

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN UNA REFINERÍA
DE PETRÓLEO**

TESIS

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

**GUILLERMO MENESES BARRERA
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1999



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE UNA REFINERÍA DE PETRÓLEO

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 17 de marzo de 1999.

Guillermo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1º	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL 2º	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
VOCAL 3º	Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana
VOCAL 4º	Br. Oscar Stuardo Chinchilla Guzmán
VOCAL 5º	Br. Mauricio Alberto Grajeda Mariscal
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio Alberto Rivera Palacios
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de julio de 1999

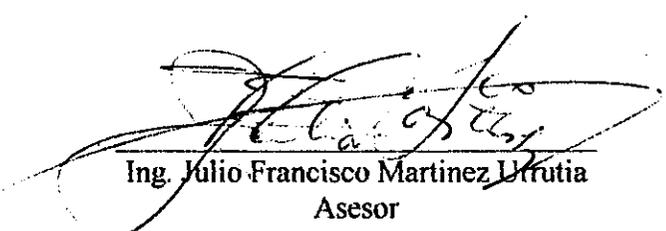
Ing. Otto Raúl de León
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero de León:

Tengo el agrado de informarle que he concluido el asesoramiento y revisión del documento final de trabajo de tesis del estudiante universitario GUILLERMO MENESES BARRERA, titulado: "Evaluación de un sistema de enfriamiento en una refinería de petróleo".

Considero que el presente llena a cabalidad los requisitos de una tesis de grado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,



Ing. Julio Francisco Martínez Urrutia
Asesor



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de Julio de 1999.

Ing. Otto Raúl De León
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala.

Estimado Ingeniero De León:

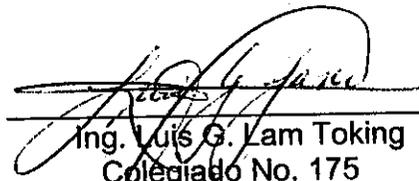
De la manera más atenta me permito saludarlo y desear éxitos en sus labores.

He procedido a revisar el trabajo de tesis del estudiante GUILLERMO MENESES BARRERA titulada "Evaluación de un Sistema de Enfriamiento de una Refinería de Petróleo", por lo que atentamente me permito emitir el siguiente dictámen:

El trabajo de tesis justificó tres aspectos muy importantes, los cuales son: 1) Tener una base técnica sobre el sistema de enfriamiento del agua para la toma de decisiones de la Refinería con el fin de optimizar y reducir costos de operación, 2) Evaluación de los factores que influyen en la corrosión de los intercambiadores de calor, así como, tener mecanismos para evitar esa corrosión y 3) La parte económica que estudió la optimización del costo de operación y control del sistema de enfriamiento.

Por lo anteriormente expuesto y habiendo cumplido con los requisitos ordenados por la Escuela de Ingeniería Química, doy mi aprobación para que el trabajo de tesis del Sr. Meneses Barrera sea publicado y posteriormente sea discutido en su exámen público.

Sin otro particular me suscribo del señor Director de Escuela, con toda consideración.


Ing. Luis G. Lam Toking
Colegiado No. 175
Revisor

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ing. Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante, Guillermo Meneses Barrera, titulado: **EVALUACION DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN UNA REFINERIA DE PETROLEO**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Otto Raúl de León de Paz
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA

Guatemala, octubre de 1,999.

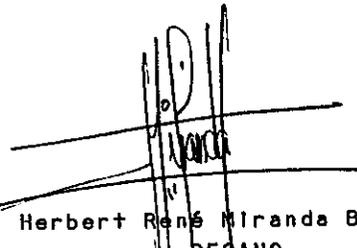
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**

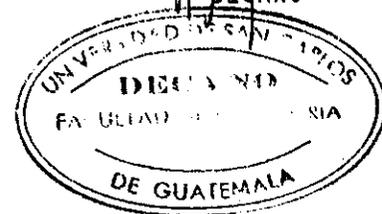


FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de tesis titulado: **EVALUACION DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN UNA REFINERIA DE PETROLEO**, del estudiante , **Guillermo Meneses Barrera**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, octubre de 1,999.

DEDICATORIA

Acto que dedico a:

Mi madre:	Rosa María Barrera Mejía
Mi hermana:	Nancy María Meneses Barrera
Mi abuelo:	José Abel Barrera Azurdia
Mi abuela:	María Teresa de Barrera
Mi novia:	Jessica Alarcón Herrarte

**A la Facultad de Ingeniería
A la Universidad de San Carlos de Guatemala
al pueblo de Guatemala**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
GLOSARIO	IV
RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN	VIII
1. FUNCIONES DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	1
1.1 Agua y enfriamiento de agua	1
1.2 Intercambiadores de calor	2
1.2.1 Intercambiadores de doble tubo	3
1.2.2 Intercambiadores de tubos y coraza	4
1.2.3 Media logarítmica de las diferencias de temperatura para intercambiadores de calor	6
2. CONDICIONES DE DISEÑO	9
2.1 Agua de reposición	9
2.2 Psicrometría	11
2.2.1 Terminología	12
2.2.2 Temperatura de saturación adiabática	14
2.2.3 Medición de la humedad	14
2.2.3.1 Método del punto de rocío	14
2.2.3.2 Método de búlbo húmedo	15
2.2.3.3 Higrómetros mecánicos	16
2.2.3.4 Higrómetros eléctricos	16
2.2.3.5 Método gravimétrico	16
2.3 Determinación de carga de calor	17
2.3.1 Teoría de la torre de enfriamiento	18

2.4 Torres de tiro mecánico	21
2.5 Potencia del ventilador	25
2.6 Potencia de bombeo	28
2.7 Abatimiento de neblina y bruma	29
2.8 Manejo de energía	31
3. AGUA DE ENFRIAMIENTO	34
3.1 Problemas de agua de enfriamiento	34
3.2 Tipos y efectos de las impurezas	35
3.2.1 Incrustación	35
3.2.2 Ensuciamiento	36
3.2.3 Corrosión	36
3.2.4 Ataque microbiológico	39
3.3 Recuperación, purga y unidades de medida	40
3.4 Tratamiento de agua de enfriamiento	41
3.4.1 Control de incrustación	42
3.4.2 Control de ensuciamiento	47
3.4.3 Control de corrosión	50
3.4.4 Pruebas de corrosión en plantas	51
3.4.4.1 Método de resistencia eléctrica	52
3.4.4.2 Método de polarización lineal	53
3.4.5 Crecimiento microbiológico	54
3.4.6 Protección de la madera de la torre de enfriamiento	55
3.4.7 Tratamiento de purga	56
4. PARTE EXPERIMENTAL	57
4.1 Procedimiento	57
4.2 Resultados	60
4.3 Discusión de resultados	61

CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	66
APÉNDICE	68
Muestra de cálculo	68
Datos originales	72
Datos calculados	79
ANEXO	85
Capacidades caloríficas para líquidos	85
Densidades de agua a diferentes temperaturas	86

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	TÍTULO	PÁGINA
1.	Sistema de enfriamiento de recirculación abierta	2
2.	Intercambiador de calor de tubos concéntricos	3
3.	Intercambiador de calor de concha y tubos	5
4.	Gráfica de factor Ft	8
5.	Esquema de torre de enfriamiento	10
6.	Balance calorífico de un proceso de torre de enfriamiento	18
7.	Area mínima para torre de tiro inducido	23
8.	Gráfica caballaje por pie ² de área de torre	24
9.	Curva de rendimiento para una torre de enfriamiento	25
10.	Temperatura de salida del agua en función de la operación de los ventiladores	27
11.	Sistema de abatimiento de neblina para una torre de enfriamiento.	30
12.	Capacidades estimadas para sistemas termociclo y enfriamiento libre.	33
13.	Esquema de corrosión electrolítica en materiales	37
14.	Esquema de corrosión por esfuerzo	38
15.	Suavizador mecánico en proceso en frío	43
16.	Suavizador mecánico en proceso en caliente	44
17.	Rectificador de agua a base de zeolita	46

18. Clarificador mecánico	48
19. Filtro por gravedad	49
20. Filtro a presión	49
21. Sistema de cloración del agua	54
22. Nomograma de capacidades caloríficas para líquidos	85

TABLAS

No.	TÍTULO	PÁGINA
1.	Descripción de pruebas que se llevaron a cabo en la evaluación del sistema de enfriamiento	59
2.	Parámetros que se monitorearon en cada prueba	59
3.	Resultados	60
4.	Temperatura de agua dentro de los intercambiadores de calor en las distintas pruebas	72
5.	Flujos de agua por los intercambiadores de calor	74
6.	Velocidades lineales a través de los intercambiadores de calor	75
7.	Potencia a la que operan las bombas y los ventiladores	76
8.	Costo de aditivos para el agua del sistema de enfriamiento	77
9.	Dosificación mensual de aditivos del agua	78
10.	Deltas de temperatura dentro de los intercambiadores de calor en las distintas pruebas	79
11.	BTU/min removidos de los intercambiadores de calor	80
12.	BTU/min removidos del sistema de enfriamiento	81
13.	BTU/min removidos por potencia aplicada a los ventiladores	82
14.	Costo de operación de bombas y ventiladores	83
15.	Costo de aditivos del agua	84
16.	Densidad del agua líquida a diferentes temperaturas	86

GLOSARIO

- Agua de Arrastre** Gotas de agua que se introducen en la corriente de aire que pasa a través de la torre de enfriamiento y sale por la descarga del ventilador.
- Aire de Salida** Mezcla de aire y vapor que sale de la torre de enfriamiento.
- Barras de rociado** Componentes horizontales del relleno en una torre de enfriamiento, la cual constituye la superficie principal de rociado.
- Boquillas rociadoras** Son usadas en el sistema de distribución de agua para un rociado uniforme sobre el relleno de la torre de enfriamiento.
- Caja de distribución** Usada conjuntamente con la tubería y válvulas en torres de enfriamiento de contraflujo y flujo cruzado, sirve para dispersar uniformemente el agua caliente en todas las direcciones.
- Capacidad** Promedio del aumento del volumen de circulación del agua en el sistema de enfriamiento en cualquier tiempo. Es expresado en términos de galones por minuto.
- Capacidad térmica** Es el número de galones por minuto que una torre de enfriamiento puede manejar en un rango específico a una temperatura de bulbo húmedo.

