIENTO	Temperatura del agua fría	Transmisor de temperatura en línea/termómetro de mercurio
	Temperatura del agua caliente	
	Flujo de reposición	Transmisor de flujo en línea
	Flujo de recirculación	
	Temperatura de bulbo húmedo del aire	Psicrómetro - Higrómetro
	Temperatura de bulbo seco del aire	
	Porcentaje de humedad relativa	
INTERCAMBIADORES DE CALOR	Temperatura de entrada	Pirómetro/ Transmisor de temperatura en línea
	Temperatura de salida	
	Flujo	Transmisor de flujo en línea
LÍMITES DE BATERIA	Temperatura del agua de entrada	Pirómetro
	Temperatura del agua de salida	
	Flujo de agua de entrada	Medidor de flujo ultrasónico
	Flujo de agua de salida	

3.1.2.1 Condiciones de operación de la torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento representa el equipo más importante del sistema de agua de enfriamiento ya que en él se lleva a cabo la transferencia de energía y masa necesaria para preparar térmicamente el agua que se reutiliza en el sistema. Considerando lo descrito anteriormente, se realizó un monitoreo diario y detallado de todas las variables necesarias para evaluar el desempeño de la torre.

La recopilación de los valores de las variables de la torre a las condiciones de operación actual, se basó en mediciones diarias de flujo de agua de recirculación y reposición, temperatura del agua de retorno y temperatura del agua de recirculación, reportados en la tabla A.1 del anexo A.; así como los parámetros ambientales del aire: %humedad relativa, temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo, que se muestran en la tabla A.2 del anexo A.. La recolección de datos se mantuvo durante los meses de septiembre, octubre, y noviembre del año 2009.

Debido a que es en la piscina de la torre de enfriamiento donde son dosificados los productos químicos, los valores correspondientes a las condiciones de operación normal de las variables fisicoquímicas se incluyeron dentro del estudio de la torre de enfriamiento. Estos valores se obtuvieron a través del programa de almacenamiento de resultados de los análisis de laboratorio "Winbliss".

Este programa recolecta los valores diarios que son introducidos por los analistas que laboran en el laboratorio. Se tomaron como referencia los valores correspondientes a los análisis reportados durante los meses de

septiembre, octubre y noviembre. Todos estos datos se encuentran reportados en la tabla A.3 del anexo A.

3.1.2.2 Porcentajes de desviación de las condiciones de operación actual de la torre de enfriamiento con respecto a las condiciones de diseño

Para establecer una comparación entre las condiciones de diseño de los parámetros de la torre de enfriamiento y sus respectivos valores promedios de operación actual reportados en la tabla A.5, se determinaron los porcentajes de desviación que representan dicho valor con respecto al diseño. Este porcentaje se determinó según la siguiente ecuación:

$$\% \text{Desviación} = \frac{(\text{CondiciónDiseño} - \text{CondiciónOperación})}{(\text{CondiciónDiseño})} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 el valor promedio de los meses de estudio correspondiente a la temperatura de entrada del agua que retorna a la torre se tiene:

$$\% \text{Desviación} = \frac{(45,56 - 38,00)}{(45,56)} \cdot 100$$

$$\% \text{Desviación} = 16,59$$

Este cálculo se repitió para cada una de las condiciones de operación actual promedio de los meses de estudio, y su desviación respecto al diseño se reporta en la tabla A.5 (anexo A).

3.1.2.3 Condiciones de diseño y operación de los intercambiadores de calor

Las condiciones de diseño de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, se recopilaron de los documentos de construcción de la planta, así como de hojas de datos ubicadas en los archivos del departamento de ingeniería de procesos. En la tabla B.1 (anexo B), se muestran las condiciones de diseño de los dos intercambiadores de estudio (E-1109 y E-1305).

Los intercambiadores de calor fueron evaluados según el consumo de agua de enfriamiento que representan, tomando en consideración el cambio térmico del agua dentro de los mismos. Las mediciones de los flujo de agua de entrada y de salida a cada intercambiador fueron planificadas según la ubicación de los mismos en la planta y fueron realizadas a través del medidor de flujo ultrasónico para líquidos.

Este medidor permite obtener valores de flujo de líquidos y trabaja con los datos de las tuberías de entrada y/o salida de agua de cada intercambiador. Se tomaron lecturas de las temperaturas del agua a la entrada y salida de cada intercambiador, con el objetivo de cuantificar la tasa de transferencia de calor que ocurre en cada uno de ellos y evaluar así su desempeño desde el punto de vista energético. Estas lecturas fueron realizadas con un pirómetro, en aquellos casos cuando no se contaba con termocuplas instaladas en las tuberías a la entrada y salida del agua del intercambiador.

El estudio del levantamiento en campo de los intercambiadores que forman parte del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador

Petromonagas, se reporta en el anexo B (tabla B.3); donde se visualizan las condiciones de diseño de cada equipo, observaciones referidas a su ubicación y las limitantes presentes que dificultan el acceso al estudio de los mismos.

3.2 Realización de balances de masa y energía en la torre de enfriamiento a las condiciones actuales de operación

Tomando en consideración las características de diseño de la torre y los datos de las variables de operación a las condiciones actuales recolectados en campo, se evaluó el funcionamiento operacional de la torre de enfriamiento, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Para ello fue necesario realizar el siguiente cálculo característico del equipo para posteriormente realizar los balances de masa y energía.

3.2.1 Determinación del rango de enfriamiento en la torre

Para determinar el rango de enfriamiento de la torre, se tomaron los valores de temperatura correspondientes al retorno (temperatura de entrada) y recirculación (temperatura de salida) de la torre de enfriamiento, reportados por el sistema de información en tiempo real de la empresa (PI), los cuales se muestran en la tabla A.1. Tomando los valores de temperatura de entrada y salida para el 04/09/2009 en la torre de enfriamiento y sustituyéndolos en la Ec. 2.17, se obtuvo que el rango de enfriamiento para este mes en la torre es de:

$$R = (39,026 - 29,844)^\circ C$$

$$R = 9,18^{\circ} C$$

Este procedimiento se repitió para los valores diarios y promedios durante los meses de septiembre, octubre y noviembre y los resultados se reportan en el anexo C (tabla C.1).

3.2.2 Balance de energía en la torre de enfriamiento

El balance de energía en la torre de enfriamiento permitió determinar el flujo másico del aire seco que circula en la torre de enfriamiento, el cual es necesario conocer al momento de realizar los balances de masa.

Para realizar los balances de energía a las condiciones operacionales actuales se tomaron los valores del rango de enfriamiento diarios, así como el promedio de cada mes de estudio (septiembre, octubre y noviembre) reportados en la tabla C.1. El caudal de recirculación fue suministrado por el sistema de información en tiempo real de la empresa (PI) y las entalpías de entrada y salida del aire en la torre de enfriamiento se obtuvieron haciendo uso del diagrama psicrométrico para el sistema aire-vapor de agua. Dichos valores de caudal y entalpías se reportan en la tabla A.1 y A.2, respectivamente.

3.2.2.1 Cálculo del flujo másico del aire que circula por la torre

Tomando los valores del rango de enfriamiento de la tabla C.1, caudal de recirculación del agua de la tabla A.1, entalpías de entrada y salida del aire de la tabla A.2 para el 04/09/2009, y sustituyendo en la Ec. 2.16 considerando que el C_{pL} es igual a 4,18 kJ/kg agua.°C, se obtuvo el flujo másico del aire:

$$G_s = \frac{3265664,72 \text{ kg agua} / h \cdot 4,18 \text{ kJ} / \text{kg agua} \cdot ^\circ \text{C} \cdot 9,18^\circ \text{C}}{(103,70 - 87,30) \text{ kJ} / \text{kg aire} \text{ sec} o}$$

$$G_s = 7642603,28 \text{ kg aire} \text{ sec} o / h$$

Los resultados del flujo másico de aire seco que circula por la torre para los siguientes días de estudio se reportan en la tabla A.6 (anexo A).

3.2.2.2 Determinación de la relación líquido-gas de la torre de enfriamiento

Conocido el flujo másico del aire seco que circula por la torre de enfriamiento, y el flujo de agua de recirculación para cada día de los meses de estudio reportado en la tabla A.1, se obtuvo la relación líquido gas (L/G), sustituyendo los valores de líquido y gas para el 04/09/2009 se obtiene:

$$\frac{L}{G_s} = \frac{3265664,72 \text{ kg agua} / h}{7642603,28 \text{ kg aire} \text{ sec} o / h}$$

$$\frac{L}{G_s} = 0,43 \text{ kg agua} / \text{kg aire} \text{ sec} o$$

Los valores L/Gs correspondientes a los días de estudio de los meses de septiembre, octubre y noviembre se reportan en la tabla A.6 (anexo A).

3.2.3 Balance de masa en la torre de enfriamiento

El balance de agua permitió obtener el caudal y luego el porcentaje de agua evaporada de la torre de enfriamiento a las condiciones actuales; y a partir de este valor se pudo establecer las desviaciones respecto al diseño.

Haciendo uso del Psicrómetro-Higrómetro se realizaron mediciones de campo de las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco, del aire a la entrada y salida de la torre cerca del área de los ventiladores. Estas temperaturas permitieron obtener los valores de humedad absoluta del aire a la entrada y salida de la torre a través de la carta psicrométrica para el sistema aire-vapor de agua. La caracterización de la mezcla del sistema aire-vapor de agua se reporta en el anexo A, tabla A.2 para los meses de septiembre, octubre y noviembre.

3.2.3.1 Determinación de la evaporación en la torre de enfriamiento

Sustituyendo en la Ec. 2.4 el flujo másico del aire seco para el 04/09/2009 reportado en la tabla A.6, así como la humedad absoluta de entrada y salida del aire del anexo A.2, se obtuvo que la evaporación en la torre para este día fue de:

$$E = 7642603,28 \text{ kg aire seco} / \text{h} \cdot (0,037 - 0,033) \text{ kg vapor de agua} / \text{kg aire seco}$$

$$E = 30570,41 \text{ kg vapor de agua} / \text{h}$$

Este procedimiento se repitió para cada día de los meses de estudio (septiembre, octubre y noviembre); y los resultados se reportan en el anexo A (tabla A.7).

3.2.3.2 Cálculo del porcentaje de agua evaporada

Conocido el flujo másico del aire seco que circula por la torre de la tabla A.6, el caudal de agua de recirculación de la torre de enfriamiento reportado en la tabla A.1 del anexo A y la humedad absoluta de entrada y salida del aire del anexo A.2 para el 04/09/2009 y sustituyendo en Ec.2.6, se obtiene el porcentaje de agua evaporada:

$$\% E = \frac{7642603,28 \text{kg aire seco} / h \cdot (0,037 - 0,033) \text{kg vapor} / \text{kg aire seco}}{3265664,72 \text{kg vapor agua} / h} \cdot 100$$

$$\% E = 0,94$$

Los resultados de la evaluación del porcentaje de agua evaporada para los días de cada mes de estudio, así como el promedio mensual de agua evaporada en la torre se reportan en la tabla A.7(anexo A).

3.2.3.3 Cálculo del arrastre de agua de enfriamiento producido en la torre de enfriamiento

Los manuales de diseño del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas establecen que el arrastre en la torre de enfriamiento es de 0,02% del agua de recirculación. Los valores de agua de recirculación se reportan en el anexo A (tabla A.1); conocida el agua de recirculación para el 04/09/2009 y sustituyendo en

Ec. 2.21, se conoce la cantidad de agua pérdida en la torre producto del arrastre.

$$A = 0,0002 \cdot 3220,21 \text{m}^3 / h$$

$$A = 0,64m^3 / h$$

Los resultados obtenidos de las pérdidas de agua por evaporación en la torre para los demás días sujetos a evaluación se reportan en el anexo A (tabla A.8).

3.2.3.4 Determinación de la cantidad requerida de agua de reposición en la torre de enfriamiento

De acuerdo a la Ec. 2.19 la cantidad de agua que se repone al sistema es aquella producida por la purga, evaporación y arrastre; sin embargo hay que destacar que debido a los bajos ciclos de concentración del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, no se realizan purgas continuas debido a que los iones que causan problemas de incrustación no alcanzan a concentrarse. Es por ello que para conocer la cantidad de agua de reposición se utilizó la Ec. 2.20 donde no se consideran pérdidas de agua por purga al sistema.

Los valores de evaporación y arrastre para el 04/09/2009 fueron tomados de la tabla A.7 y A.8 del anexo A; los valores obtenidos para este mes y los otros meses de estudio se reportan en la tabla A.9.

$$Re p = 30,57m^3 / h + 0,64m^3 / h$$

$$Re p = 31,21m^3 / h$$

3.2.3.5 Cálculo del calor retirado en la torre de enfriamiento

El calor retirado en la torre de enfriamiento se determinó a partir de la Ec. 2.23 utilizando los datos de entalpía del aire a la entrada y salida del día 04/09/2010, que se reportan en la tabla A.2 y el flujo de gas de la tabla A.6. Conocidas estas variables y sustituyéndolas en la ecuación citada, se obtiene que el calor retirado es:

$$Q = (103,70 - 87,30)kJ / kg_{aire} \text{ sec } \cdot 7642603,28kg_{aire} \text{ sec } / h \cdot 2.39 \times 10^{-07}$$

$$Q = 29,96MMkcal / h$$

Este procedimiento de cálculo se repitió para cada uno de los datos correspondientes a los días de estudio de los meses de septiembre, octubre y noviembre; y los resultados se reportan en la tabla A.10 (anexo A).