Carga de agua	El agua que circula en la torre de enfriamiento, indiferentemente de su temperatura, expresado en galones por minuto.
Carga de calor	Es el aumento de calor disipado en una torre de enfriamiento, es medido en KJ, que es igual al peso del agua de circulación por unidad de tiempo multiplicado por el rango de enfriamiento.
Célula o celda	Unidad completa de una torre de enfriamiento consistente en un sistema de distribución, normalmente un juego de equipo mecánico y paredes divididas. Cada célula puede ser diseñada para operar independientemente.
Columna	Parte de la armazón de la torre. Soporte principal vertical de la torre de enfriamiento.
Eliminadores de gota	Obstrucciones que causan que la descarga de aire caliente y gotas de agua cambien de dirección, con lo que se consigue que las gotas de agua caigan dentro de la torre.
Factor de enfriamiento	L/G, relación de kilogramos de agua que circulan por unidad de tiempo, a los kilogramos de aire seco por unidad de tiempo a la cual es enfriada el agua.
Factor de potencia	La relación de la potencia real (watts) con la potencia aparente, es indicada por el producto del amperaje y el voltaje del motor.
Pérdida por evaporación	Agua evaporada por la circulación del agua dentro de la atmósfera por el proceso de enfriado.

Presión de gota	Presión estática o aumento de la resistencia del movimiento del aire a través de la torre causada por las obstrucciones.
Rango	Diferencia numérica entre la temperatura del agua de entrada al sistema de distribución de la torre de enfriamiento y la temperatura del agua fría que sale de la torre de enfriamiento.
Reductor de velocidad	Aparato mecánico que cambia la velocidad del eje del motor eléctrico a la velocidad deseada para el ventilador.
Relleno	Obstrucción instalada dentro de la estructura de la torre que provee una superficie grande para el agua, que ayuda a una mejor transferencia de calor.

RESUMEN

El presente informe final de tesis se divide en dos partes; la primera es la base teórica donde se hallan los principios que fundamentan un sistema de enfriamiento, así como su control y operación. La segunda parte del informe es el trabajo de campo que se realizó en una refinería de petróleo y que como principal objetivo tiene la optimización del costo de operación del sistema de enfriamiento obteniendo un máximo de remoción de calor de dicho sistema.

INTRODUCCIÓN

Diariamente la refinería Texas Petroleum Company, situada en el departamento de Escuintla al sur de la ciudad de Guatemala, utiliza grandes cantidades de agua para enfriar productos en proceso y equipo. Para conservar este recurso escaso y minimizar los costos de enfriamiento, la mayor parte de agua se recircula y se usa nuevamente, utilizando un sistema de recirculación de agua de enfriamiento. Éste está compuesto por dos partes principales: una serie de intercambiadores de calor que transfieren calor de un fluido caliente al agua de enfriamiento y una torre de enfriamiento, la cual enfría el agua de manera que pueda ser usada nuevamente. Ya que el agua se recircula a través de todo el sistema de enfriamiento, debe ser tratada para remover o neutralizar las impurezas que de alguna manera dañarán el equipo del sistema.

El presente informe final de tesis, trata sobre la evaluación de un sistema de enfriamiento en una refinería de petróleo, y es una base para la toma de decisiones futuras de la empresa en lo referente al sistema de enfriamiento de agua con el fin de lograr un aumento en la productividad y eficiencia del proceso. El objetivo principal es la optimización del costo de operación del sistema de enfriamiento en base a una máxima remoción de calor y esto se logrará al instalar una segunda torre de enfriamiento que opere en paralelo con la ya existente.

Los principios fundamentales en que se basa este trabajo son: transferencia de calor, momento y masa, psicrometría, termodinámica, conocimientos prácticos sobre tratamiento de agua y economía.

Se espera que con este trabajo se logre brindar una guía a las personas que deseen adquirir conocimientos de lo anteriormente descrito.

1. FUNCIONES DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

1.1 Agua y enfriamiento de agua.

Una torre de enfriamiento es básicamente un intercambiador de calor, transfiriendo calor del agua a la atmósfera por circulación de aire.

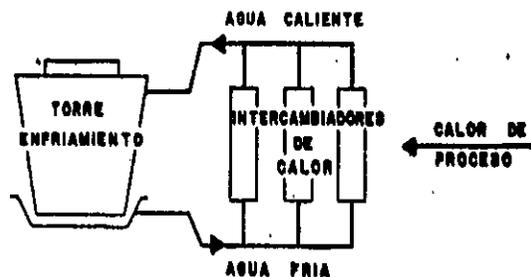
El agua se utiliza en la industria, en formas diferentes, por su bajo costo, su gran abastecimiento y sus propiedades térmicas únicas. De toda el agua utilizada, la mayor parte se usa como refrigerante para absorber energía calorífica.

El agua trabaja como refrigerante, mientras la temperatura sea menor que la de la sustancia que se está enfriando, para mantener un enfriamiento máximo, el agua caliente debe reemplazarse por agua fría.

Existen dos formas de suministrar agua de enfriamiento adicional, el agua caliente puede ser descargada y reemplazada por agua fría, o bien el agua caliente puede enfriarse y utilizarse nuevamente para un enfriamiento posterior. Debido a que la primera de estas dos posibilidades de suministrar agua de enfriamiento resultaría demasiado costosa, y la cantidad de agua que se necesita cada día es tan grande que muchos abastecimientos no serán capaces de proveer la suficiente cantidad de agua, se puede concluir que la mejor forma de tratar con el agua caliente es enfriarla y utilizarla nuevamente. Existen dos tipos de sistemas de recirculación del agua de enfriamiento, sistema abierto y sistema cerrado.

En un sistema de recirculación cerrado se evita que las impurezas en el aire entren en contacto con el agua previniendo las pérdidas de agua por evaporación. En el sistema de recirculación de agua de enfriamiento abierto se expone el agua caliente al aire, evaporando parte del agua en el aire, siendo el segundo sistema el más utilizado en la industria en general. Las dos partes importantes de un sistema de recirculación abierta son el conjunto de intercambiadores de calor y la torre de enfriamiento.

FIGURA 1. Sistema de enfriamiento de recirculación abierta simple



El agua en el intercambiador de calor absorbe el calor del proceso y el agua caliente que sale se enfría posteriormente en la torre de enfriamiento.

1.2 Intercambiadores de calor.

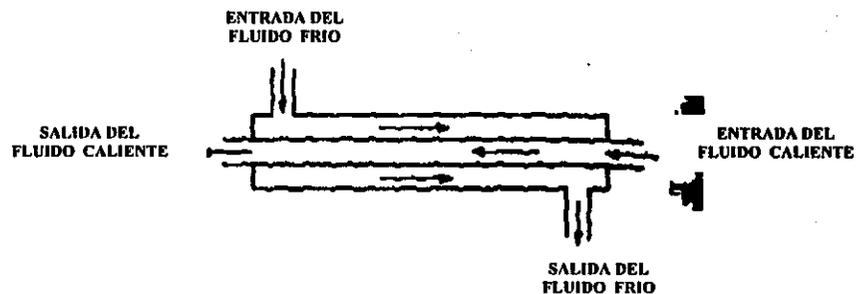
En las industrias de proceso, la transferencia de calor entre dos fluidos casi siempre se lleva a cabo en intercambiadores de calor. El tipo más común es uno en el cual el fluido caliente y el frío no entran en contacto directo el uno con el otro, sino que están separados por una pared de tubos o una superficie plana o curvada. La transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la pared o la

superficie de los tubos, a través de la pared de los tubos o placa por conducción, y luego por convección al fluido frío.

1.2.1 Intercambiador de calor de doble tubo.

El intercambiador más simple es el intercambiador de doble tubo o tubos concéntricos. En este intercambiador uno de los fluidos fluye en el interior de una tubería y el otro lo hace por el espacio anular entre ambas tuberías. Los fluidos pueden circular en paralelo o a contracorriente. El intercambiador puede fabricarse con un simple par de tubos adaptando las conexiones en los extremos o con varios pares interconectados en serie. Este tipo de intercambiador es útil, principalmente para velocidades de flujo bajas.

FIGURA 2. Intercambiador de tubos concéntricos



1.2.2 Intercambiadores de tubos y coraza.

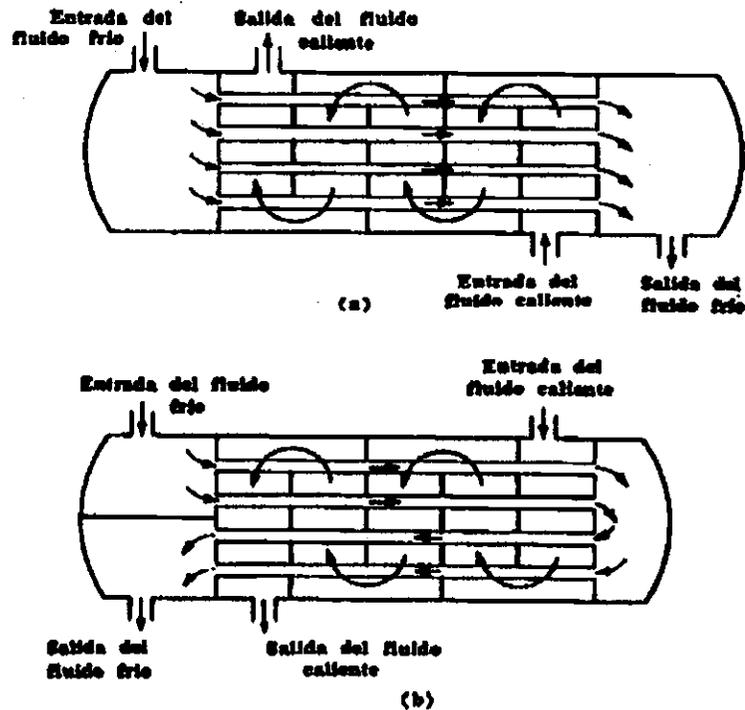
Cuando se manejan flujos más grandes se usa un intercambiador de tubos y coraza, que es el tipo más importante en las industrias de proceso. Los flujos de estos intercambiadores son continuos.

Se usan muchos tubos en paralelo con uno de los fluidos circulando en su interior. Los tubos, distribuidos en forma de manojo, están encerrados en una sola coraza y el otro fluido fluye por el exterior de los tubos, dentro de la coraza.

En un intercambiador de tubos y coraza 1-1 a contracorriente el fluido frío entra y circula por los tubos en paralelo en una sola pasada, mientras el fluido caliente entra por el otro extremo y fluye a contracorriente por la parte exterior de los tubos. Se usan deflectores de tal manera que el fluido se vea forzado a fluir perpendicularmente por la batería de tubos en lugar de hacerlo en paralelo. Esta turbulencia adicional, generada por el flujo cruzado, aumenta el coeficiente de transferencia de calor de la coraza.

FIGURA 3. (a) Intercambiador de tubos y coraza 1-1 contracorriente

(b) Intercambiador de tubos y coraza 1-2 paralelo / contracorriente



El fluido en los tubos circula dos veces (tal como se indica) y el otro fluido circula por la coraza una sola vez. En la primera pasada por los tubos, el fluido frío circula a contracorriente del fluido caliente de la coraza y en la segunda pasada por los tubos fluye en paralelo con el fluido caliente. Otro tipo de intercambiador opera con dos pasadas por la coraza y cuatro pasadas por el tubo. Algunas veces se manejan otras combinaciones, siendo los tipos 1-2 y 2-4 los más comunes. Otro modelo consiste en un intercambiador de flujo cruzado con una pasada por el tubo y el fluido de la coraza circulando a ángulos rectos con los tubos.

Existen muchos aspectos que se consideran para el buen funcionamiento de los intercambiadores de calor, estos son: esfuerzos mecánicos y dilataciones térmicas en las tuberías, problemas de corrosión, depósito de sólidos en las líneas de flujo y caídas de presión.

1.2.3 Media logarítmica de las diferencias de temperatura para intercambiadores de calor.

Cuando los fluidos caliente y frío de un intercambiador de calor circulan con un flujo a contracorriente verdadero o con flujo paralelo, debe usarse la media logarítmica de las diferencias de temperaturas,

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)}$$

donde ΔT_2 es la diferencia de temperaturas en un extremo del intercambiador y ΔT_1 en el otro extremo. Esta expresión de ΔT_{lm} es válida para un intercambiador de calor de tubo doble, así como para un intercambiador 1-1 de una pasada por la coraza y una pasada por los tubos, con flujo a contracorriente o en paralelo.

Cuando se trata de un intercambiador de calor de pasadas múltiples, es necesario obtener otra igualdad para la media de las diferencias de temperaturas, que depende de la configuración de la coraza, de los tubos y del número de pasadas. Considerando primero una pasada por la coraza y dos por los tubos, como corresponde a la figura 3b, el fluido frío en la primera pasada está a contracorriente con el fluido caliente. En la segunda pasada, el fluido frío está en paralelo con el fluido caliente. Por tanto, la media

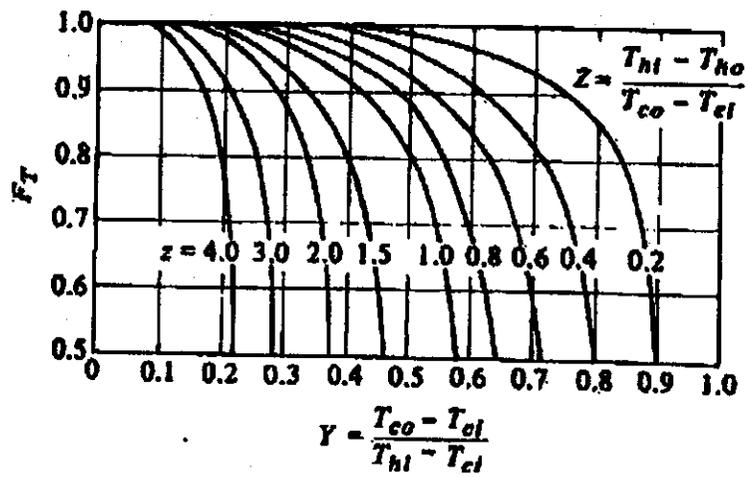
logarítmica de las diferencias de temperaturas, que es aplicable a flujo en paralelo o en contracorriente pero no a una mezcla de ambos como en el intercambiador 1-2, no puede usarse para calcular la caída real de temperatura sin incluir correcciones. Este factor de corrección F_t se define de tal manera que, al multiplicarlo por el valor de ΔT_{lm} , el resultado es la caída de temperaturas correcta, ΔT_M . El factor F_t ha sido calculado para distintos arreglos de intercambiadores. A continuación se muestra el factor F_t para intercambiadores 1-2 que corresponde a la gráfica de la figura 4. Las relaciones adimensionales son las siguientes:

$$Z = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}}$$

$$Y = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

donde T_{hi} = temperatura de entrada del fluido caliente en Kelvin, T_{ho} = temperatura de salida del fluido caliente, T_{ci} = temperatura de entrada del fluido frío, y T_{co} = temperatura de salida del fluido frío.

FIGURA 4. Factor Ft para intercambiadores 1-2



No se recomienda un intercambiador de calor en condiciones para las que $F_T < 0.75$. En dicho caso conviene usar otro tipo de coraza y tubos.

2. CONDICIONES DE DISEÑO

2.1 Agua de reposición

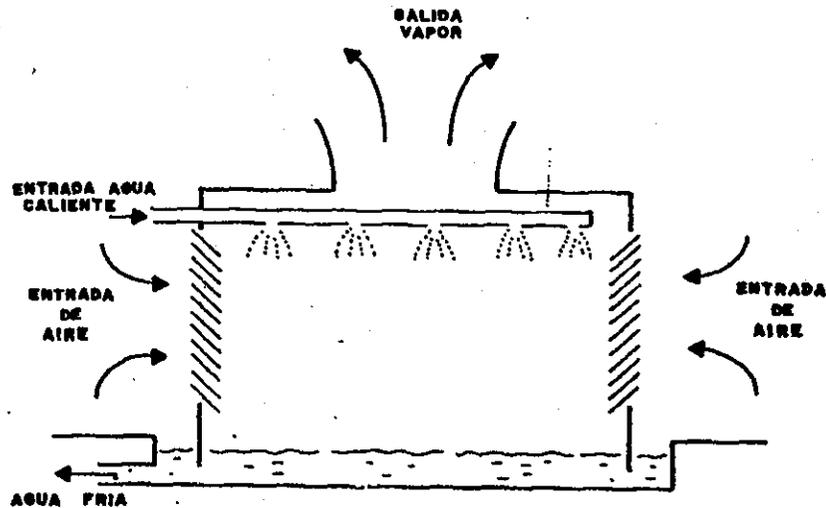
Una torre de enfriamiento disminuye la temperatura del agua que posee energía calorífica exponiéndola al aire. La reducción en la temperatura es el resultado de dos procesos, transferencia de calor sensible y transferencia de calor latente.

El calor sensible es el que causa un cambio en la temperatura de la sustancia, el calor sensible puede sentirse y medirse. En una torre de enfriamiento, el calor sensible se transfiere del agua caliente al aire de enfriamiento.

Una torre de enfriamiento está diseñada para enfriar agua poniéndola en contacto con el aire causando con esto que se evapore. Si se agrega energía a una sustancia líquida la temperatura aumenta provocando que el líquido se transforme en vapor o estado gaseoso. La temperatura permanecerá constante durante la vaporización y la energía agregada, a fin de efectuar el cambio de estado, es llamado calor de vaporización o calor latente.

A cualquier temperatura por debajo del punto de ebullición, algunas moléculas de agua se moverán lo suficientemente rápido para desligarse del agua y mezclarse con el aire como vapor.

FIGURA 5. Esquema general de una torre de enfriamiento



Durante la evaporación, el agua pierde energía a medida que las moléculas se escapan como vapor. Éstas llevan su energía calorífica con ellas, por lo tanto la evaporación causa que la temperatura del líquido remanente disminuya, esto constituye el proceso de enfriamiento evaporativo.

En una torre de enfriamiento, el área de mayor temperatura es el agua caliente y el área de temperatura más baja es el aire frío. A medida que el agua caliente escurre hacia abajo de la torre, el calor sensible se transfiere del agua al aire frío que está subiendo, por lo tanto la temperatura del agua disminuye y la del aire aumenta. A medida que el cuerpo principal del agua se enfría, el calor liberado se usa para evaporar una porción del agua remanente.

Del 80 al 90% del enfriamiento es causado por evaporación, mientras que sólo del 10 al 20% es el resultado de la transferencia de calor sensible al aire.

En cualquier momento que el agua se enfríe por evaporación, siempre hay alguna pérdida de agua involucrada. Como la mayor parte de enfriamiento en una torre es por evaporación, esto causa una pérdida en el agua de recirculación. Por cada 10 °F de diferencia en temperatura, entre el agua caliente que entra y el agua fría que sale, la torre perderá alrededor de 1% de su agua de circulación debido a la evaporación. Este porcentaje de agua será arrastrado o llevado junto con el aire caliente, cargado de vapor, que sale de la torre.

Brisa y purga no intencional son los nombres que se le da a las pequeñas gotas de agua que se arrastran en la descarga de vapor de la torre, y al agua que se remueve deliberadamente del sistema se le llama purga intencional.

Para que una torre de enfriamiento funcione eficientemente, un volumen constante de agua debe fluir a través de la torre, el agua de reposición se debe agregar para reemplazar la pérdida de agua debida a evaporación y fugas.

Para efectuar un mayor enfriamiento de agua en la torre de enfriamiento, se desea una razón de evaporación alta, cualquier condición que previene o interfiere con la evaporación, reducirá la habilidad de la torre para enfriar agua.

A medida que el aire se mueve, a través de una torre de enfriamiento, absorbe calor y vapor de agua y luego se descarga en la torre. Cualquier reducción en el flujo de aire, a través de una torre de enfriamiento, es probable que reduzca la evaporación.

2.2 Psicrometría.

La psicrometría se ocupa de la determinación de las propiedades de las mezclas de un gas y un vapor. El sistema aire-vapor de agua es, por mucho, el que se encuentra con mayor frecuencia.