3.2.3.6 Determinación de la eficiencia térmica de la torre de enfriamiento

Para determinar la eficiencia térmica de la torre a las condiciones de operación actual se utilizó la Ec.2.22; el rango real requerido para este cálculo se reporta en el anexo C (tabla C.1). La temperatura a la entrada de la torre y su temperatura de bulbo húmedo se muestran en la tabla A.2. Haciendo uso de estas variables para el 04/09/2009 y sustituyéndolas en la ecuación se obtuvo:

$$E = \frac{9,18^{\circ} C}{(39,03 - 27,00)^{\circ} C} \cdot 100$$

$$E = 76,35\%$$

Este procedimiento de cálculo fue repetido para cada uno de los datos correspondientes a los días de estudio de los meses de septiembre, octubre y noviembre, y los resultados se reportan en la tabla A.11 (anexo A).

3.3 Seguimiento a las líneas de tubería que permitan la localización de fugas o pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento

3.3.1 Inspección visual a las líneas de tubería

Para localizar las pérdidas de agua o fugas en el sistema de enfriamiento se procedió a realizar un seguimiento a las tuberías que suministran el agua a cada uno de los equipos asociados al sistema de agua de enfriamiento; tomando como punto de partida y retorno la torre de enfriamiento, lo cual se muestra en la figura D.1 (anexo D).

La metodología empleada fue la inspección visual, tal como se muestra en la figura D.2, la cual se realizó para ubicar si existían fugas o pérdidas de agua de enfriamiento en las líneas de tubería; así como conocer y cuantificar todos los equipos que conforman el sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas. Este seguimiento permitió ubicar los límites de batería (donde se cuantifica la entrada y salida total de agua de enfriamiento en cada unidad de proceso) entre los que se tienen unidades 10 distribuidas en el área de coquer, unidades 20 de hidrotatamiento de Nafta, unidades 30 de recuperación de aminas, y unidades 40 que prestan servicio de aire de enfriamiento y donde se localiza la torre de enfriamiento. Los límites de batería de estas unidades encontradas a realizar el seguimiento a las

líneas de tubería del sistema de agua de enfriamiento, se visualizan en la figura D.3.

3.3.2 Balance de masa de agua en los límites de batería de cada unidad de proceso

Localizados los límites de batería de las distintas unidades de proceso del Mejorador Petromonagas, se realizó un balance de masa global en cada límite de batería de cada unidad de proceso. Estos balances se realizaron a partir de los datos recolectados en campo. El flujo de agua a la entrada y salida de cada límite de batería fueron obtenidos haciendo uso de un medidor de flujo ultrasónico para líquidos; así mismo las temperaturas de entrada y salida del agua a cada unidad, se midieron con un pirómetro.

Se realizaron los balances de masa en los límites de batería de cada unidad de proceso, con el objetivo fundamental de cuantificar la cantidad de agua que entra y sale de cada unidad y determinar en cuál de ellas se localizaban pérdidas de agua de enfriamiento y a la vez cuantificarlas.

Realizando un balance de masa global en la torre de enfriamiento y considerando que la cantidad de agua de enfriamiento que entra es igual a la que sale, se tiene que:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \qquad \qquad \qquad \text{(Ec. 3.2)}$$

$$3.161,80 \text{ m}^3/\text{h} = 3.321,24 \text{ m}^3/\text{h}$$

El resultado de todos los balances realizados en las distintas unidades de proceso se reportan en el anexo D (tabla D.7).

3.4 Estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de enfriamiento

Identificados los intercambiadores de calor que conforman el sistema de enfriamiento a través de un levantamiento en campo (ver tabla B.3), en el cual se conocieron sus características de diseño, se procedió a determinar el índice de desempeño a aquellos intercambiadores en los cuales fue posible conocer temperaturas de entrada y salida del intercambiador, lado agua y de proceso; así como el flujo de agua a la entrada y salida del mismo. Estos fueron el E-1109 y el E-1305.

3.4.1 Calor retirado en los intercambiadores de calor

Para determinar el calor retirado en el intercambiador de calor fue necesario realizar las mediciones de flujo de agua, y de temperaturas de entrada y de salida en el intercambiador.

Utilizando los datos del intercambiador E-1109 de la tabla B.2 y para la fecha 23/11/09, se calculó el calor retirado por medio de la Ec.2.33

$$Q = 1865,31 \text{ kg} / \text{h} \cdot (1 \text{ kcal} / \text{kg}^\circ \text{C}) \cdot (35,56 - 27,22)^\circ \text{C}$$

$$Q = 0,016 \text{ MMkcal} / \text{h}$$

Este procedimiento de cálculo fue repetido para los días de estudio a cada intercambiador de calor; los resultados se reportan en la tabla B.4.

3.4.2 Velocidad del fluido a través de los tubos en los intercambiadores de calor

Para determinar la velocidad del fluido a través de los tubos, fue necesario conocer el número de pasos por los tubos, el número de tubos y el diámetro interno. Para el intercambiador E-1109 estos datos se muestran en la tabla B.1.

Tomando como referencia la fecha 23/11/09 de la tabla B.2 y un flujo de agua de 0,999 m³/h, se obtuvo la velocidad del agua a través de los tubos, utilizando la Ec. 2.34

$$V_w = \frac{0,125 \cdot (1,00 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot 4,40) \cdot 2}{258 \cdot (0,019 \cdot 39,37)^2}$$

$$V_w = 0,008 \text{ m/s}$$

Los demás resultados de la velocidad del fluido a través de los tubos para ambos intercambiadores (E-1109 y E-1305) se muestran en la tabla B.4.

3.4.3 Diferencia de temperatura logarítmica media (MLDT)

La diferencia de temperatura logarítmica media fue determinada para estimar un gradiente de temperatura representativo de los cambios en las propiedades que sufre el fluido a lo largo de su recorrido a través del intercambiador.

Para estimar esta diferencia de temperatura se sustituyeron los valores correspondientes a las temperaturas del lado agua y lado proceso, del intercambiador E-1109 de la tabla B.2, en la Ec. 2.36 y se obtuvo:

$$MLDT = \frac{(67,69 - 35,56) - (31,82 - 27,22)}{\ln \left[\frac{67,69 - 35,56}{31,82 - 27,22} \right]}$$

$$MLDT = 14,16^{\circ} C$$

Este procedimiento de cálculo se repitió para cada uno de los intercambiadores de calor que forman parte del sistema de agua de enfriamiento, y los resultados se reportan en la tabla B.4.

3.4.4 Coeficiente global de transferencia de calor

Utilizando los valores de Q, Ft y MLDT de la tabla B.4 para el día 23/11/2009, el valor del área del intercambiador de calor de la tabla B.1 y sustituyendo en la Ec. 2.37; se calculó el coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{0,016 \cdot 10^6 \text{ kcal} / h}{186,608 \text{ m}^2 \cdot 0,900 \cdot 14,16^{\circ} C}$$

$$U = 6,73 \text{ kcal} / \text{m}^2 \cdot h^{\circ} C$$

Este procedimiento de cálculo fue repetido para los datos de las diferentes fechas de los dos intercambiadores de calor estudiados (E-1109 y el E-1305), y los resultados se muestran en la tabla B.4.

3.4.5 Factor de ensuciamiento R_d

El factor de ensuciamiento se determinó a partir de la Ec. 2.38, sustituyendo en ella el flujo de agua en m^3/h de alimentación al equipo a las condiciones operacionales actuales reportados en la tabla B.2; así como el coeficiente global de transferencia de calor actual de la tabla B.4. El coeficiente global de transferencia de calor y el flujo de agua a las condiciones de diseño se toman de la tabla B.1 para el intercambiador E-1109, para el día 23/11/2009.

$$R_d = \left(\frac{1,00m^3 / h}{262,329m^3 / h} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{6,538kcal / h.m^2.^\circ C}{646,098kcal / h.m^2.^\circ C} \right)$$

$$R_d = 1,174 \times 10^{-04}$$

Los demás resultados del factor de ensuciamiento se muestran en la tabla B.4 para ambos intercambiadores (E-1109 y E-1305).

3.5 Comprobación de la efectividad del tratamiento químico del agua de enfriamiento

El agua de enfriamiento debe presentar parámetros químicos que se encuentren dentro de los límites de especificación establecidos en el diseño del sistema. Las desviaciones del mismo pueden presentar distintos problemas en el sistema de agua de enfriamiento, tales como ensuciamiento microbiológico, deposición, incrustación y corrosión.

Debido a estos posibles problemas que pueden ser causados en los equipos que conforman el sistema de enfriamiento, se hace extremadamente necesario el control estricto de los parámetros químicos del agua, razón por la cual el laboratorio del Mejorador Petromonagas y el personal técnico de la casa tratante GeBetz (empresa encargada del suministro y aplicación de los químicos empleados en el tratamiento del agua de enfriamiento) realizan análisis diarios de los parámetros del agua. los cuales se muestran en la tabla A.3.

3.5.1 Análisis de la tendencia corrosiva o incrustante del agua de enfriamiento

Los análisis diarios reportados por el laboratorio de la planta y la casa tratante de químicos, fueron utilizados para la realización de los análisis de la tendencia corrosiva o incrustante del sistema de agua de enfriamiento; para ello se realizaron los cálculos para la determinación del índice de estabilidad de Langelier y de Ryznard. Los datos de pH, conductividad, alcalinidad y dureza total, que se muestran en la tabla E.1 se requieren para la determinación de los índices de estabilidad. Sustituyendo estos datos para el 03/09/2099 en la Ec. 2.30 se calculó el índice de estabilidad del agua según Langelier:

$$IL = 8,7 - [(44,15 + 0,1 \cdot \log(0,5 \cdot 1028)) - (13,12 \cdot \log(30,53 + 273)) - (\log 162,2) - (\log 516)]$$

$$IL = 8,7 - 6,931$$

$$IL = 1,77$$

Según la tabla 2.5, cuando el índice de estabilidad de Langelier es mayor que 0,5 y menor que 2, la tendencia del agua es ligeramente incrustante.

Sustituyendo los datos anteriormente citados para el 03/09/2099 en la Ec. 2.31, se conoce el índice de estabilidad del agua según Ryznard:

$$IR = 2 \cdot [(44,15 + 0,1 \cdot \log(0,5 \cdot 1028)) - (13,12 \cdot \log(30,53 + 273)) - (\log 162,2) - (\log 516)] - 8,7$$

$$IR = 13,862 - 8,7$$

$$IR = 5,16$$

Según la tabla 2.5 cuando el índice de estabilidad de Ryznard oscila entre 5 y 6; la tendencia del agua es ligeramente incrustante.

Los demás resultados de los índices de estabilidad del agua por Langelier y Ryznard, para todos los días de estudio, se muestran en la tabla E.1; así como su tendencia a la incrustación o corrosión.

3.5.2 Ciclos de Concentración de la torre de enfriamiento

Para el cálculo de los ciclos de concentración del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas, el parámetro que se monitorea es la conductividad eléctrica del agua, la cual está bien relacionada con los sólidos disueltos totales; sólo basta con dividir los valores de conductividad reportados en la recirculación de la torre, entre los valores de conductividad reportados en el agua de reposición de la torre. Estos datos se reportan en la

tabla E.2; sustituyendo estos valores para el día 04/11/2009 en la Ec.2.18 se tiene que:

$$\text{CiclosdeCo ncentració n} = \frac{997Us / cm}{293Us / cm}$$

$$\text{CiclosdeCo ncentració n} = 3,40$$

Este cálculo de los ciclos de concentración de la torre fue repetido para cada día de estudio de los meses de septiembre, octubre y noviembre. Los resultados se reportan en la tabla E.2.

3.5.3 Determinación de los parámetros críticos del agua de enfriamiento

Para determinar cuáles fueron los parámetros críticos del agua de enfriamiento, se mantuvo un monitoreo constante de los análisis químicos del agua reportados por el laboratorio de la empresa, y los cuales se muestran en la tabla A.3.

Se realizarón gráficos para los ciclos de concentración, pH, residual de cloro y turbidez y se compararon con los valores de diseño, a fin de poder determinar cuáles fueron los parámetros que más se afectaron durante el período de estudio. Los resultados se muestran en el anexo E (figuras E.2, E.3 y E.4).

CAPITULOIV

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Caracterización del sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de diseño y operación

4.1.1 Condiciones de diseño y operación actual de la torre de enfriamiento

En la tabla 4.1 se muestran las condiciones de diseño y de operación actual de la torre de enfriamiento, durante los meses de estudio (septiembre, octubre y noviembre de 2009).