Los principios comprendidos en la determinación de las propiedades de otros sistemas son los mismos que rigen el de aire- vapor de agua, con una excepción primordial. Mientras que la razón psicrométrica (la razón del coeficiente de transferencia de calor al producto del coeficiente de la transferencia de masa y calor húmedo) en el caso del sistema aire-vapor de agua, tiene un valor asignado de 1, la razón de otros sistemas generalmente no es equivalente a 1. Esto hace que la temperatura de saturación adiabática sea distinta de la temperatura de bulbo húmedo. Para sistemas que no sean los de aire-vapor de agua, el cálculo de problemas psicrométricos se complica por la necesidad de efectuar un cálculo detallado de la temperatura de la superficie de evaporación. Por ejemplo, en el sistema aire-agua, la temperatura de la superficie de evaporación será constante durante el periodo de enfriamiento a velocidad constante, aunque la temperatura y la humedad de la corriente de gas varíe. En el caso de otros sistemas, la temperatura de la superficie de evaporación tendrá alteraciones.

2.2.1 Terminología

La terminología y las relaciones asociadas con la psicrometría son:

- **Humedad absoluta H**, es igual a las libras de vapor de agua transportadas por una libra de aire seco. Si se presupone un comportamiento de gas ideal:

$$H = \frac{M_w * p}{M_a *(P-p)}$$

en donde M_w = peso molecular del agua, M_a = peso molecular del aire, p = presión parcial del vapor de agua en atmósferas, y P = presión total en atmósferas.

Cuando la presión parcial p del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual que la presión de vapor de agua p_s , a la misma temperatura, el aire está saturado y la humedad absoluta se designa como la **humedad de saturación H_s** .

- **Porcentaje de humedad absoluta**, (porcentaje de saturación) se define como la razón de la humedad absoluta a la de saturación y está dado por:

$$100 * \frac{H}{H_s} = \frac{100 * p (P - p_s)}{p_s (P - p)}$$

- **Porcentaje de humedad relativa**, se define como la presión parcial del vapor de agua en aire, dividida entre la presión del vapor de agua a la temperatura dada. Por lo tanto,

$$RH = 100 * \frac{p}{p_s}$$

- **Punto de rocío o temperatura de saturación** es la temperatura a la que la mezcla dada de vapor de agua y aire se satura, es decir, la temperatura a la que el agua ejerce una presión de vapor igual a la presión parcial del vapor de agua en la mezcla dada.

- **Calor húmedo Cs**, es la capacidad calorífica de 1 libra de aire seco y la humedad que contiene. Para la mayor parte de los cálculos de ingeniería,

$$C_s = 0.24 + 0.45 * H$$

en donde 0.24 y 0.45 son las capacidades caloríficas del aire seco y el vapor de agua, respectivamente, y se supone que ambas son constantes.

- **Volumen húmedo** es el volumen en pies cúbicos de 1 libra de aire seco y el vapor de agua que contiene.

- **Volumen saturado** es el volumen húmedo cuando el aire está saturado.

- **Temperatura de bulbo húmedo** es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor, por convección a la misma, es igual que la velocidad de transferencia de masa que se

aleja de tal superficie. Estando en equilibrio y suponiendo un cambio despreciable en la temperatura de bulbo seco, el balance de calor en la superficie es:

$$k_g \cdot \lambda (p_s - p) = h_c \cdot (t - t_w)$$

en donde k_g = coeficiente de transferencia de masa, λ = calor latente de evaporación, p_s = presión del vapor del agua a la temperatura del bulbo húmedo, p = presión parcial del vapor de agua en el ambiente, h_c = coeficiente de transferencia de calor, t = temperatura de la mezcla de aire-vapor de agua (temperatura de bulbo seco), t_w = temperatura de bulbo húmedo.

2.2.2 Temperatura de saturación adiabática o líneas de entalpía constante

Si una corriente de aire se mezcla perfectamente con una cantidad de agua a la temperatura t_s en un sistema adiabático, la temperatura del aire descenderá y su humedad aumentará. Si t_s es tal que el aire que sale del sistema está en equilibrio con el agua, t_s es la temperatura de saturación adiabática y la línea que relaciona la temperatura con la humedad del aire es la llamada línea de saturación adiabática. La ecuación de dicha línea es la siguiente:

$$H_s - H = (C_s/\lambda) (t - t_s)$$

2.2.3 Medición de la humedad

2.2.3.1 Método del punto de rocío.

El punto de rocío del aire húmedo se mide en forma directa observando la temperatura a la que la humedad comienza a formarse en una superficie pulida y enfriada artificialmente. La superficie pulida se enfría por la evaporación de un disolvente con un punto de ebullición bajo, como el éter. La evaporación de un gas permanentemente condensado, como el dióxido de carbono o el aire líquido, o mediante una corriente de agua de temperatura regulada.

Aunque el método del punto de rocío se considera una técnica fundamental para determinar la humedad, existen varias incertidumbres inherentes a su uso. No siempre es posible medir con precisión la temperatura de la superficie pulida o eliminar los gradientes registrados en la misma. También es problemático detectar la aparición o desaparición de niebla; la práctica usual consiste en tomar el punto de rocío como el promedio de las temperaturas a las que aparece la primera niebla durante el enfriamiento, y el de las temperaturas a las que desaparece durante el calentamiento.

2.2.3.2 Método del bulbo húmedo.

Es probable que el método más utilizado para determinar la humedad de una corriente de gas sea la medición de las temperaturas del bulbo húmedo y seco. La primera se mide a través del contacto del aire con un termómetro cuyo bulbo o ampolla está cubierto por una mecha saturada de agua. Si el proceso es adiabático, el bulbo del termómetro alcanza la temperatura del bulbo húmedo o mojado. Cuando se conocen las temperaturas de bulbo húmedo y seco, la humedad se obtiene sin mayores problemas en las cartas psicrométricas. Para recabar datos seguros, se debe tener cuidado para tener la seguridad de que el termómetro del bulbo húmedo se mantenga mojado y la radiación se reduzca al mínimo. Lo último se logra si la velocidad relativa entre la mecha y la corriente de gas es alta (por lo común, una velocidad de 4.6 m/s es adecuada para los termómetros más usuales), o empleando una protección para la radiación. Asegurarse que la mecha se mantenga mojada es un problema de índole mecánico y el procedimiento utilizado depende del tipo de ensamble. Una vez más, como sucede con el método del punto de rocío, los errores asociados con la medición de la temperatura llegan a crear dificultades.

Para medir humedades atmosféricas, uno de los medios más ampliamente utilizados es el **psicrómetro giratorio**. Este se compone de un termómetro de bulbo húmedo y seco montado en una eslinga que se hace girar manualmente para darle la

velocidad deseada al gas que atraviesa por el bulbo. En el **psicrómetro Assmann**, el aire se hace pasar por los bulbos mediante un ventilador de motor.

Además del termómetro de mercurio, se pueden utilizar otros elementos sensores de temperatura para psicrómetros. Estos incluyen termómetros de resistencia, termopares, termómetro bimetálico y termorresistencias.

2.2.3.3 Higrómetros mecánicos.

Los materiales como cabellos humanos, fibras de madera y plásticos se han utilizado para medir la humedad. Estos métodos se basan en un cambio de dimensión en función de la humedad.

2.2.3.4 Higrómetros eléctricos.

Estos miden la resistencia eléctrica de una capa de materiales que absorben la humedad, expuestos al gas. Se ha empleado gran variedad de elementos sensores.

2.2.3.5 Método gravimétrico.

Está reconocido como la técnica más exacta para determinar los grados de humedad. Se hace pasar una cantidad conocida de gas sobre un compuesto químico que absorbe la humedad, por ejemplo pentaóxido de fósforo, y luego se determina el aumento de peso.

2.3 Determinación de la carga de calor

La determinación exacta del calor disipado en una torre de enfriamiento es importante. Esto no solamente afecta al tamaño de la torre, sino también al sistema. La determinación de una carga de calor inadecuada lleva problemas de costo.

La imposición de una carga de calor sobre una torre de enfriamiento es determinada por el servicio que existe. El rango de enfriamiento requerido es controlado en la operación de acuerdo al nivel de temperatura deseado en el proceso. En muchos casos, una operación baja de temperatura es deseable para incrementar la eficiencia en el proceso, mejorar la calidad o cantidad en el producto. Una baja temperatura del agua de enfriamiento, es necesaria en una refinería de petróleo para condensar los vapores volátiles que de otro modo se supone es perdido. En otras aplicaciones, altas temperaturas de operación son deseables en algunas categorías de motores de combustión interna. En todos los casos la determinación de la carga de calor es de primordial importancia.

El tamaño de la torre de enfriamiento, el costo y la relación del equipo de enfriamiento son proporcionales a la carga de calor. Si el cálculo de la carga de calor es bajo, el equipo a diseñar será pequeño. Si el cálculo de carga de calor es grande se obtiene equipo más grande con un aumento del costo.

La carga de calor en el proceso puede variar considerablemente y esto afecta el proceso involucrado. La determinación exacta de la carga de calor del proceso puede llegar a ser complejo, pero consideraciones convenientes pueden producir resultados satisfactorios.

2.3.1 Teoría de la torre de enfriamiento.

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ha merecido una aceptación más generalizada es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora.

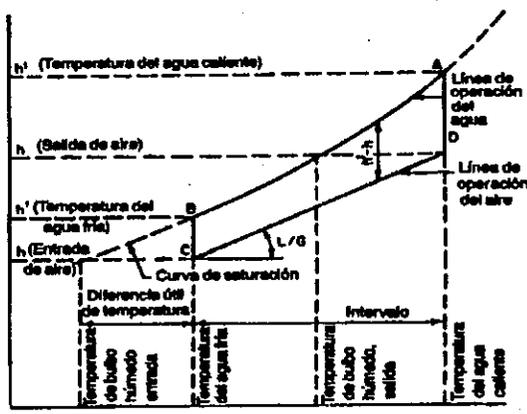
Cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento. La ecuación de Merkel se expresa en forma integrada de la manera siguiente:

$$K \cdot a \cdot V / L = \int dT / (h' - h)$$

en donde K = coeficiente de transferencia de masa en lb de agua / (h * pie²); a = área de contacto en pie²/pie³ de volumen de torre; V = volumen de enfriamiento activo en pie³/pie² de área plana; L = velocidad del agua en lb/(h*pie²); h' = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua en Btu/lb; h = entalpía de la corriente de aire en Btu/lb; T1 y T2 = temperaturas del agua en la entrada y en la salida en F. El lado derecho de la ecuación de Merkel se expresa por completo en términos de las propiedades del aire y el agua y es independiente de las dimensiones de la torre.

En la figura 6 se ilustran las relaciones del agua, aire y del potencial impulsor que existe en una torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al del flujo del agua. La comprensión de este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de la torre de enfriamiento.

FIGURA 6. Balance calorífico de un proceso de torre de enfriamiento



La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y en la salida. La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial $(h' - h)$. Para enfriar el agua 1 F, la entalpía por libra de aire aumenta 1 BTU multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La relación líquido /gas, L/G , es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama, como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

Las coordenadas se refieren a la temperatura y la entalpía de cualquier punto en la línea de operación del agua. En la línea de operación del aire, la referencia se hace tan sólo a la entalpía de un punto. La temperatura de bulbo húmedo correspondiente a cualquier punto de CD se encuentra proyectando dicho punto en sentido horizontal a la curva de saturación y luego en sentido vertical a la coordenada de temperaturas. La

ecuación de Merkel se representa por medio del área ABCD de este diagrama, y dicho valor se conoce como la **característica de la torre**, que varía con la razón L/G.

Un incremento en la temperatura de bulbo húmedo de entrada mueve el origen C en sentido ascendente y la línea CD se desplaza a la derecha para mantener un valor constante de KaV/L . Si la gama de enfriamiento aumenta, la línea CD se alarga. A una temperatura de bulbo húmedo constante, el equilibrio se establece recorriendo la línea a la derecha a fin de mantener constante el valor de KaV/L . Por otro lado, cualquier cambio en la razón L/G hace que varíe la pendiente de CD, y la torre alcanza el equilibrio con un nuevo valor de KaV/L .

Para predecir el rendimiento de la torre, es necesario conocer las características de torre requeridas para condiciones específicas tanto del ambiente como del agua.

Las características de torre KaV/L se determinan mediante una integración. El método de Chebyshev, para evaluar numéricamente la integral, es el que se emplea con mayor frecuencia y, según éste,

$$KaV/L = \int dT/(h_w - h_a) \approx \frac{(T_1 - T_2)}{4} * (1/\Delta h_1 + 1/\Delta h_2 + 1/\Delta h_3 + 1/\Delta h_4)$$

en donde h_w = entalpía de la mezcla de aire - vapor de agua a la temperatura masiva del agua en Btu/lb de aire seco; h_a = entalpía de la mezcla de aire - vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo en Btu/lb de aire seco.

$$\Delta h_1 = \text{valor de } (h_w - h_a) \text{ a } T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_2 = \text{valor de } (h_w - h_a) \text{ a } T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_3 = \text{valor de } (h_w - h_a) \text{ a } T_1 - 0.4(T_1 - T_2)$$

$$\Delta h_4 = \text{valor de } (h_w - h_a) \text{ a } T_1 - 0.1(T_1 - T_2)$$

2.4 Torres de tiro mecánico

En la actualidad se emplean dos tipos de torres de tiro mecánico; el de tiro forzado y el de tiro inducido. En la **torre de tiro forzado**, el ventilador se monta en la base y se hace entrar aire en ésta y se descarga con baja velocidad en 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. Puesto que 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 de salida, la torre de tiro forzado está sujeta a una recirculación excesiva de los vapores húmedos de salida que retornan a la entrada de aire. Puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es mucho mayor que la del aire circundante, existe una reducción en el buen desempeño, lo cual se evidencia mediante un incremento en la temperatura de agua fría saliente.

La **torre de tiro inducido** es la que se emplea con mayor frecuencia en la industria. Se subdivide en diseños de contraflujo o flujo transversal, dependiendo de las direcciones relativas del flujo del agua y del aire. Desde el punto de vista termodinámico, la **configuración a contraflujo** es más eficaz, ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniendo así un potencial máximo de entalpía. Cuanto mayores sean los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidente serán las desventajas del tipo de contraflujo. Por ejemplo, con una razón L/G de 1, una temperatura ambiente de bulbo húmedo de 25.5 C y una temperatura de agua de entrada de 35 C la torre de contraflujo requiere una característica KaV/L de 1.75 para una diferencia útil de temperaturas de 2.8 C, mientras que la torre de flujo transversal precisa una característica de 2.25 para lograr la misma diferencia útil de temperatura. No obstante, si el acercamiento se aumenta a 3.9 C, los dos tipos de torre tienen más o menos el mismo valor requerido de KaV/L (menor que el 1%).

El fabricante de **torres de flujo transversal** puede reducir con eficacia la característica de torre a acercamientos muy bajos incrementando la cantidad de aire para proporcionar una razón L/G más baja. El aumento del flujo de aire no se logra necesariamente incrementando la velocidad del mismo, sobre todo, alargando la torre para aumentar el área de corte transversal para el flujo de aire. El llenado para flujos transversales se hace progresivamente más largo en la dirección perpendicular al flujo del aire y más corto en dirección de éste, hasta que casi pierde su desventaja inherente de la diferencia de potencia. Al lograr esto se incrementa el consumo del potencial del ventilador.

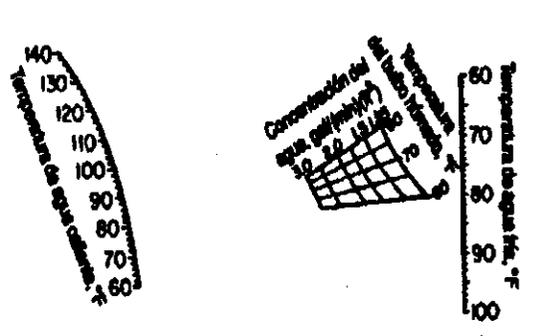
Por último, la elección económica entre el sistema a contraflujo y el sistema transversal se determina según la eficiencia de relleno, las condiciones de diseño y los costos de construcción de la torre.

El resultado del funcionamiento de un tipo específico de torre de enfriamiento está dictaminado por la razón de los pesos de aire y agua y el tiempo de contacto entre uno y otro. En la práctica comercial, la variación en la razón de aire a agua se obtiene primeramente manteniendo constante la velocidad del aire a 350 pies/(min*pie² de área activa de la torre) y haciendo variar la concentración de agua, gal/(min*pie² de área de torre). Como operación secundaria, la velocidad del aire se altera para que la torre se adapte al requisito de enfriamiento.

El **tiempo de contacto** entre el agua y el aire se dictamina en mayor grado por el tiempo necesario para que el agua se descargue por las boquillas y caiga a través de la torre hasta el depósito. En consecuencia, el tiempo de contacto se obtiene en un tipo determinado de unidad haciendo variar la altura de la torre. Si el tiempo de contacto es insuficiente, ningún incremento en la relación de aire - agua generará el enfriamiento deseado. Es necesario mantener cierta altura mínima en las torres de enfriamiento. Cuando se requiere un acercamiento de temperaturas de bulbo húmedo entre 8 y 11 °C y

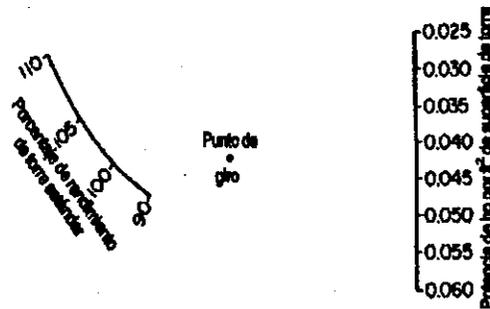
un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C, bastará con una torre relativamente baja. Dicho de otra manera, una torre en que el agua se desplaza de 4.6 a 6.1 m desde el sistema de distribución hasta el depósito será suficiente. Cuando se necesita un acercamiento moderado de temperaturas y un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C una torre en que el agua recorre de 7.6 a 9.1 metros es adecuada. Cuando se tiene una diferencia útil de temperaturas más crítica, de 4.4 °C, con un intervalo de enfriamiento de 13.9 a 19.4 °C, se necesitará una torre en que el agua recorra de 10.7 a 12.2 metros. En general, no resulta económico diseñar una torre con una diferencia útil de temperaturas menor que 2.8 °C, pero esto se logra con éxito si se cuenta con una torre en que el agua se desplace de 10.7 a 12.2 metros.

FIGURA 7. Relación entre el agua caliente, el agua fría, y las temperaturas de bulbo húmedo en función de la concentración del agua



Con la información de la figura 7 se obtiene el área mínima necesaria para un funcionamiento de tiro inducido y a contraflujo bien diseñado.

FIGURA 8. Caballaje por pie² de área de torre que se requiere para un funcionamiento en particular

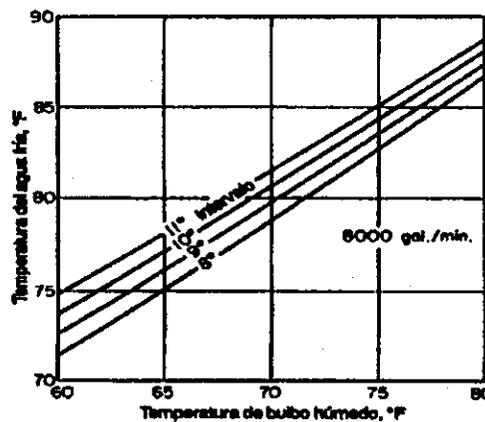


Estas curvas no se aplican al enfriamiento de flujos paralelos o transversales, ya que tales procesos no son tan eficientes como el contraflujo. Asimismo, no se aplican en los casos en que la diferencia útil de temperaturas a la temperatura del agua fría es menor que 2.8 °C. Estas cartas se deben considerar como aproximaciones y no solo como estimaciones preliminares. Puesto que en los cálculos se deben incluir muchos factores que no aparecen en las gráficas, conviene consultar con el fabricante las recomendaciones finales de diseño.