Tabla 4.1 Condiciones de diseño y operación actual de la torre de enfriamiento

PARÁMETROS	VARIABLE	UNIDAD	DISEÑO	MESES DE ESTUDIO		
				SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE
Datos de la torre	Temperatura del agua de retorno a la torre	°C	45,56	38,92	37,90	37,17
	Temperatura de salida de agua de la torre	°C	31,67	29,67	29,16	29,03
	Caudal de reposición	m ³ /h	108,34	60,28	58,06	55,73
	Caudal de recirculación	m ³ /h	3.293,31	3.241,77	3.261,57	3.211,71
Condiciones del aire	Temperatura de bulbo húmedo a la entrada de la torre	°C	28,33	27,16	27,03	27,28
	Temperatura de bulbo húmedo a la salida de la torre	°C	37,00	30,16	30,15	30,47
	Temperatura de bulbo seco a la entrada de la torre	°C	31,67	31,37	31,24	31,59
	Temperatura de bulbo seco a la salida de la torre	°C	39,00	33,38	33,37	33,50
	Porcentaje de humedad relativa de entrada	%	80,00	74,67	75,17	74,50
	Porcentaje de humedad relativa de salida	%	95,00	81,37	79,90	81,63

Se observa que los valores de operación normal difieren de las condiciones de diseño del equipo. En primer lugar, la temperatura del agua que retorna del proceso no alcanzó el valor de diseño (45,56 °C), razón por la cual siempre existe una temperatura de salida del agua de enfriamiento menor que la estipulada para el diseño. Esto incide en una disminución del rango de enfriamiento a las condiciones operacionales actuales de la torre.

Por otro lado el flujo de agua de recirculación fue menor que el de diseño, para todos los meses de estudio. A medida que aumentó el caudal de recirculación (mes de septiembre) se incrementó el caudal de reposición a 60,28 m³/h; mientras que a menor flujo de agua de recirculación (mes de noviembre) disminuyó el caudal de reposición a 55,73 m³/h, ya que al suministrar menos agua al sistema serán menores las pérdidas por evaporación, purga y arrastre.

Con respecto a las condiciones del aire, se puede observar que la temperatura de bulbo húmedo a la entrada presentó una variación de 1 °C menor con respecto al valor de diseño. Esto es aceptable, debido a las condiciones climatológicas de los meses en estudio. En cambio la temperatura de bulbo húmedo a la salida de la torre exhibió una diferencia de 7 °C menor con respecto a las de diseño, lo cual parece estar influenciado por el incremento de la temperatura de bulbo seco y de la humedad que recibe el aire dentro de la torre.

Con respecto a la temperatura de bulbo seco a la entrada, se conservó el valor de diseño, y la temperatura de bulbo seco a la salida de la torre sí presentó una variación de casi 6 °C menor que el valor para el diseño, lo cual se atribuye a que en los meses de estudio (septiembre, octubre y noviembre) la temperatura del aire atmosférico estuvo más baja con respecto a la condición tomada en el diseño. Al incrementarse la temperatura de bulbo seco, también lo hace el porcentaje de humedad relativa.

Tabla 4.2 Valores de los parámetros químicos del agua de la torre de enfriamiento a las condiciones de diseño y de operación actual (septiembre a noviembre de 2009)

PARÁMETROS	UNIDAD	RANGO DE DISEÑO	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO
pH	Adimensional	8,0 - 8,5	8,51	8,43	8,55
Conductividad	(uS/cm)	1800 máx	969,38	871,36	1.056,15
Alcalinidad	(ppm CaCO ₃)	400 máx	175,85	147,95	198,07
Dureza cálcica	(ppm CaCO ₃)	800 máx	373,85	363,77	381,78
Dureza total	(ppm CaCO ₃)	800 máx	418,99	381,00	438,60
Fosfato soluble	(ppm PO ₄)	4,0 - 7,0	6,33	5,87	6,64
Fosfato total	(ppm PO ₄)	4,0 - 7,1	6,96	6,50	7,45
HPS	(ppm Polímero)	8,0 - 18,0	14,21	12,89	15,12
Cloro libre	(ppm Cl ₂)	0,2 - 0,6	0,57	0,00	1,36
Turbidez	(NTU)	15 máx	7,86	4,40	10,18
Sílice	(ppm SiO ₂)	150 máx	20,15	18,43	23,32
Ciclos de concentración	Adimensional	4,9 máx	3,56	3,25	3,72

El agua de enfriamiento que cae a la piscina de la torre fue también objeto de estudio, ya que si no se controlan los parámetros químicos del agua se pueden presentar distintos problemas en el sistema de agua de enfriamiento, tales como ensuciamiento microbiológico, deposición, incrustación y corrosión.

La tabla 4.2 muestra el rango de diseño establecido para los parámetros químicos del agua de enfriamiento; así como los valores promedios durante los meses de estudio (septiembre, octubre, noviembre). También presenta cada valor promedio de operación actual con sus respectivos mínimo y máximo. Se observa que cada promedio de los parámetros químicos se ubicó dentro de sus respectivos límites de control.

El cloro libre, a pesar de que estuvo dentro de los límites de control promedio, exhibió valores mínimos de 0,000 ppm cuando se estableció por

diseño 0,2 ppm; de igual forma el valor máximo de cloro alcanzado durante los meses de estudio fue de 1,360 ppm y por diseño se espera un máximo de 0,6 ppm; es decir una desviación de más del 50%. Esta variación respecto al diseño tuvo una incidencia directa sobre la calidad del agua de enfriamiento y pudo haberse originado por la dosificación manual del hipoclorito de sodio. Debido a que el paquete de inyección del hipoclorito actualmente no se encuentra operativo y ha sido sustituido por un sistema de alimentación portátil de hipoclorito (*portafieed* de cloro), por pequeñas bombas dosificadoras y por líneas de suministro (mangueras). Todas estas condiciones han originado falta de continuidad en la dosificación debido a efectos mecánicos, fallas presentes en las bombas y la corrosión que se origina en las roscas metálicas de las mangueras de suministro, lo que se ve reflejado en la variación del residual de cloro es (0,2 – 0,6 ppm). La situación actual del paquete de inyección de hipoclorito se muestra en la figura 4.1.

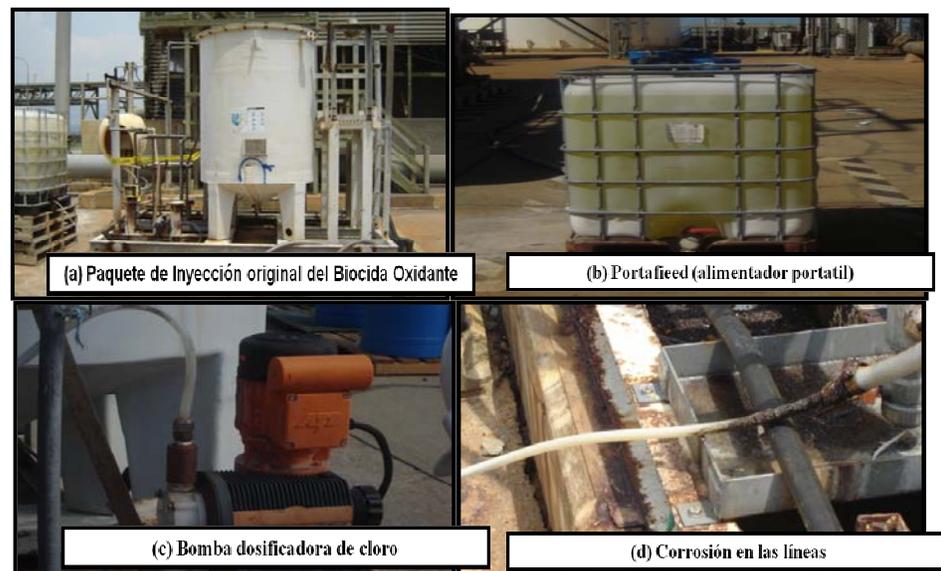


Figura 4.1 Paquete de inyección de hipoclorito original, y el sistema portátil utilizado actualmente en el mejorador Petromonagas para sustituir el sistema de inyección original

4.1.2 Porcentajes de desviación de las condiciones de operación actual de la torre de enfriamiento con respecto a las condiciones de diseño

En la tabla 4.3 se aprecia que los valores promedios de las condiciones de operación actual fueron menores que los establecidos para el diseño, lo que indica que la torre estuvo operando a condiciones favorables. También se observa que el caudal de reposición presentó un 46,45% de desviación con respecto al diseño, evidenciando que se estaba reponiendo un poco más de la mitad del agua establecida por diseño, al suministrar 3.293,31 m³/h de agua de recirculación a la torre. Actualmente se suministra un promedio de 3.238,35 m³/h de caudal de recirculación, lo que representa un 1,67% de desviación respecto al diseño. Los valores de operación actual menores al diseño se deben a las condiciones actuales del aire y el bajo rango de enfriamiento en la torre. Considerando ésto se puede aumentar el flujo de agua de alimentación sin provocar consecuencias desfavorables.

Por otra parte la temperatura de entrada del agua a la torre o temperatura de retorno, presentó una desviación del 16,59% mientras que la temperatura de salida un 7,51%. Estas desviaciones indican que la torre de enfriamiento estaba trabajando por debajo de su capacidad de diseño, lo cual permite un buen desempeño de la misma y a su vez ofrece la facilidad de aumentar las cargas en el proceso ya que la torre puede enfriar todavía más hasta llegar al rango de enfriamiento de diseño.

Tabla 4.3 Porcentajes de desviación de operación actual con respecto al diseño de la torre de enfriamiento

PARÁMETROS	VARIABLE	UNIDAD	DISEÑO	PROMEDIO	%DESVIACIÓN
Datos de la torre	Temperatura del agua de retorno a la torre	°C	45,56	38,00	16,59
	Temperatura de salida de agua de la torre	°C	31,67	29,29	7,51
	Caudal de reposición	m ³ /h	108,34	58,02	46,44
	Caudal de recirculación	m ³ /h	3.293,31	3.238,35	1,67
Condiciones del aire	Temperatura de bulbo húmedo a la entrada de la torre	°C	28,33	27,16	4,13
	Temperatura de bulbo húmedo a la salida de la torre	°C	31,67	30,26	4,44
	Temperatura de bulbo seco a la entrada de la torre	°C	31,67	31,40	0,84
	Temperatura de bulbo seco a la salida de la torre	°C	38,33	33,42	12,81
	Porcentaje de humedad relativa de entrada	%	80,00	74,78	6,53
	Porcentaje de humedad relativa de salida	%	95,00	80,97	14,77

4.1.3 Condiciones de diseño y operación actual de los intercambiadores de calor

En la tabla 4.4 se muestra una comparación del desempeño de los intercambiadores de calor entre los valores de diseño y de operación. Vale decir que el estudio del desempeño de los intercambiadores de calor sólo se limitó a los intercambiadores E-1109 y E-1305, ya que éstos fueron los únicos intercambiadores a los cuales se les pudo monitorear las variables requeridas (flujos y temperaturas de entrada y salida) para su estudio.

Las limitantes encontradas en el estudio de los intercambiadores de calor surgieron

desde el momento del levantamiento en campo de los intercambiadores de calor; donde se observó que la ubicación de estos carece en más de un 50% de acceso, lo que limita las mediciones de temperaturas y flujos requeridas para evaluar su desempeño; estas limitantes se muestran en el anexo B (tabla B.3). En el resto de los intercambiadores con acceso, se visualizó que los tramos de tuberías de agua a la entrada y salida de los mismos no tenían la longitud suficiente para instalar el medidor de flujo ultrasónico; por lo que fue imposible tomar las mediciones de flujo con un medidor de flujo ultrasónico. Se podían medir las temperaturas de entrada y salida con un pirómetro pero con la limitante del flujo para poder evaluar el intercambiador. Se procedió entonces a buscar todos los parámetros necesarios para el estudio del desempeño de los intercambiadores de calor, a través de la consola del Mejorador Petromonagas; y fue en ella donde se pudo localizar que a dos intercambiadores de calor le monitorean los flujos de entrada y de salida del proceso, así como las temperaturas de entrada y salida del intercambiador; limitándose así el estudio de los 27 intercambiadores que forman parte del sistema de enfriamiento, reportados en las hojas de diseño a los intercambiadores E-1109 y E-1305. Anexo B (tabla B.2).

Tabla 4.4 Valores de diseño y operación actual de los intercambiadores de calor

Lado	Parámetro	Unidad	Diseño	Operacional	Diseño	Operacional
			Intercambiador		Intercambiador	
			E-1109		E-1305	
Proceso	Temperatura entrada	°C	81,67	85,57	148,89	115,88
	Temperatura salida	°C	37,78	41,76	48,89	112,26
	Flujo de proceso	(m ³ /h)	142,33	2,89	20,89	572,26
Agua	Temperatura entrada	°C	31,67	26,93	31,67	40,22
	Temperatura salida	°C	43,33	34,98	48,89	65,09
	Flujo de agua	(m ³ /h)	262,33	7,20	54,96	34,58

Se observa que en el intercambiador E-1305 las temperaturas de entrada y salida de agua eran mayores que las establecidas por diseño; si operacionalmente el agua entra al intercambiador más fría que lo establecido por diseño (31,67 °C), se espera que su salida sea más fría que la establecida en diseño (48,89 °C); pero esto no ocurre sino que sale aun más caliente (65,09 °C), a pesar de que sigue utilizando un flujo de agua menor al de diseño (34,58 m³/h). Estas altas temperaturas lo convierten en un intercambiador crítico; debido a que el incremento en la temperatura favorece la formación de incrustaciones de carbonato de calcio, lo que ocasiona taponamiento en los tubos del intercambiador y como consecuencia directa, disminución de la eficiencia del mismo por limitaciones a la velocidad de transferencia de calor; y en el caso menos deseado, sacar el equipo de operación para realizar limpieza.