El funcionamiento de enfriamiento de cualquier torre que tiene una profundidad dada varía con la **concentración del agua**. Se ha encontrado que el máximo contacto y el mejor rendimiento se obtiene con torres que poseen una concentración de agua de 2 a 5 gal/(min*pie² de área de suelo). El problema de calcular el tamaño de una torre de enfriamiento consiste en determinar la concentración apropiada de agua que se necesita para alcanzar los resultados deseados. Después de determinar la concentración de agua necesaria, el área de torre se calcula dividiendo los gal/min que circulan entre la concentración del agua expresada en gal/(min*pie²). El tamaño de torre necesario es una función de lo siguiente:

1. Intervalo de enfriamiento (temperatura del agua caliente menos temperatura del agua fría).
2. Diferencia útil de temperaturas a la temperatura de bulbo húmedo (temperatura del agua fría menos temperatura de bulbo húmedo).
3. Cantidad de agua que se va a enfriar.
4. Temperatura de bulbo húmedo.
5. Velocidad del aire a través de la celda.
6. Altura de la torre.

FIGURA 9. Curva de rendimiento de una torre de enfriamiento



Fuente: Manual del ingeniero químico, 6ta. Ed.

La curva de rendimiento corrobora la variación en el rendimiento en función de los cambios de temperatura tanto de búlbo húmedo como de agua caliente, mientras que la cantidad de agua se mantiene constante.

2.5 Potencia del ventilador.

Cuando se lleva a cabo un análisis del costo de una torre de enfriamiento y los costos de operación de la misma, uno de los factores más significativos debe ser el

establecimiento de la potencia del ventilador. A través de las torres de enfriamiento circulan grandes cantidades de aire, con velocidades en la salida de hasta 10.2 m/s como máximo para torres de tiro inducido. Las cantidades de flujo de aire en los ventiladores dependen de los factores de diseño del ventilador, entre las que se incluye cuestiones tales como el tipo de relleno, la configuración de la torre y las condiciones de comportamiento térmico.

La salida eficaz del ventilador es la potencia del aire estático (SAHP), establecida de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\text{SAHP} = \frac{Q(h_s)(d)}{33000(12)}$$

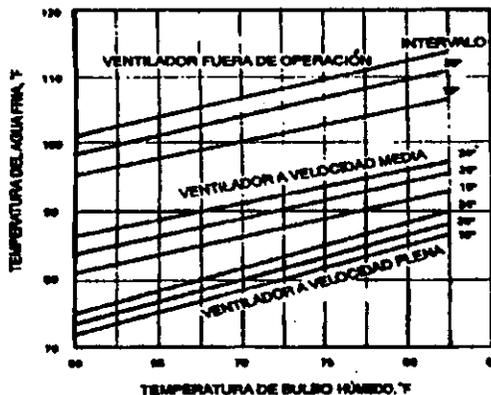
donde Q = volumen de aire, en pie³/min; h_s = carga estática, en pulg. de agua; y d = densidad del agua a temperatura ambiente, lb/pie³.

La potencia del ventilador de la torre de enfriamiento puede sufrir una reducción sustancial a causa de un decrecimiento en la temperatura del bulbo húmedo del ambiente, cuando se emplean motores de doble velocidad en los ventiladores. En teoría, cuando la operación se realiza a la mitad de la velocidad, la reducción en el flujo de aire es de 50% ocasionada por una reducción de 1/8 de potencia del motor, respecto a la operación a velocidad total. Si embargo, la velocidad media real de operación requerirá aproximadamente el 17% de la potencia a velocidad total, ya que existen pérdidas inherentes en el motor, cuando se registran cargas excesivas.

En la figura 10 se muestra una gráfica típica de temperaturas del agua de salida cuando la torre se opera bajo las siguientes condiciones:

1. Con el ventilador fuera de operación.
2. Con el ventilador a velocidad media.
3. Con el ventilador a velocidad total.

FIGURA 10. Temperaturas del agua de salida de la torre de enfriamiento en función de la temperatura de bulbo húmedo



Al disminuir la temperatura de bulbo húmedo, el agua que sale de la torre durante una operación a velocidad media podría cumplir los requisitos de la temperatura de diseño del agua de 85 °F. Para una temperatura de bulbo húmedo de 60 °F y un intervalo de 20 °F, se obtiene una temperatura del agua ligeramente por debajo de 85 °F con flujo sobre la torre. Si el ventilador contara con un motor de 100 hp, podrían ahorrarse 83 hp cuando la operación se realiza a velocidad media. Al ejecutar los cálculos de ahorro, no debería pasarse por alto la ventaja de tener agua de torre disponible, más fría para el sistema completo de circulación de la misma.

Los desarrollos tecnológicos más recientes, en lo referente al control de la energía para torres de enfriamiento, incluyen ventiladores de tipo hélice de inclinación variable y dispositivos del tipo inversor para permitir velocidades variables en los ventiladores. Estos esquemas incluyen el seguimiento de la carga a una temperatura constante del agua de salida.

El arreglo de inclinación variable, en motores de velocidad constante, cambia la inclinación de las aspas a través de una señal neumática originada en la temperatura del

agua de salida. Como existe disminución en la carga técnica y/o temperatura de bulbo húmedo ambiente, la inclinación del aspa reduce el flujo de aire y se requiere menor energía en el ventilador.

Los inversores hacen posible controlar un ventilador de velocidad variable cambiando la modulación de frecuencia. Los motores de corriente alterna estándares para ventiladores pueden ser de velocidad regulada entre 0 y 60 Hz. Si se emplean inversores para esta aplicación es importante evitar frecuencias que puedan causar velocidades críticas en el ventilador.

Se cree que el ahorro en energía puede tenerse a partir de estos arreglos, sin embargo, estos podrían no constituir en mejor sistema.

Considérense, como un ejemplo, los condensadores de vapor en una planta de energía y las unidades de refrigeración que pueden aprovechar el agua más fría de la torre para reducir el consumo de energía. Por lo general, estos ahorros son mayores que los obtenidos con un ventilador de torre con temperaturas constantes del agua de salida. Un condensador de la unidad de refrigeración puede utilizar las temperaturas del agua, por abajo y hasta 12.8 °C para reducir el consumo de ahorro de energía en un 25 a 30%.

2.6 Potencia de bombeo.

Otro factor importante en el análisis de una torre de enfriamiento, en especial para torres de tamaño mediano y grande, es la potencia de la bomba. Cuando se trata de torres de enfriamiento con boquillas de aspersion, la carga estática de bombeo será igual a la ascensión estática más la pérdida de presión en las boquillas. Una torre del tipo de flujo cruzado o transversal con flujo por gravedad permite que la carga de bombeo sea igual a la elevación estática. Una reducción en la altura de la torre reducirá la elevación estática y esta reducción de potencia se obtiene de acuerdo a la expresión:

$$\text{bomba bhp} = \frac{\text{gal/min} * h_t}{3960 * (\text{eficiencia de la bomba})}$$

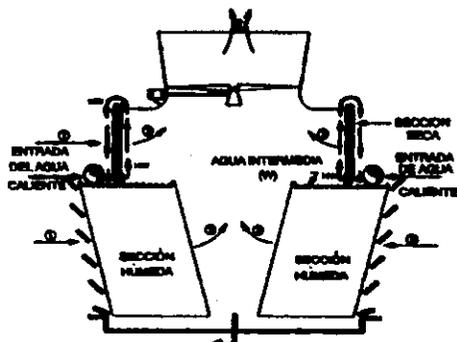
donde h_t = carga total, pies.

2.7 Abatimiento de neblina y bruma.

Un fenómeno que ocurre con frecuencia es la formación de neblina, que produce una bruma visible y posibilidades altas de formación de hielo. Es ocasionada como resultado de la mezcla de aire caliente que abandona la torre con aire ambiente de enfriamiento, que carece de capacidad para absorber toda la humedad como vapor. Aunque la formación de bruma no había sido considerada como un factor indeseable, la adecuada ubicación de las torres, en tal forma que la fuente de quejas quede reducida al mínimo, a recibido en la actualidad la atención necesaria. En algunas ocasiones se utilizan chimeneas en los ventiladores para reducir la neblina en la parte inferior de la torre. Aunque las chimeneas de gran altura minimizan los efectos de formación de bruma, es posible que no contribuyan a evitar la saturación con vapor de agua y mejorar la visibilidad. La persistencia de la bruma es mayor en períodos de temperaturas bajas en el ambiente.

En los últimos tiempos, el aspecto ambiental ha recibido mayor atención, aunque aún existen personas que creen, en forma equivocada, que las descargas de la torre de enfriamiento son dañinas. Esto ha provocado que se diseñe un sistema de abatimiento de la bruma conocido como configuración de enfriamiento húmedo - seco. La reducción de la humedad relativa o contenido de humedad en la corriente de descarga de la torre reducirá la frecuencia de formación de bruma. En la figura 11 muestra un arreglo de trayectoria en paralelo que ha demostrado su factibilidad técnica para cumplir la función de abatimiento. A la vez es motivo de un incremento sustancial en la inversión monetaria para la torre.

FIGURA 11. Arreglo de una torre de enfriamiento de trayectoria en paralelo



El aire ambiente viaja en corrientes paralelas a través de la sección seca superior y la sección de evaporación. Estas secciones se benefician térmicamente gracias a la recepción de aire ambiente de enfriamiento con las corrientes húmeda y seca mezclándose después de abandonar su respectiva sección. El flujo del agua se arregla en serie, primero hacia la sección seca y después a la de evaporación. También es posible utilizar un arreglo del flujo de aire en "trayectoria en serie" donde las secciones secas se pueden localizar antes o después de que el aire cruce por la sección de evaporación. A pesar de esto, el flujo de aire de trayectoria en serie tiene la desventaja del estancamiento de agua, que puede dar como resultado la formación de escorias con la consiguiente restricción en el flujo de aire.

Las torres de enfriamiento húmedo seco incorporan estos diseños para grandes aplicaciones industriales y no están disponibles en la actualidad para aplicaciones comerciales.