Para este mismo intercambiador E-1305 se observa que su temperatura de salida fue mayor que la de diseño, y el flujo de proceso utilizado, 572,26 m³/h, mucho mayor en comparación con el establecido por diseño (20,89

m³/h); este alto flujo de proceso que circula en el intercambiador es una de las principales causas del sobrecalentamiento generado en el lado agua del mismo, ya que al aumentar el flujo, aumenta la velocidad con que el calor es retirado.

4.2 Realización de balances de masa y energía en la torre de enfriamiento a las condiciones actuales de operación

En la tabla 4.5 se muestran los resultados del funcionamiento de la torre de enfriamiento, obtenidos mediante los balances de masa y energía realizados.

Tabla 4.5 Resultados de la evaluación del funcionamiento de la torre de enfriamiento

Resultado	Unidad	Diseño	Septiembre	Octubre	Noviembre
Rango de enfriamiento	°C	13,89	9,25	8,74	8,04
Flujo másico del aire (Gs)	kg aire seco/h	3.341.427,39	7.416.005,41	6.797.564,73	6.587.932,21
Relación líquido/gas (L/G)	kg agua/kg aire seco	0,99	0,44	0,51	0,52
Agua evaporada	%	2,60	1,06	1,05	1,27
Arrastre	(m ³ /h)	0,70	0,65	0,65	0,64
Calor retirado	MMkcal/h	45,74	29,43	28,11	24,48
Eficiencia térmica	%	81,00	82,01	91,78	83,85

4.2.1 Rango de enfriamiento

El rango de enfriamiento se mantuvo entre 8,04 °C como mínimo y 9,25 °C como máximo, durante el trimestre de estudio. Ello indica una disminución de aproximadamente 6 °C del rango de operación actual con respecto al diseño; lo que representa una desviación de 42,12% y 33,41% con respecto al rango de diseño de la torre.

Estas tendencias presentadas durante el periodo de estudio, tienen su razón de ser en las variaciones de las condiciones del ambiente; así como en el funcionamiento de la torre. El periodo estudiado estuvo correspondió a una estación lluviosa; de allí la influencia que tienen las temperaturas de bulbo húmedo, bulbo seco y la humedad relativa, sobre la eficiencia térmica de la torre y su capacidad de enfriamiento.

Por otra parte en la figura 4.2 se muestra el rango de enfriamiento durante los días de estudios para los meses de septiembre, octubre y noviembre. En ella se observa una disminución en el rango de enfriamiento de operación actual, la cual se origina en la medida en que la temperatura de bulbo húmedo y el porcentaje de humedad relativa se incrementan.

Ajustar el rango de enfriamiento actual a las condiciones de diseño, representaría un potencial de ahorro energético que permitiría ahorrar el consumo de energía en la torre de enfriamiento. Esto quiere decir que si se ajusta el rango de enfriamiento actual hasta llevarlo al de diseño (13,89 °C), manteniendo las condiciones del aire, la torre puede trabajar con un consumo de energía menor en las bombas y ventiladores.

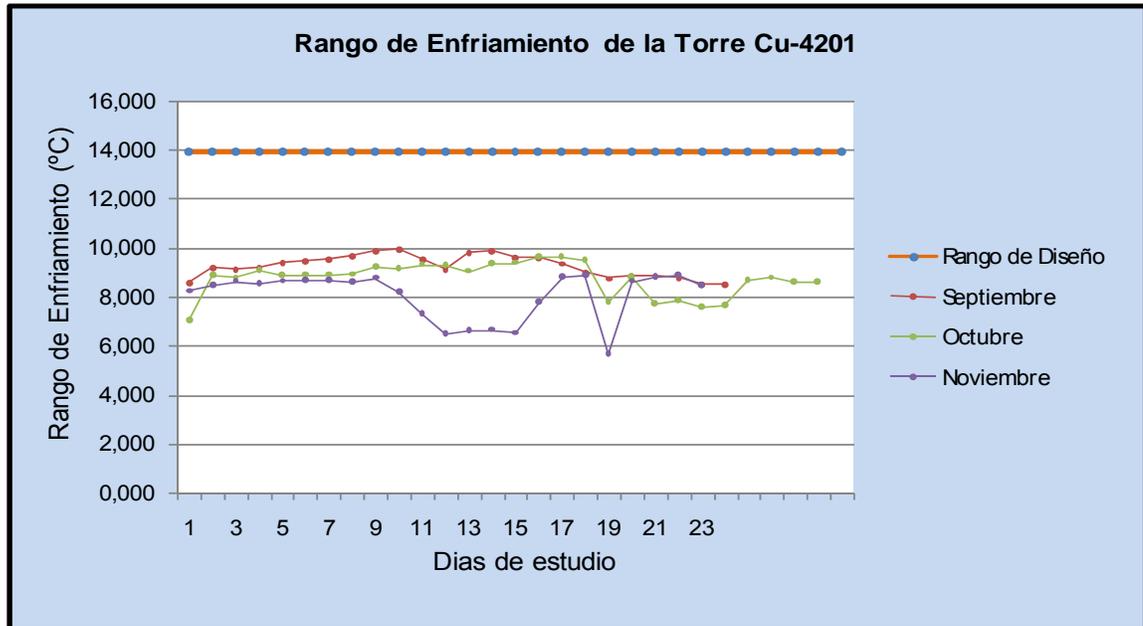


Figura 4.2 Rangos de enfriamiento operacional y de diseño en la torre de enfriamiento

Para alcanzar el rango de enfriamiento de diseño es necesario ajustar las temperaturas de salida en los intercambiadores de calor, hasta alcanzar la temperatura de retorno establecida por diseño (45,56 °C) a través de las restricciones de flujo que no alteren las condiciones del lado proceso.

En vista de que el rango de enfriamiento actual se encuentra por debajo del diseño (13,89 °C), los consumos eléctricos del equipo pueden reducirse sin alterar las condiciones de operación normal, tanto del proceso como del sistema.

Estas condiciones permiten asegurar que la torre se encontraba trabajando por debajo de su capacidad de enfriamiento real; es decir que el equipo es capaz de enfriar una cantidad de agua mayor a la que estaba enfriando durante los meses de estudio. Esto implica que la energía

necesaria para que la torre lleve a cabo el proceso de enfriamiento debe ser menor que la requerida por diseño.

4.2.2 Flujo másico del aire en la torre de enfriamiento

En la tabla 4.5 se muestra que el flujo másico de aire en la torre de enfriamiento establecido por diseño es de 3.341.427,39 kg aire seco/h, y durante los meses de estudio se obtuvieron flujos mayores al diseño 6.587.932,21 kg aire seco/h como mínimo, y 7.416.005,41 kg aire seco/h como máximo. Lo que representa un incremento de más del 100 % a las condiciones de operación con respecto al diseño. Este incremento en el flujo másico del aire pudo estar influenciado por las bajas temperaturas del aire a las condiciones actuales. Durante los meses de estudio las temperaturas de bulbo seco a la entrada de la torre se mantuvieron con la establecida por diseño 31,67 °C, mientras que las temperaturas de bulbo seco a la salida presentaron una diferencia de aproximadamente 4 °C por debajo de la establecida por diseño (39,00 °C); de allí que las bajas temperaturas de bulbo seco obtenidas, hayan tenido influencia en cuanto a entalpías más bajas en el agua de salida, las cuales inciden directamente en el cálculo del flujo másico del agua. Esta disminución en las temperaturas de bulbo seco a la salida de la torre, ocasionó la reducción en las entalpías, y por consiguiente incidió directamente en el incremento del flujo másico del aire, al mantener la condición de alimentación de flujo másico del agua.

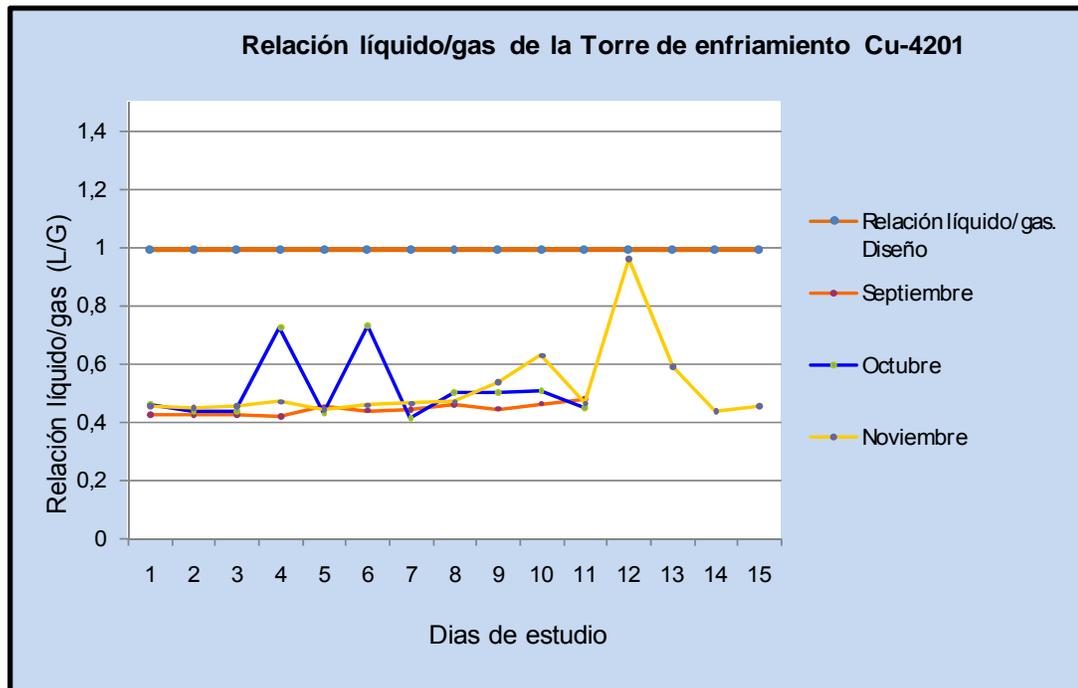
4.2.3 Relación líquido/gas

Se ha establecido por el Instituto para Torres de Enfriamiento (CTI, por sus siglas en inglés) que la condición de diseño para la relación líquido/gas en una torre de enfriamiento ha de estar entre 0,75 y 1,5. La torre de

enfriamiento del Mejorador Petromonagas presenta una relación líquido/gas por diseño de 0,99, tal como se muestra en la tabla 4.5; la cual se encuentra dentro de los lineamientos establecidos por la CTI. Considerando ésto y observando los resultados obtenidos operacionalmente durante los meses de estudio, en la tabla anteriormente citada se reporta una relación líquido gas por debajo del diseño establecido oscilando actualmente entre un mínimo de 0,44 y un máximo de 0,52; lo cual se traduce en una desviación de 49,14 % respecto al diseño.

Esto indica que se puede incrementar el flujo de agua de alimentación a la torre, debido a que actualmente se maneja un flujo de aire mayor al diseño, y si se aumenta el flujo de agua de recirculación y se mantienen las condiciones actuales del aire, su relación líquido/gas se incrementaría hasta llegar a la de diseño, y aun así la torre continuaría trabajando a condiciones favorables. Para el mes de noviembre se obtiene la mayor relación líquido/gas, ya que es el mes donde hay una disminución del flujo másico del aire.

En la figura 4.3 se muestra la variación operacional de la relación líquido/gas en los meses de estudio respecto al diseño; se observa que durante los días de estudio de los meses de septiembre y octubre se mantuvieron casi constantes las condiciones del aire y sus valores se reportan muy por debajo de la relación líquido/gas establecida por diseño. Mientras que para el mes de noviembre en la tabla 4.5 se muestra que el flujo másico de aire disminuyó y por ende en la figura 4.3 se observa un aumento mayor en la relación líquido/gas.



.Figura 4.3 Relación líquido/gas operacional y de diseño en la torre de enfriamiento

4.2.3 Porcentaje de agua evaporada en la torre de enfriamiento

La tasa de evaporación en la torre de enfriamiento depende del rango de enfriamiento de la misma y de la cantidad de agua de recirculación.

En la tabla 4.5 se observa que para el mes de octubre se obtuvo el porcentaje de agua evaporada más bajo; esto se podría atribuir a que el rango de enfriamiento disminuyó a 8,74 °C, lo que influyó directamente en el porcentaje de agua evaporada de la torre de enfriamiento.

Se ha establecido por el Instituto para Torres de Enfriamiento (CTI, por sus siglas en inglés) que la condición de diseño del porcentaje de agua evaporada en una torre de enfriamiento ha de oscilar alrededor de 2 %. La

torre de enfriamiento del Mejorador Petromonagas ha sido diseñada para evaporar un máximo de 2,6 %, el cual está dentro de lo esperado en una torre de enfriamiento.

En la tabla se observa que el porcentaje de agua evaporada durante los meses de estudio osciló entre 1,05 % como mínimo y 1,27 % como máximo; lo que representa un valor por debajo del establecido en el diseño de la torre (máximo 2,6%). Esto significa que la torre evaporaba menos de la mitad de la cantidad para la cual fue diseñada. Dicha variación en el porcentaje de evaporación está relacionada con la temperatura en la torre. Se ha establecido para el diseño de la misma, un rango de enfriamiento de 13,89 °C, cuando operacionalmente se obtiene un máximo de 9,25 °C; de allí que por diseño la cantidad de agua evaporada sea 2,6 % por presentar un mayor gradiente de temperatura; mientras que en la operación actual el gradiente fue menor, por lo tanto se redujo la evaporación en un máximo de 1,27 %.

Por su parte la figura 4.4 muestra que el mayor porcentaje de agua evaporada resultó ser de 2,17 % y correspondió al octavo día de estudio del mes de septiembre. También se observa que durante los demás días estudiados en el trimestre, el porcentaje de agua evaporada se mantuvo por debajo del 2 %. Estas condiciones se pueden aprovechar para ajustar el rango de enfriamiento actual, a las condiciones de diseño; lo que representaría un potencial de ahorro energético que permita optimizar el consumo de energía en dicha torre de enfriamiento.

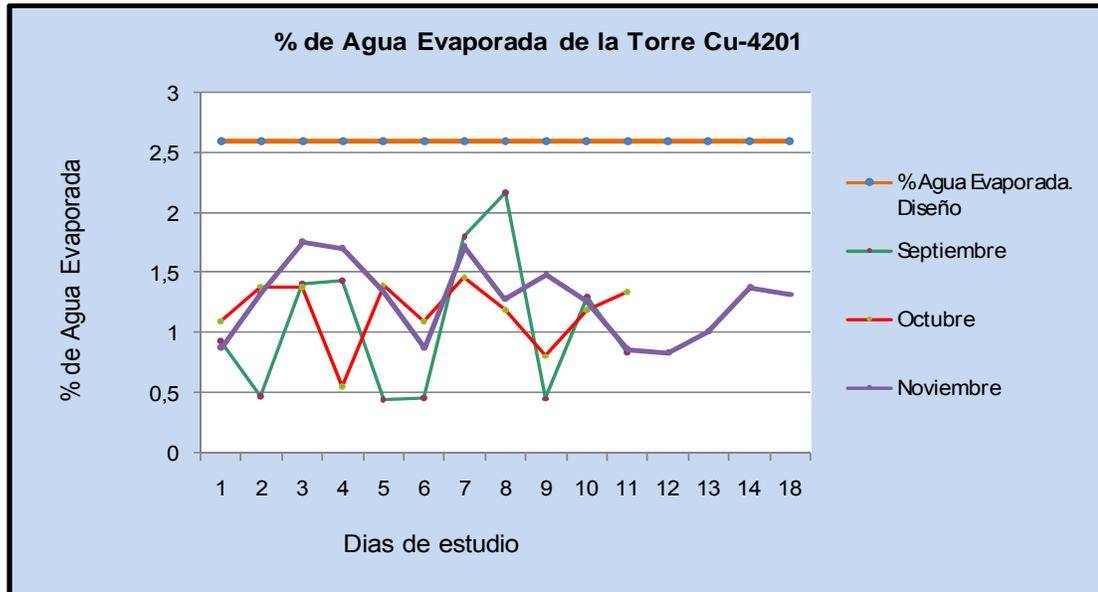


Figura 4.4 Porcentaje de agua evaporada respecto al porcentaje de diseño de la torre de enfriamiento

4.2.4 Arrastre en la torre de enfriamiento

En la tabla 4.5 se muestra que la torre de enfriamiento durante los meses de septiembre, octubre y noviembre mantuvo una pérdida de agua de enfriamiento por arrastre entre $0,64 \text{ m}^3/\text{h}$ como mínimo reportado en el mes de noviembre y $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ como máximo para los meses de septiembre y octubre; esto ha podido ser originado por las condiciones del aire y la dirección del viento.

Por otra parte la figura 4.5 evidencia esta variación en las pérdidas de agua producidas por arrastre con respecto al diseño. Se observa que la variación de los valores diarios reportados para cada mes no difieren mucho con respecto al rango a su condición de diseño ($0,70 \text{ m}^3/\text{h}$); aún así, la torre

siguió trabajando en condiciones favorables y dentro de su parámetro de diseño.

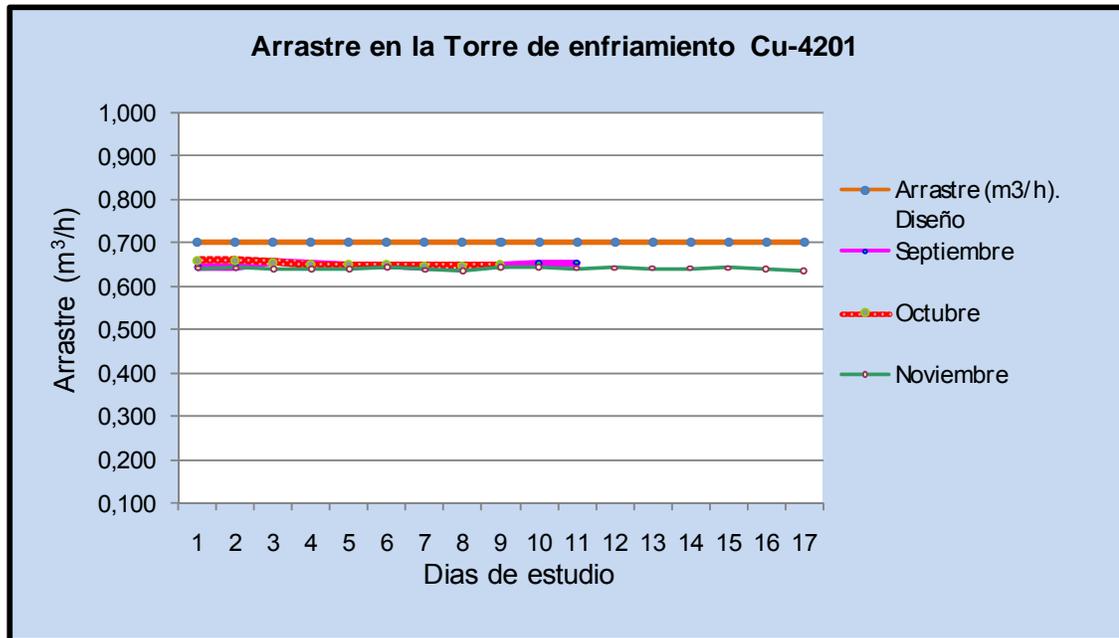


Figura 4.5 Arrastre de operación actual respecto al arrastre de diseño de la torre de enfriamiento

4.2.5 Calor retirado en la torre de enfriamiento

En la tabla 4.5 se observa que para el mes de septiembre se obtuvo la mayor cantidad de calor retirado en la torre (29,43 MMkcal/h). Una de las situaciones que ha podido originar esta mayor cantidad de calor retirado, es que durante este mes es cuando se produce el mayor incremento de temperatura, el cual se ve reflejado en su rango de enfriamiento. Por consiguiente, la torre requiere retirar mayor calor y así conservar su rango de enfriamiento. La misma está diseñada para retirar una cantidad de calor de 45,74 MMkcal/h aproximadamente. También se aprecia que durante el trimestre

de estudio el calor retirado en la torre de enfriamiento fue mucho menor que el establecido por diseño; lo cual tuvo dos causas fundamentales, como lo son: unidades de producción fuera de servicio, e intercambiadores de calor trabajando en condiciones críticas de operación. El calor generado por el proceso también depende de los porcentajes de carga manejados por las unidades de producción; así como del calor retirado por cada uno de los intercambiadores que forman parte de las distintas unidades de producción de la planta.

La figura 4.6 muestra las variaciones del calor durante los meses de septiembre, octubre y noviembre respecto al diseño; observando un comportamiento casi constante, hasta el mes de noviembre cuando hay un descenso del calor retirado el cual se origina por una disminución en el rango de enfriamiento de la torre; así como un incremento originado en el mes de septiembre ya que en él se reporta un aumento en el rango de enfriamiento

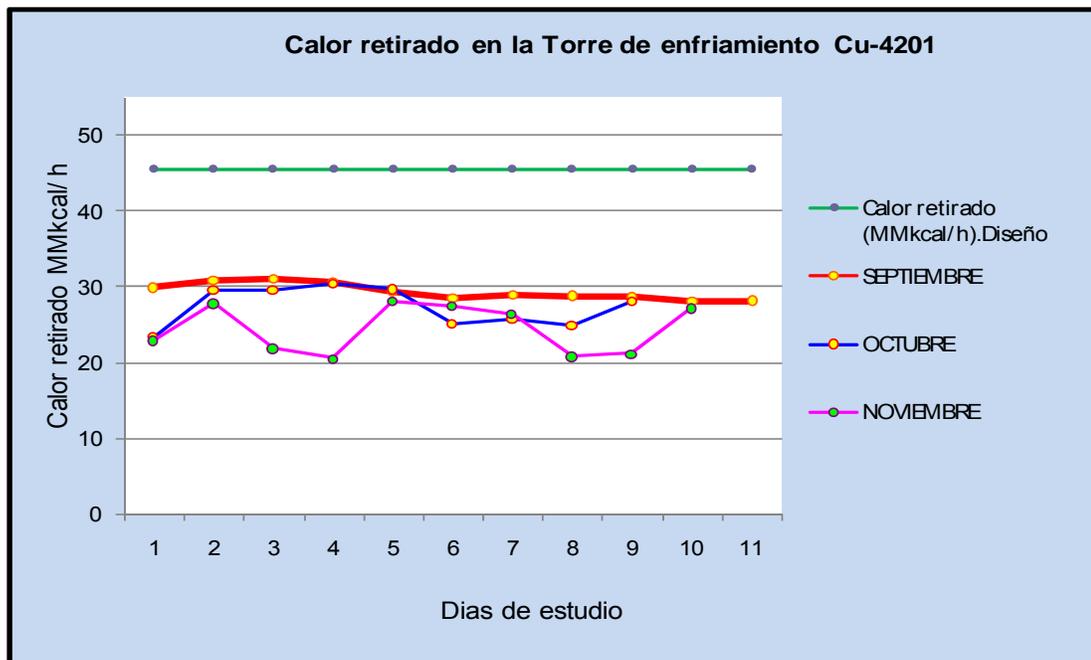


Figura 4.6 Calor retirado respecto al diseño en la torre de enfriamiento

Se muestran valores de calor retirado menores que el de diseño, debido a que el rango de enfriamiento actual de la torre es menor que el que se establece por diseño, para lograr retirar 45,74 MM kcal/h (tabla 4.5); por lo tanto, los valores de calor retirados actualmente obedecen a los bajos rangos de enfriamiento a las condiciones de operación actual.

4.2.6 Eficiencia térmica de la torre de enfriamiento

En la tabla 4.5 se observa que la torre de enfriamiento ha sido diseñada con una eficiencia térmica de 81%. También se muestra que durante los meses de estudio se mantuvo una eficiencia mayor a la establecida por el diseño; reportando un valor máximo de 91,78 % para el mes de octubre y un mínimo para el mes de septiembre de 82,01 %. Este comportamiento se debe principalmente a las tendencias ascendentes en la temperatura de bulbo húmedo durante este periodo.

En la figura 4.7 se observa que durante los días de estudios se manifestó una tendencia de la eficiencia térmica, mayor que la establecida por diseño; lo que indica que la torre tiene una más alta capacidad de enfriamiento y que actualmente posee una mayor flexibilidad operacional.

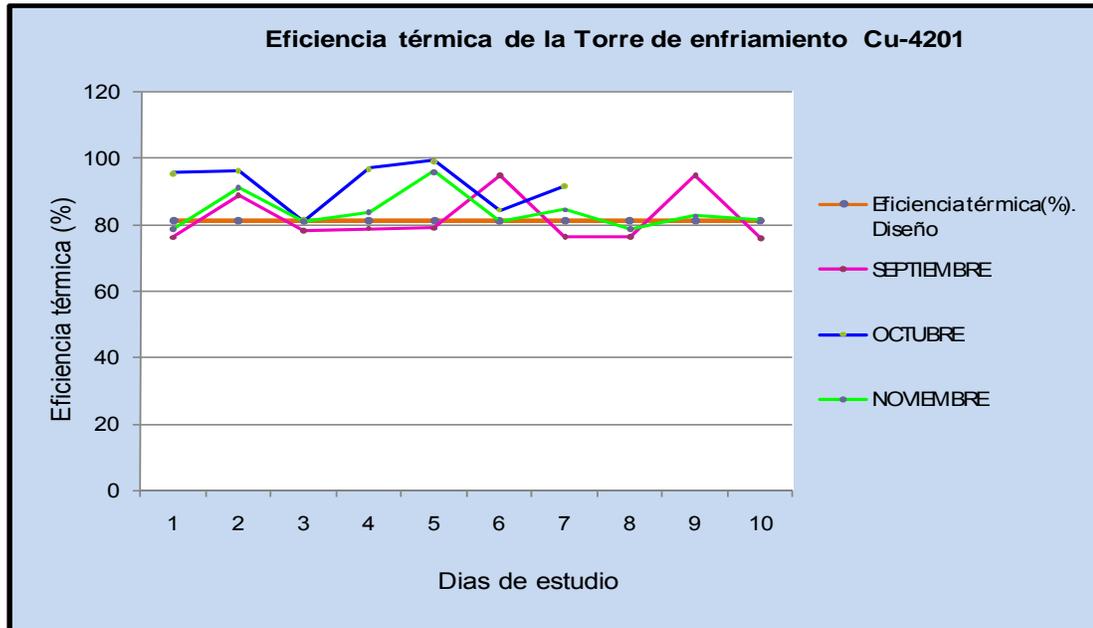


Figura 4.7 Eficiencia térmica operacional respecto a la eficiencia térmica de diseño de la torre de enfriamiento

4.3 Seguimiento a las líneas de tubería para la localización de fugas o pérdidas de agua en el sistema de enfriamiento

4.3.1 Inspección Visual a las líneas de tubería

El seguimiento realizado a las líneas de tubería permitió localizar los límites de baterías de las distintas unidades de proceso que conforman el Mejorador Petromonagas, y la inspección visual arrojó que no existe ningún sensor en línea para obtener los flujos de agua de entrada y salida, así como las temperaturas de entrada y salida en cada límite de batería. Tampoco se encontraron fugas de agua de enfriamiento en los tramos de tubería que la conforman.