2.8 Manejo de la energía.

Con el hincapié que hoy se hace en el manejo adecuado de la energía, las torres de enfriamiento no podrían ser ajenas a esta corriente de pensamiento. Durante los períodos en que las temperaturas de bulbo húmedo ambientales se encuentran por debajo de 50 °F, las torres de enfriamiento tienen la capacidad de suministrar agua enfriada directamente a los sistemas de acondicionamiento de aire. Es posible instalar líneas de derivación en los sistemas de torres de enfriamiento existentes, con el objetivo de permitir que el efluente de la torre fluya directamente a los serpentines de enfriamiento. Una vez que el calor se ha eliminado de la corriente de aire, el agua retorna directamente a la torre de enfriamiento. La temperatura del agua que sale de la torre de enfriamiento se controla entre 8.9 y 12.2 °C, por lo general con ventiladores. Dependiendo de la limpieza del agua de la torre de enfriamiento, puede ser necesaria la instalación de una corriente lateral o un filtro de flujo total para minimizar la contaminación del circuito de agua enfriada, normalmente cerrado.

Se han utilizado, en torres de enfriamiento, otros métodos en consumo de energía de refrigeración. Estos sistemas, cuando se aplican a máquinas de refrigeración centrífugas y por absorción, son conocidos como sistemas de *termociclo o enfriamiento libre*. Cuando el agua que sale de la torre de enfriamiento se encuentra disponible a temperaturas por debajo de 10 °C, es sistema termociclo permite parar el compresor o tener una reducción en el flujo de vapor hacia la unidad de absorción.

El sistema termociclo sólo puede operarse cuando se dispone de agua a una temperatura menor que la del agua enfriada requerida. Entre las modificaciones para una unidad de refrigeración centrífuga se incluyen la instalación de una pequeña bomba de refrigerante líquido, la colocación de cabezales de boquillas de aspersión y una línea de derivación de vapor entre el enfriador y el condensador. Cuando el compresor está

fuera de operación, es posible que la eficiencia de la unidad de refrigeración en el termociclo sea hasta del 35%.

El ventilador de la torre de enfriamiento se opera a una velocidad total con objeto de producir la temperatura más baja posible en el agua, para una temperatura de bulbo húmedo ambiental determinada. La gran derivación entre el enfriador y el condensador se abre junto con el amortiguador de la succión del compresor o las aspas prerotacionales. El calor eliminado de la corriente del agua enfriada causa la formación de vapor refrigerante del condensador. Este vapor fluye a través de la derivación hasta el condensador, donde se condensa hasta convertirse en líquido. Este líquido regresa al enfriador como en el ciclo de refrigeración normal. Si la unidad de refrigeración cuenta con válvulas internas de flotación, éstas se derivan en forma manual o se mantienen abiertas mediante un vástago de ajuste.

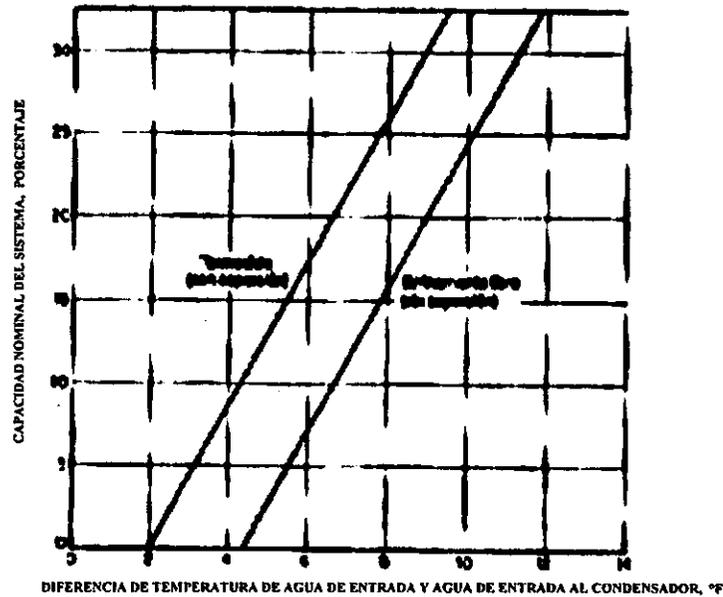
La capacidad del termociclo es una función de la diferencia de temperaturas entre el agua enfriada de salida, que abandona el enfriador, y el agua de entrada del condensador. El ciclo se detiene cuando estas dos temperaturas se aproximan una a otra y no se cuenta con suficiente diferencia en la presión de vapor de estos fluidos, hasta el punto que se permita el flujo entre los intercambiadores de calor.

En la operación de un termociclo no se tiene control preciso de la temperatura del agua enfriada de salida. Esta temperatura depende de las condiciones de bulbo húmedo ambiental que se tengan. Por lo general, se tiene poco cambio en las temperaturas de bulbo húmedo en días de invierno, de manera que las variaciones en la temperatura del agua son mínimas. Esto no sería posible en primavera y otoño, ya que la variación en las temperaturas ambientales puede suceder y sucede.

Las torres de enfriamiento que cuentan con unidades de refrigeración modificada para enfriamiento libre no tienen bomba de líquido refrigerante ni cabezales de boquillas

de aspersión. Se carece de agitación del refrigerante para mejorar la transferencia de calor. Este arreglo permite hasta un 20%, aproximadamente, de la capacidad nominal de enfriamiento del agua.

FIGURA 12. Capacidades esperadas para sistemas termociclo y de enfriamiento libre



Para la operación de torres de enfriamiento, en las versiones termociclo y de enfriamiento libre es necesario tomar algunas precauciones con el objetivo de minimizar los problemas de congelamiento. Entre los cuales están: la colocación de inversores del ventilador, para la circulación de aire hacia la parte inferior de la torre, distribución adecuada del agua, flujo constante de agua en la torre, rastreo del calor en las líneas cuando se requiera y carga máxima por celda de la torre.

3. AGUA DE ENFRIAMIENTO

3.1 Problemas del agua de enfriamiento.

El agua de recuperación que se usa en los sistemas de enfriamiento, generalmente proviene de recursos naturales tales como ríos, lagos y pozos; Cuando llega a la planta, contiene demasiadas impurezas. El agua disuelve casi todo lo que se pone en contacto con ella, por lo que se considera que es un buen solvente. Además, de disolver sólidos, puede absorber gases. También colecciona pequeñas partículas de sólidos suspendidos como arena, óxidos y otros sólidos que quedan disueltos en ella.

El agua de recuperación está propensa a contener sólidos disueltos y suspendidos aunque esta pueda parecer perfectamente clara. Debido a que el agua circula varias veces a través de tubos, intercambiadores de calor, torre de enfriamiento y depósitos, recoge más sólidos. Estos sólidos aumentan porque el agua disuelve un poco de la superficie con la que se pone en contacto.

El agua que fluye en la torre de enfriamiento contribuye al crecimiento de impurezas en la torre. El aire puede contener gases industriales, polvo, basura y microorganismos, los cuales son dañinos al equipo de intercambio de calor.

A medida que el agua y el aire se ponen en contacto en el área de relleno o sea dentro de la torre, las impurezas contenidas en el aire son absorbidas por el agua, por lo tanto aumenta el nivel de sólidos totales. A medida que el agua se evapora en la torre de enfriamiento, los sólidos suspendidos y disueltos quedan rezagados. Después de la evaporación parcial los sólidos tienden a concentrarse en el agua remanente.

El agua enfriada que sale de la torre posee más sólidos totales por galón que el agua caliente que entra en la torre, y el agua de circulación en el sistema de enfriamiento tiene más sólidos totales que el agua de recuperación. Así, los sólidos disueltos, sólidos suspendidos, gases disueltos y microorganismos son la causa de los problemas en los sistemas de enfriamiento de agua.

3.2 Tipos y efectos de las impurezas

3.2.1 Incrustación

Las diferentes impurezas tienen efectos diferentes en el sistema y en el equipo. Cuando la concentración de los sólidos disueltos se hace muy alta, se precipitan formando incrustaciones en la superficie del equipo de intercambio de calor. Incrustación es el nombre que se le da a los depósitos formados en las superficies de transferencia de calor por sólidos normalmente en solución.

Existen dos clases principales de materiales que forman incrustación que pueden causar problemas en el sistema del agua de enfriamiento. Estos incluyen algunos tipos de compuestos de calcio y sílice. Los compuestos de calcio y sílice están presentes en el agua de circulación y recuperación con sólidos disueltos.

Los compuestos de sílice y calcio tienen la propiedad inusual de transformarse en menos solubles a medida que la temperatura del agua aumenta; quiere decir que cuando el agua se calienta, puede contener menos compuestos de sílice y calcio que cuando están a menor temperatura.

Cuando el agua contiene sílice y calcio y es llevada a su punto de ebullición en un recipiente, la incrustación se forma en los lados y el fondo del recipiente, esto también sucede cuando el agua de enfriamiento pasa a través de un intercambiador de

calor. Los depósitos de incrustación formados en las paredes del tubo de un intercambiador de calor tienen un efecto aislante que reduce la transferencia de calor.

3.2.2 Ensuciamiento

Los sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento pueden causar serios problemas al equipo utilizado. Ensuciamiento es el término que se utiliza para describir la formación de depósitos en las superficies de transferencia de calor causado por sólidos normalmente suspendidos en el agua de enfriamiento. Los sólidos suspendidos entran al sistema en un gran número de formas: limo arenoso en el agua de recuperación, como partículas que acarrea el aire que entra en la torre de enfriamiento y como fugas de otras corrientes del proceso.

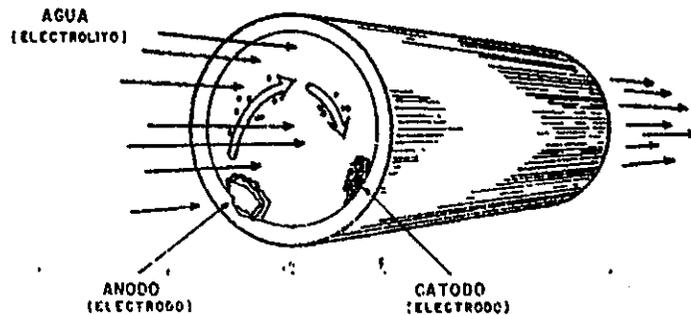
Las partículas suspendidas son muy pequeñas y cada una está rodeada por una carga eléctrica negativa. Las cargas negativas causan que las partículas se repelan unas con otras y se resistan al asentamiento. Cuando el agua se pone en contacto con la superficie de un metal el hierro en el metal va hacia la solución, creando una carga positiva en la superficie de transferencia de calor. Los sólidos suspendidos cargados negativamente, son atraídos a las superficies cargadas positivamente, con el tiempo, las partículas se agrupan disminuyendo la transferencia de calor y ensuciando el intercambiador de calor y el equipo de la torre de enfriamiento.