En el anexo D (figura D.2), se presentan fotografías del seguimiento e inspección visual de las líneas de tubería del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas. La tabla 4.6 muestra el resultado obtenido del recorrido a las líneas de tubería que permitió identificar y ubicar los equipos asociados al sistema de enfriamiento, señalados en los datos de diseño de los equipos que utilizan agua de enfriamiento.

Se observó que existen diferencias entre los equipos reportados en los datos de diseño y los encontrados durante el seguimiento a las líneas de tubería; es decir, la inspección visual y levantamiento en campo de los equipos asociados al sistema de enfriamiento, arrojó una mayor cantidad de equipos asociados al sistema, tomando en consideración los reportados por diseño. Esta diferencia se debe a que no se han actualizado los manuales de la unidad de sistema de agua de enfriamiento de la planta. La inspección visual permitió cuantificar y ubicar los equipos que actualmente están asociados al sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas.

Tabla 4.6 Equipos asociados al sistema de agua de enfriamiento

Equipos	Diseño	Seguimiento de la línea de enfriamiento
INTERCAMBIADORES	27	30
COMPRESORES	5	9
BOMBAS	—	42
MEDIDOR DE TEMPERATURA	—	4
TOTAL	31	85

Se observó que todos los intercambiadores de calor adicionales encontrados se encontraban operativos, generando un mayor consumo de agua de enfriamiento que el reportado por diseño. También se observó que muchas de las bombas usan agua de enfriamiento en sus sellos y que luego de usada la desechan.

Considerando lo anteriormente descrito, se tiene como resultado que parte del agua de enfriamiento perdida y no cuantificada, se debe a estos equipos asociados al sistema, y de los cuales no se cuantifica la cantidad de agua de enfriamiento consumida, así como el agua de enfriamiento usada en los sellos de las bombas y que luego es desechada.

4.3.2 Balance de masa de agua en los límites de batería

En la tabla 4.7 se observa que al realizar el balance de masa global, la cantidad de agua de entrada a la torre no era la misma de salida. La demanda requerida por el proceso o agua de salida de la torre fue de 3.321,24 m³/h, de los cuales se recibían como retorno del proceso 3.161,80 m³/h de agua de enfriamiento, lo que representó una cantidad total de agua perdida en el proceso de 159,44 m³/h. Esta cantidad de agua se distribuye en las cuatro unidades de proceso del Mejorador Petromonagas.

**Tabla 4.7 Distribución del agua de enfriamiento del Mejorador
Petromonagas en los límites de batería de cada unidad de proceso**

Distribución	Unidad	Temperatura fluido (°C)	Temperatura contacto (°C)	Diaméto de tubería (m)	Cédula de la tubería (adimensional)	Espesor estandar (m)	Espesor actual (m)	Espaciamiento (m)	Flujo (m ³ /h)
Salida	Torre de	28,44	28,89	0,60	20,00	0,114	0,105	0,293	3.321,24
Entrada	Enfriamiento (Unidad 42)	37,78	38,33	0,60	20,00	0,114	0,108	0,295	3.161,80
Entrada	Unidades 40	28,89	29,44	0,15	40,00	0,085	0,085	0,158	260,51
Salida		31,78	32,22	0,15	40,00	0,085	0,085	0,158	255,74
Entrada	Unidades 30	29,28	29,44	0,20	40,00	0,098	0,092	0,207	255,52
Salida		30,67	31,11	0,20	40,00	0,098	0,092	0,207	227,58
Entrada	Unidades 20	27,22	27,78	0,15	40,00	0,085	0,079	0,160	184,88
Salida		31,22	31,67	0,15	40,00	0,085	0,079	0,162	181,70
Entrada	Unidades 10	27,89	28,11	0,60	20,00	0,114	0,110	0,286	2.620,34
Salida		38,89	39,11	0,60	20,00	0,114	0,108	0,295	2.496,78

En la tabla 4.8 se aprecia la distribución del agua de enfriamiento perdida en cada unidad del proceso. En las unidades 10 (área de coque) del Mejorador, se reporta un requerimiento del proceso de 2.620,34 m³/h, de los cuales retornaban 2.496,78 m³/h, lo que representa una cantidad de agua no retornada de 123,56 m³/h; es decir 77,50 %, más de las tres cuartas partes del agua total que se pierde en todo el sistema de agua de enfriamiento. La menor cantidad de agua que se pierde en el proceso se localiza en las unidades 20 (hidrotratamiento de nafta), en la cual se observa una pérdida de agua de enfriamiento de solo 3,18 m³/h (1,99%).

Tabla 4.8 Distribución de las pérdidas de agua de enfriamiento

UNIDAD	FLUJO DE AGUA		FLUJO DE AGUA	FLUJO DE AGUA	PÉRDIDA TOTAL DE AGUA (m ³ /h)
	Entrada	Salida	PERDIDO	PERDIDO	
	(m ³ /h)	(m ³ /h)	(m ³ /h)	(%)	
Unidades 10	2.620,34	2.496,78	123,56	77,50	159,44
Unidades 20	184,88	181,70	3,18	1,99	
Unidades 30	255,52	227,58	27,94	17,52	
Unidades 40	260,51	255,74	4,77	2,99	
Total	3.321,24	3.161,80	159,44	100,00	

A pesar de cuantificar la pérdida total de agua de enfriamiento, así como la distribución de ésta en las distintas unidades del proceso, el estudio se limitó solo a cuantificar la pérdida y localizarla desde la menor hasta la mayor cantidad de agua pérdida por unidad. No se especificó cuáles fueron los equipos críticos que originaron tales pérdidas. Esta limitante fue causada por la falta de sensores en línea en los equipos que forman parte del sistema de enfriamiento, por la ubicación y acceso de los mismos; así como los pequeños tramos de tubería de aquellos equipos más accesibles, pero que no cumplen con los requisitos para instalar el medidor de flujo ultrasónico.

En la tabla 4.9 se muestra el porcentaje de desviación del flujo de agua de enfriamiento a la entrada y salida de la torre (4,80 %), lo cual representa un porcentaje bajo, debido a que en la torre de enfriamiento no es donde ocurre la pérdida de agua, sino en las unidades de proceso; de allí que no retorna la cantidad de agua que se envía.

También se muestra que los porcentajes de desviación del flujo de agua de enfriamiento de entrada y salida a las condiciones de operación actual, fueron mucho mayores para las unidades de proceso 20, 30 y 40, tomando como referencia su condición de diseño; mientras que en las unidades 10 es donde se obtuvo un menor porcentaje de desviación del flujo de agua de enfriamiento (6,27 % a la entrada y 10,69 % a la salida); lo cual evidencia que las unidades 10 manejaban flujos de agua dentro de los parámetros de diseño. Lo contrario ocurre con las unidades restantes, donde el requerimiento de flujo de agua fue mayor a las condiciones de operación actual que el establecido por diseño.

El mayor porcentaje de desviación, (87,40 %) se obtuvo en las unidades 20 y por ende, un requerimiento actual de agua de enfriamiento superior al diseño, lo que permite ubicar esta unidad como la más crítica por el mayor requerimiento de agua de enfriamiento que actualmente reporta.

Tabla 4.9 Porcentajes de desviación de los flujos de agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual respecto al diseño

		FLUJO		DESVIACIÓN	% DESVIACIÓN FLUJO AGUA Entrada /Salida
		DISEÑO (m ³ /h)	OPERACIONAL (m ³ /h)	Referida al Diseño (%)	
Agua Retorno	Unidades 10	2.795,68	2.496,78	10,69	4,80
	Unidades 20	96,98	181,70	87,40	
	Unidades 30	158,99	227,58	43,24	
	Unidades 40	200,55	255,74	27,59	
	Entrada torre	3.271,05	3.161,80	3,34	
	Total Torre	3.293,31			
Agua Recirculación	Unidades 10	2.795,68	2.620,34	6,27	
	Unidades 20	96,98	184,88	87,40	
	Unidades 30	158,99	255,52	43,24	
	Unidades 40	200,55	260,51	27,59	
	Salida torre	3.271,05	3.321,24	1,55	
	Total Torre	3.293,31			

En la tabla 4.10 se presentan los resultados obtenidos de las temperaturas a la entrada y salida, durante el estudio del balance de agua en los límites de batería a la entrada y salida de la torre de enfriamiento. Se observa que dichas temperaturas son menores que las de diseño, lo cual incide directamente sobre el rango de enfriamiento de la torre, y se transforma en una menor cantidad de calor liberada por ésta.

Tabla 4.10 Pérdidas de calor actual en la torre de enfriamiento y su porcentaje de desviación operacional respecto al diseño

	VARIABLE	UNIDAD	DISEÑO	OPERACIÓN	% DESVIACION CALOR
Agua Recirculación	Temp Entrada	°C	45,56	37,78	29,14
	Temp Salida	°C	31,67	28,33	
	ΔT	°C	13,89	9,45	
	FLUJO	(m3/h)	3.271,05	3.321,70	
	CALOR	MMkcal/h	44,10	31,25	
Agua Retorno	Temp Entrada	°C	45,56	37,78	32,57
	Temp Salida	°C	31,67	28,33	
	ΔT	°C	13,89	9,45	
	FLUJO	(m3/h)	3.271,05	3.162,03	
	CALOR	MMkcal/h	44,10	29,74	

Se aprecia que si se mantiene un rango de enfriamiento menor y un flujo de agua mayor que el reportado para el diseño, se siguen obteniendo porcentajes de desviación bajos; lo cual indica que se puede aumentar la cantidad de agua enfriamiento que entra y sale a la torre de enfriamiento, sin sobrepasar la capacidad que tiene ésta de retirar calor. Para aumentar el flujo de agua en la torre hay que considerar la capacidad de funcionamiento de las bombas.

4.4 Estudio del funcionamiento de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se incluyen dentro de los equipos que pueden afectar la continuidad y confiabilidad del sistema de enfriamiento, debido a que el desempeño de estos equipos depende no sólo de las condiciones y propiedades del agua de enfriamiento, sino también de las condiciones del fluido que circula del lado proceso.

Un intercambiador de calor que presente valores de temperatura de salida del lado proceso, alejados del valor preestablecido para el equipo, estaría afectando la confiabilidad del agua de enfriamiento en cuanto a su capacidad de enfriar dentro del equipo; mientras que una obstrucción o ruptura de los tubos por donde fluye el agua puede generar una parada de emergencia, afectando la continuidad operacional del sistema de agua de enfriamiento en la sección donde se encuentra el intercambiador.

En la tabla 4.11 se observa que para los dos intercambiadores estudiados (E-1109 y E-1305), se presentan temperaturas de salida del proceso mayores, comparadas con la establecida por diseño para el equipo. En el caso del intercambiador E-1109 se reporta una temperatura de proceso por diseño de 37,78 °C y operacionalmente se reportó una temperatura de 41,76 °C lo que representa un 10,54 % de desviación respecto al diseño. Cabe destacar que este intercambiador presenta actualmente una temperatura de agua de enfriamiento de entrada menor (26,93 °C), a la que la que sale de la torre de enfriamiento (31,67 °C). Esto no debe suceder; el agua no puede entrar al intercambiador a una temperatura menor que la que sale de la torre. Lo que puede explicar este descenso en la temperatura, es una tubería que se conecta a la tubería principal donde se suministra el agua para este intercambiador, pero de la cual fue imposible conocer su

temperatura de operación. Para el intercambiador E-1305 se establece por diseño una temperatura de salida de proceso de 48,89 °C reportando operacionalmente 112,26 °C, equivalente a más de un 100 % de desviación respecto al diseño.

Tabla 4.11 Variaciones en las temperaturas de entrada y de salida a las condiciones de operación, respecto a las temperaturas de diseño reportadas en los intercambiadores de calor

Lado	Temperatura	Unidad	Diseño	Operacional	Diseño	Operacional
			Intercambiador		Intercambiador	
			E-1109		E-1305	
Proceso	Entrada	°C	81,67	85,57	148,89	115,88
	Salida	°C	37,78	41,76	48,89	112,26
Agua	Entrada	°C	31,67	26,93	31,67	40,22
	Salida	°C	43,33	34,98	48,89	65,09

Esta condición de alta temperatura de salida de proceso reportada en el intercambiador E-1305, ocasiona una zona de sobrecalentamiento cuya temperatura de piel de tubos excede en gran medida a la permitida por el diseño, provocando la precipitación de aquellas sales que presentan una solubilidad invertida, es decir; cuya solubilidad disminuye a medida que aumenta la temperatura. Cabe destacar que otra de las posibilidades de incrustación es este intercambiador de calor se puede originar por su condición de bajo flujo. Tales situaciones convierten al equipo E-1305 en un intercambiador crítico para el sistema, ya que las condiciones del mismo favorecen el ensuciamiento, la deposición y las incrustaciones dentro de los tubos.

En la tabla 4.12 se muestra los resultados de los cálculos de velocidad del agua en los tubos, así como los calores retirados en los intercambiadores

E-1109 y E-1305 durante los días de estudio. Se observa que del intercambiador E-1109 los flujos de proceso y flujos de agua de enfriamiento reportados fueron menores que los establecidos por diseño; el flujo de agua de enfriamiento fue bajo a las condiciones de operación actual y se reportó como 7,20 m³/h promedio para este intercambiador. Ello influye directamente sobre la velocidad del agua en los tubos, obteniéndose 0,055 m/s promedio; esta velocidad de los tubos se incrementaría a medida que aumente el flujo de agua de enfriamiento hasta llegar al valor de diseño; cuando se manejan flujos de 262 m³/h, la velocidad del agua se hace mayor y también su capacidad de retirar calor.

Tabla 4.12 Resultados obtenidos de las condiciones de operación actual de los intercambiadores de calor con respecto al diseño

FECHA	Intercambiador	Lado Proceso			Lado Agua			Velocidad del agua en los tubos m/s	Calor Retirado (MM kcal/h) Operación	Calor Retirado (MM kcal/h) Diseño
		Temperatura(°C)		Flujo de proceso (m ³ /h)	Temperatura(°C)		Flujo de agua (m ³ /h)			
		Entrada	Salida		Entrada	Salida				
23/11/2009	E-1109	67,69	31,82	2,62	27,22	35,56	1,00	0,008	3,047	
24/11/2009		90,92	41,53	2,60	27,78	34,44	9,00	0,069		
25/11/2009		90,09	40,64	2,57	25,56	32,89	7,99	0,061		
26/11/2009		91,98	42,26	2,57	26,89	37,00	6,00	0,046		
27/11/2009		87,19	52,56	2,57	27,22	35,00	11,99	0,091		
PROMEDIO		85,57	41,76	2,58	26,93	34,98	7,20	0,055		
Condición de Diseño		81,67	37,78	142,33	31,67	43,33	262,33			
23/11/2009	E-1305	102,20	99,32	410,28	39,44	64,56	19,99	0,766	0,948	
24/11/2009		120,55	116,33	549,16	38,89	64,11	39,98	1,531		
25/11/2009		121,91	118,06	661,04	40,28	65,22	36,98	1,416		
26/11/2009		123,94	119,93	633,69	41,56	65,89	40,98	1,569		
27/11/2009		110,79	107,64	607,14	40,94	65,67	34,98	1,340		
PROMEDIO		115,88	112,26	572,26	40,22	65,09	34,58	1,324		
Condición de Diseño		148,89	48,89	20,89	31,67	48,89	54,96			

Para el intercambiador E-1109 también se muestra que las temperaturas de entrada y salida del lado agua y lado proceso

estuvieron asociados a una cantidad de calor muy pequeña en el intercambiador de 0,060 MMkcal/h; tomando en cuenta que para este intercambiador se reportan 3,047 MMkcal/h por diseño. Esto indica que se pueden aumentar los flujos en el intercambiador, lo cual conduce a aumentos de temperatura y del calor retirado; pero que no sería desfavorable, ya que el intercambiador operacionalmente se encontraba trabajando muy por debajo de sus condiciones de diseño.

Para el intercambiador E-1305, se observaron bajas temperaturas de entrada del lado proceso y un flujo de agua de enfriamiento cercano al establecido por diseño. Esto permite una velocidad del agua en los tubos de 1,324 m/s lo cual se considera aceptable para este intercambiador.

También se muestra que la temperatura de salida del lado proceso en el intercambiador era mayor (112,26 °C) que la establecida por diseño (48,89 °C); así como el flujo manejado en el período de estudio (572,261 m³/h) superaba en gran magnitud al flujo de diseño de este intercambiador 20,89 m³/h . Tan alta cantidad de flujo de proceso que circulaba por el intercambiador de calor se muestra para el día 26/11/2009, cuando se manejaban del lado proceso 633,69 m³/h y del lado agua 40,98 m³/h. Las altas temperaturas del lado proceso y su elevado flujo, conllevaron a una mayor cantidad de calor a retirar; observándose para este día un calor retirado de 1,569 MMkcal/h, cuando por diseño se establecen 0,948 MMkcal/h.

Las altas temperaturas y el alto flujo de lado proceso convierten a este intercambiador de calor en un equipo crítico del sistema de agua de enfriamiento.

4.5 Comprobación de la efectividad del tratamiento químico del agua de enfriamiento

A diferencia de los equipos que conforman el sistema de agua de enfriamiento, los parámetros químicos no afectan directamente la continuidad del sistema; sin embargo, las alteraciones de los mismos con respecto a los rangos preestablecidos influyen negativamente en la confiabilidad del mismo y si no se controlan a tiempo pueden generar incrustaciones, corrosión, pérdida de producción y costos de mantenimiento más elevados y, en el peor de los casos, generar una parada de planta.

Los parámetros químicos del sistema de agua de enfriamiento están relacionados directamente con la concentración de las especies en el sistema y el tratamiento químico aplicado al mismo.

Considerando lo descrito anteriormente, se realizó una evaluación continua de los parámetros químicos del sistema de agua de enfriamiento, con el objetivo de estudiar el comportamiento de cada uno de ellos (pH, conductividad, dureza cálcica, dureza total, fosfato, HPS, cloro libre, turbidez entre otros).

El sistema de clorinación es un sub-sistema del sistema de agua de enfriamiento. Su función principal es la dosificación de cloro que actúa como biocida oxidante para evitar la proliferación de microorganismos en dicho sistema. El mal funcionamiento del mismo aumenta el potencial de ensuciamiento microbiológico, disminuyendo la confiabilidad del sistema de agua de enfriamiento. El alcance de este trabajo no incluye este sistema; sin embargo, los parámetros químicos que se originan por la operación del mismo sí fueron considerados.

4.5.1 Tendencia corrosiva o incrustante del agua de enfriamiento

La tabla 4.13 muestra los resultados obtenidos en los cálculos de los índices de estabilidad de Langelier y Ryznar durante los meses de septiembre, octubre y noviembre; así como la tendencia del agua de enfriamiento.

Tabla 4.13 Tendencia del agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas; por Langelier (IL) y Ryznar (IR)

MES	Condición actual		Rango establecido		Tendencia del agua
	IL	IR	IL	IR	
Septiembre	1,6	5,4	< 0,5 y > 2	5 a 6	Ligeramente incrustante
Octubre	1,4	5,6	< 0,5 y > 2	5 a 6	Ligeramente incrustante
Noviembre	1,3	5,9	< 0,5 y > 2	5 a 6	Ligeramente incrustante

Se observa que durante el trimestre de estudio el índice de Langelier más bajo (1,3) correspondió al mes de noviembre y presentó una tendencia del agua ligeramente incrustante. El índice más alto (1,6) para el mes de septiembre aún mantuvo la tendencia ligeramente incrustante del agua.

El índice de Ryznar arrojó un mínimo de 5,4 y un máximo de 5,9 para los meses de septiembre y noviembre respectivamente; lo cual se encuentra dentro del rango establecido por Ryznar de 5 a 6, para un agua ligeramente incrustante. Lo que evidencia que el agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas tiene una tendencia ligera a formar incrustaciones.

4.5.2 Ciclos de concentración de la torre de enfriamiento

En la tabla 4.14 se muestra que los ciclos de concentración durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, se mantuvieron en un rango de 3,22 como mínimo y 3,76 máximo; lo que representa un 34,33 % y 23,33% de desviación respecto al diseño (4,90).

La cantidad de agua de reposición, calculada por medio de balances de masa, fue comparada con la cantidad de agua de reposición suministrada por los operadores de la planta, y se encontró que esta fue mayor que la obtenida por los balances. Por lo tanto, los iones no llegan a concentrarse en corto tiempo y por ende no es necesario realizar purgas.

Tabla 4.14 Ciclos de concentración de la torre de enfriamiento a las condiciones actuales respecto a su diseño

MES	Ciclos de Concentración del agua de enfriamiento (Adimensional)
Septiembre	3,76
Octubre	3,74
Noviembre	3,22
Diseño	4,90

4.5.3 Parámetros químicos críticos del agua de enfriamiento

La tabla 4.15 presenta los parámetros químicos críticos del sistema de agua de enfriamiento del Mejorador Petromonagas; con los respectivos comentarios que explican la criticidad de los mismos y su efecto sobre el sistema, de acuerdo a su impacto dentro del proceso.

Tabla 4.15 Parámetros químicos críticos del sistema de agua de enfriamiento

Parámetros Químicos	Efecto sobre el sistema
pH	* Es una medida del equilibrio ácido/base presente en el sistema
	* Es el responsable de la mayoría de las reacciones que ocurren en el sistema de agua de enfriamiento
	* Las variaciones de este parámetro indican un desequilibrio entre ácidos
Cloro Residual	* La ausencia de cloro residual en el sistema fomenta la proliferación microbológica

Los parámetros críticos fueron identificados de acuerdo a las variaciones presentadas con respecto a los rangos establecidos para los parámetros químicos del agua de enfriamiento.

La figura 4.8 muestra las variaciones del pH en el agua de enfriamiento a través de cada día de los meses de estudiados (septiembre a noviembre de 2009). Se observa para todos los meses valores de pH por debajo del mínimo establecido (8,0) y por encima del máximo (8,5). En el mes de septiembre el pH se mantuvo por encima del 8,5 y para el mes de octubre alcanzó valores de 7,0. Cabe decir que este valor muy por debajo del mínimo

establecido, se originó por una sobre dosificación del ácido sulfúrico en la piscina de la torre; lo que trajo consigo la realización de purgas en el agua de enfriamiento de la piscina hasta incrementar el pH.

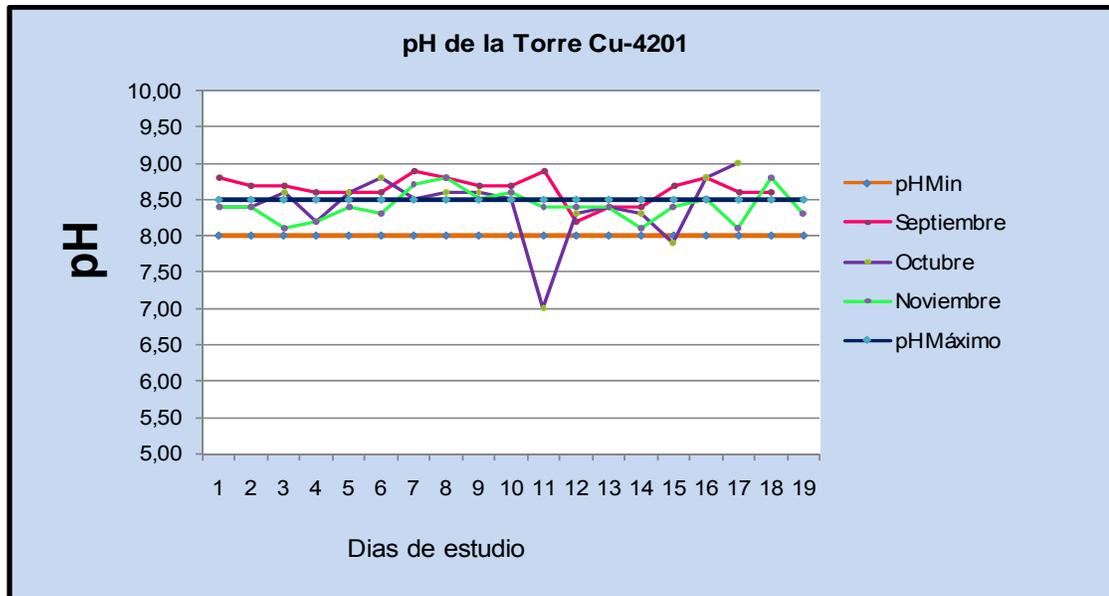


Figura 4.8 Variaciones del pH en el agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual, con respecto a sus parámetros de diseño

Estas variaciones en el pH se originaron por la inyección manual del ácido sulfúrico al agua de enfriamiento de la piscina de la torre. Es por ello que es necesario mejorar la confiabilidad de la inyección de este, pues es el causante de las variaciones del pH, si no se controla su dosificación el agua de enfriamiento pierde su confiabilidad y se tendrá un agua de carácter incrustante o corrosivo, las cuales son perjudiciales para los equipos asociados al sistema de enfriamiento.

La figura 4.9, muestra las variaciones del residual de cloro libre a través del tiempo con respecto al parámetro establecido (0,2 a 0,6 ppm Cl₂), se

observan valores por encima del máximo establecido, los valores medidos fueron mayormente de 0,00 ppm Cl₂ durante gran parte del mes de noviembre. Estas variaciones se originaron por las fallas en el suministro del hipoclorito, ya que el sistema original de inyección del mismo no se encontraba operativo y el utilizado como sustituto ha presentado fallas mecánicas en las bombas y corrosión en las roscas de las mangueras por donde se suministra el hipoclorito. De allí a que hay días donde se ha suspendido la inyección del ácido alcanzando valores de 0,00 ppm Cl₂, o sobre dosificación en las bombas obteniendo valores por encima de 0,6 ppm Cl₂.

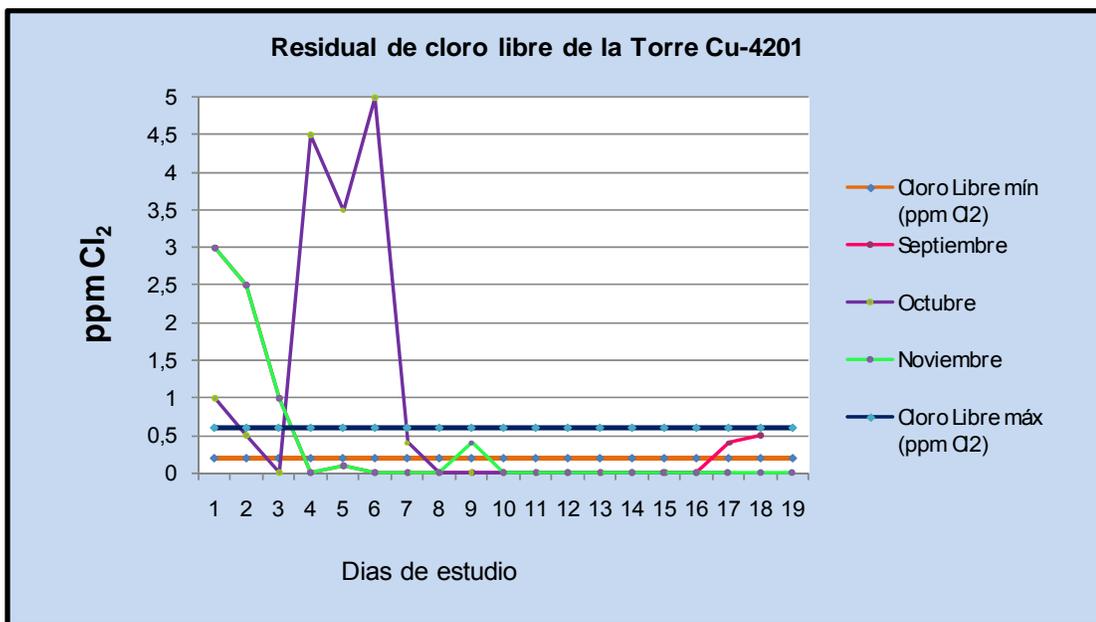


Figura 4.9 Variaciones del cloro libre en el agua de enfriamiento a las condiciones de operación actual, con respecto a sus parámetros de diseño

Estas condiciones originadas por la inyección del ácido sulfúrico y del hipoclorito de sodio en el agua de enfriamiento de la piscina de la torre, han originado que los parámetros críticos del agua de enfriamiento sean el pH y

el cloro residual. Parámetros que hay que monitorear y controlar para mantener la confiabilidad del agua de enfriamiento.

4.6 Conclusiones

1. La caracterización del sistema de agua de enfriamiento a las condiciones de operación durante los meses de estudio, y tomando como referencia los valores de los parámetros de diseño, muestra que las variables operacionales de la Torre de enfriamiento se mantuvieron dentro de los parámetros de diseño.

2. Los balances de masa y energía realizados en la torre de enfriamiento durante el trimestre estudiado indican que las pérdidas de agua no se localizaron en ella.

3. Las condiciones de operación de la torre de enfriamiento permiten la aplicación del concepto de potencial de ahorro de energía; realizando un incremento del rango de operación actual 6,91 °C hasta el diseño 13,89 °C.

4. El flujo másico del aire a la condición de diseño de la torre de enfriamiento es de 3.341.427,39 kg aire seco/h. Durante los meses de estudio se obtuvieron flujos mayores al diseño, 6.587.932,21 kg aire seco/h como mínimo y 7.416.005,41 kg aire seco/h como máximo. Lo que representa un incremento de más del 100 % del flujo másico del aire a las condiciones actuales de operación con respecto a su diseño.

5. La relación líquido / gas en la torre de enfriamiento se mantuvo entre un mínimo de 0,44 y un máximo de 0,52; lo cual se traduce en una desviación de 49,14 % respecto al diseño (0,99). Esta baja relación líquido / gas, se origino por el incremento actual del flujo másico del aire.

6. Si se mantienen las condiciones actuales del aire, se puede incrementar el flujo de agua de recirculación, hasta alcanzar su relación líquido / gas de diseño (0,99).

7. La torre de enfriamiento mantuvo un desempeño adecuado en función del calor retirado a través de ella, y presentó un calor retirado menor que el diseño, debido a un rango de enfriamiento más bajo que el establecido por diseño para retirar 45,74 MMkcal/h.

8. El seguimiento a las líneas de tubería determinó la existencia actual de 85 equipos asociados al sistema de enfriamiento; mientras que los reportados en los manuales de diseño son 31, lo que genera un mayor consumo de agua de enfriamiento que no se cuantificó por no conocerse.

9. El balance de masa global realizado en la torre de enfriamiento evidenció mayor requerimiento de agua de enfriamiento en los procesos (3.321,242 m³/h) que el reportado por diseño (3.271,050 m³/h).

10. El flujo de agua de enfriamiento enviado al proceso desde la torre de enfriamiento fue de 3.321,24 m³/h, de los cuales 3.161,80 m³/h eran retornados, lo que representa una pérdida de agua de 4,80 %. Un menor retorno del agua de enfriamiento afectó directamente los ciclos de concentración.

11. El balance de masa de agua realizado en los límites de batería de las unidades de proceso del Mejorador Petromonagas, permitió localizar y cuantificar las pérdidas de agua de enfriamiento en ellas; quedando distribuidas de la siguiente forma: unidades 10

123,56 m³/h (77,50 %); unidades 20 3,18 m³/h (1,99 %); unidades 30 27,94 m³/h (17,52 %); unidades 40 4,77 m³/h (2,99 %).

12. El intercambiador E-1305 exhibió altas temperaturas a la salida y un calor operacional mayor que el reportado por diseño, transformándolo en un intercambiador crítico.

13. De los intercambiadores de calor que utilizan agua de enfriamiento, a solo dos de ellos (E-1109 y E-1305), se les pudo monitorear las variables necesaria para conocer el calor generado, así como su factor de ensuciamiento de operación actual; lo que limitó el estudio de los equipos que consumen agua de enfriamiento, para determinar cuál de ellos representa un equipo crítico para el sistema.

15. Los parámetros químicos críticos del sistema de agua de enfriamiento resultaron ser el pH y el cloro residual, ya que producen mayor efecto sobre este sistema.

16. El agua de enfriamiento tuvo una tendencia ligeramente incrustante de acuerdo a los índices de Langelier y de Ryznar.

17. No es necesario realizar purgas en el sistema de enfriamiento, debido a los bajos ciclos de concentración resultantes.

4.7 Recomendaciones

1. Aplicar los conceptos de ahorro de energía a la torre de enfriamiento para mejorar el desempeño energético de la misma.

2. Colocar medidor de flujo en el agua de retorno para comprobar que retorna a la torre la cantidad de agua que se envía a proceso.

3. Realizar una evaluación a los ventiladores de la torre de enfriamiento para verificar el alto flujo másico de aire que se reporta actualmente.

4. Actualizar los planos de la unidad de sistema de agua de enfriamiento, de acuerdo a los equipos incorporados.

5. Realizar mediciones de flujo a todos los equipos que conforman el sistema de enfriamiento, para cuantificar las pérdidas de agua en ellos y determinar cuáles son los equipos críticos del sistema.

6. Colocar termopares y medidores de flujo en línea, en los intercambiadores de calor que utilizan agua de enfriamiento; para mantener el monitoreo de las principales variables en los mismos y evitar que sean equipos críticos para el sistema.

7. Automatizar el sistema de inyección de productos químicos ya que la falta de continuidad en la dosificación de los mismos genera variaciones significativas de parámetros de calidad del agua de enfriamiento en el sistema (pH y crecimiento microbiológico).

8. Mejorar la confiabilidad del sistema de inyección de cloro al agua de enfriamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Ameriven: El cuarto mosquetero de la Faja”. (2003). www.veneconomia.com
- [2] Guaramata, M., “Evaluación del funcionamiento de los sistemas de enfriamiento por recirculación de agua en una empresa metalúrgica (ORINOCO IRON)”. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona (2002).
- [3] Vital, Y., “Optimización del proceso productivo de la Planta de Fertilizantes Nitrogenados (FERTINITRO), a partir de la evaluación continua del sistema de agua de enfriamiento”. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona (2003).
- [4] Rondón, R., “Evaluación del control de los parámetros de calidad del agua en los sistemas de generación de vapor y enfriamiento en una industria cervecera”. Tesis de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona (2005).
- [5] Martínez, V., “Evaluación de la Eficiencia del Tratamiento Químico Aplicado a las Torres de Enfriamiento 1,2 y 3 de Servicios Industriales de Refinería Puerto La Cruz”. Tesis de grado. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Anzoátegui (2008).
- [6] LIPESA, “Tratamiento Químico del Agua”, Editorial IMPREGRAF, Caracas, Venezuela (1998).

[7] PETROMONAGAS, “**Sección Técnica del Sistema de Agua de Enfriamiento (Unidad 42)**” . (2001).

[8] McCabe W. y Smith J., “**Operaciones básicas de Ingeniería Química**”, 4° Edición, Editorial McGraw- Hill, México (1991).

[9] NALCO, “**Manual Técnico de Agua de Enfriamiento**” , Sección 1 y 3, Neiperville Illinois (1980).

[10] Snoeyink V. y Jenkis D., “ **Química del Agua**”, Editorial LIMUSA, México (1987).

[11] CEPET, “**Emulsión y Clarificación de Aguas Efluentes**”, (1989).

[12] Coulson J. y Richardson J., “ **Ingeniería Química** ”, Editorial Reverté, Tercera Edición, España (1979).

[13] Prado C., “**Intercambiadores de calor**”. Disponible en: webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/.../tiposintercambiadores.doc. Enero (2009).

[14] Kern D,”**Procesos de Transferencia de calor**”, 1ª edición, Editorial Continental, México (1997).

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO DE LA UNIDAD DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE UNA PLANTA MEJORADORA DE CRUDO EXTRAPESADO
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Cruzmelis Contreras	CVLAC: 16.489.466 E_MAIL: cruzmeliscontreras504@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Evaluación

Mejorador

Petromonagas

Evaporación

Químicos

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En el presente trabajo se realizó una evaluación del sistema de agua de enfriamiento de la unidad de servicios del mejorador de crudo extrapesado Petromonagas, con la finalidad de ubicar y cuantificar las pérdidas de agua de enfriamiento ajenas a la evaporación, purga y arrastre; las cuales ocasionan un incremento en el suministro de agua de reposición y mayor requerimiento de los químicos empleados en el tratamiento del agua de enfriamiento. Para ello se identificaron todas las características del sistema de enfriamiento a las condiciones de diseño y de operación; tomando en consideración los datos de diseño reportados en los manuales de la planta y los valores operacionales recolectados en campo. Se realizaron balances de masa y energía durante el trimestre (septiembre-noviembre), encontrándose que las pérdidas de agua no se localizan en ella y que la torre de enfriamiento mantiene un desempeño adecuado en función del calor retirado a través de esta. El estudio de los intercambiadores determinó que el intercambiador E-1305 presentó un calor operacional actual de 4MMBtu/h siendo su valor de diseño de 3,76 MMBtu/h, lo que representa un incremento de 0,24 MMBtu/h respecto al diseño; este incremento se ve reflejado en las altas temperaturas generadas en él y junto a la tendencia incrustante del agua de enfriamiento; lo transforman en un intercambiador crítico.

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

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU(x)	JU
Petra Martínez	CVLAC:	4.902.046			
	E_MAIL	pmartinez97@hotmail.com			
	E_MAIL				
Hernán Raven.	ROL	CA	AS	TU	JU(x)
	CVLAC:	4.136.007			
	E_MAIL	hraven1@yahoo.com			
	E_MAIL				
Lucas Alvarez	ROL	CA	AS	TU	JU(x)
	CVLAC:	4.077.552			
	E_MAIL	lalvarezm57@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	11	17
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

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

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Sistema de agua de enfriamiento.doc	Aplication/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: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de química

INSTITUCIÓN:

Universidad de oriente, núcleo de Anzoátegui

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

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado: “los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la universidad de oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al consejo universitario, para su autorización”

Cruzmelis Contreras

AUTOR

Petra Martínez

Hernán Raven

Lucas Alvarez

TUTOR

JURADO

JURADO

POR LA SUBCOMISION DE TESIS