3.2.3 Corrosión

La corrosión es la causa principal de la destrucción y las averías del equipo de enfriamiento. Es una reacción electroquímica que ataca los componentes de metal de un sistema de enfriamiento.

La corrosión ocurre cuando una corriente eléctrica fluye entre dos electrodos a través de una solución acondicionadora llamada electrólito. La corrosión fluye del ánodo al cátodo a través del electrólito.

FIGURA 13. Esquema de la corrosión electrolítica

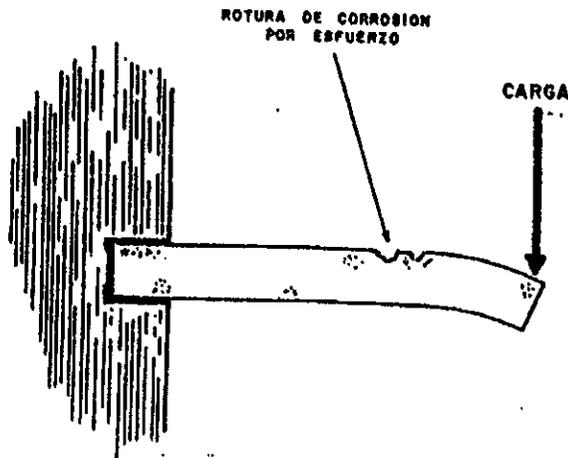


Los electrodos pueden ser dos materiales diferentes o pueden ser diferentes áreas del mismo metal. La corrosión es el resultado de dos áreas de un metal que difieren en su potencial eléctrico.

La corrosión local es causada por una diferencia en carga eléctrica entre áreas del mismo metal. Las áreas de las superficies del metal con esfuerzo desarrollan diferentes potenciales eléctricos.

Si algún tipo de fuerza como torsión o dobladura se aplica a un punto del metal, el área está forzada, este esfuerzo debilita el metal a tal punto que la hace más vulnerable a efectos de corrosión.

FIGURA 14. Esquema de corrosión debido a un esfuerzo sobre el metal



Una vez iniciada la corrosión, su avance se controla con mucha frecuencia por la naturaleza de las películas, como las pasivas, que se pueden formar o acumular en la superficie metálica. El ejemplo clásico es la película de óxido delgada que se forma en los aceros inoxidable.

Los productos insolubles de la corrosión pueden ser impermeables al líquido corrosivo y, por lo tanto, ser completamente protectores, o bien, pueden ser bastante permeables y permitir la corrosión local o general sin obstáculo. Las películas no continuas o no uniformes tienden a localizar la corrosión en zonas determinadas mediante la iniciación de efectos electrolíticos del tipo de celda de concentración. Las películas pueden tender a retener o absorber la humedad y, en esa forma, a retrasar el tiempo de desecación e incrementar el grado de la corrosión resultante de la exposición a la atmósfera o a los vapores corrosivos.

Además de las películas que, se originan en el metal que se corroe, hay otras que se deben a la solución corrosiva. Entre ellas se incluyen varias sales, como carbonatos y sulfatos que se precipitan de soluciones calentadas y compuestos insolubles, como la "

pedra de cerveza ", que se forma en las superficies metálicas en contacto con algunos productos específicos.

3.2.4 Ataque microbiológico

Los organismos microscópicos o microorganismos, prosperan en los sistemas de enfriamiento de agua, el ataque microbiológico es el término que se usa para describir los problemas y daños causados por los microorganismos presentes en el agua de enfriamiento. Las plantas microscópicas y los organismos similares a las plantas llamadas algas, requieren de luz solar para su crecimiento. Las algas se encuentran en las áreas con luz del sistema de enfriamiento, esto indica que se encuentran en las torres de enfriamiento de agua. Las algas flotan libremente en el sistema o se pegan en masas acordonadas a cualquier superficie formando depósitos de ensuciamiento. Los depósitos formados en las superficies expuestas, restringen el flujo de agua a través del sistema.

Las algas muertas pasan rápido al agua de circulación del sistema de enfriamiento, resultando con esto, un aumento en la cantidad de sólidos suspendidos en el agua. Las algas también interfieren con los tratamientos de control, y proveen de comida a otros microorganismos.

En contraste con las algas, las bacterias son microorganismos unicelulares que viven principalmente en áreas oscuras del sistema, como la tubería del intercambiador de calor. Las bacterias producen fango, que es una masa orgánica pegajosa que se adhiere a casi todas las superficies en el sistema de enfriado. El fango atrapa otros microorganismos y partículas con los que se pone en contacto, dando como resultado un ensuciamiento biológico. Además, causa corrosión al crear variaciones en la superficie del metal y por lo tanto potenciales eléctricos diferentes.

Los hongos, particularmente las levaduras y los mohos, son destructivos para las torres de enfriamiento. Además de formar depósitos, esto se pegan a los componentes de madera de la torre, causando descomposición y pérdida de la resistencia estructural.

3.3 Recuperación, purga y unidades de medida

La cantidad de agua en el sistema debe mantenerse a un nivel constante, pero la composición química del agua de circulación también es una consideración importante.

Cuando se evapora una porción del agua de circulación, los sólidos permanecen. Si los sólidos no permanecieran disueltos, saldrían de la solución y causarían incrustación en el sistema. El balance de sólidos en el sistema se ve afectado por tres factores que son:

1. La purga intencional.
2. La purga no intencional.
3. La adición del agua de recuperación.

El agua que se descarga deliberadamente del sistema para controlar la concentración de los sólidos disueltos en el agua de circulación, se llama purga intencional. La purga no intencional es la cantidad de agua que se pierde del sistema debido a la brisa, o sea la cantidad de agua que no se logra retener en los eliminadores de gota, y también la forman las fugas de agua en el equipo y tubería.

Para reemplazar el agua perdida por evaporación, fugas y purga intencional, se agrega agua de recuperación al cuerpo principal del agua de circulación.

Aunque el agua de recuperación usualmente es fresca, el agua de desperdicio también puede utilizarse. El agua con calidad más pobre aumenta el potencial para

depósitos, corrosión y ataque microbiológico, por lo que el agua de recuperación necesita de un tratamiento más adecuado que el agua fresca.

Para determinar el volumen y frecuencia de la purga debe existir una forma de medición de la concentración de sólidos en el agua de circulación y recuperación; esta forma de medición es la llamada relación de ciclos de concentración. Para determinar los ciclos de concentración se compara la concentración de los sólidos disueltos en el agua de circulación con la concentración de sólidos disueltos en el agua de recuperación. Como algunos sólidos se concentran mayor que otros, la relación de los ciclos se toma para un valor específico.

En cada torre, los ciclos de concentración deben mantenerse a un cierto nivel. Los ciclos para torres individuales varían con las características del agua que se usa en los diferentes sistemas.

Un ciclo de concentración más alto requiere menos tratamiento, entre más alto se mantengan los ciclos, será más económico el proceso de enfriamiento del agua. A mayor concentración de los ciclos, el agua es más dañina en términos de formación de sólidos y corrosividad.

Las concentraciones de sólidos se expresan como partes por millón, ppm o mg/l.

3.4 Tratamiento del agua de enfriamiento

Se le da tratamiento al agua de enfriamiento principalmente para proteger el equipo del sistema y así lograr prolongar su vida. Un programa de tratamiento de agua completo debe dirigirse al control de todos los problemas causados por las impurezas en el agua. Los sólidos disueltos y suspendidos en el agua de circulación pueden tener efectos dañinos en el sistema completo de enfriamiento.

Un objetivo del tratamiento de agua de enfriamiento es prevenir la formación de depósitos de incrustación y ensuciamiento en las superficies de transferencia de calor. Las impurezas en el agua pueden corroer o desgastar las partes de metal del sistema, por lo tanto, el programa de tratamiento de agua también debe proteger las superficies del metal de la corrosión. La descomposición de la madera que resulta del ataque de químicos y microorganismos en el agua de enfriamiento puede prevenirse usando un tratamiento adecuado. El deterioro de la madera de la torre de enfriamiento debilita la resistencia estructural de la misma.

3.4.1 Control de incrustación

Los materiales que forman incrustación entran al sistema por medio del agua de recuperación, dándole al agua una cualidad llamada dureza, cuanto más alta es la concentración de los materiales que forman la incrustación más dura será el agua.

El concepto de dureza, tal como se aplica al agua, significa propensión a formar incrustaciones y a su poder precipitante en las soluciones de jabón empleadas para determinarla. Según sea la naturaleza de las impurezas contenidas, la dureza de las aguas puede ser temporal (carbonatos) y permanente.

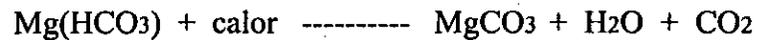
La cantidad de cualquier sustancia productora de incrustaciones puede expresarse en partes por millón ppm., de carbonato de calcio equivalente (CaCO_3) contenido en el agua. En el caso de interesar expresarla en grains/galón, la conversión se efectúa dividiendo las partes por millón por 17.1.

En aguas naturales la dureza puede ser desde menos de 10 ppm, la cual es baja, hasta más de 1800 ppm la cual hace inutilizable las aguas que la poseen para fines industriales.

Las aguas con dureza temporal pueden ablandarse hirviéndolas o calentándolas suficientemente, con este método de purificación el CO₂ es liberado, formando precipitados relativamente insolubles de calcio y magnesio, (CaCO₃, MgCO₃). Puede escribirse la reacción siguiente:

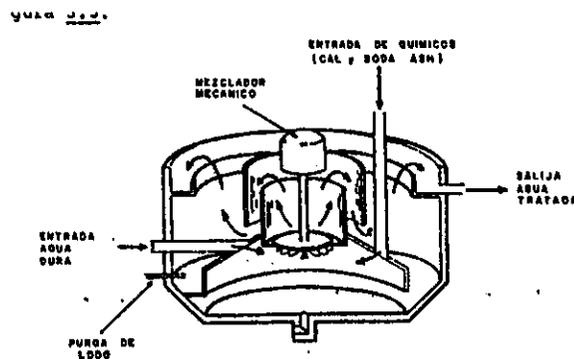


y también



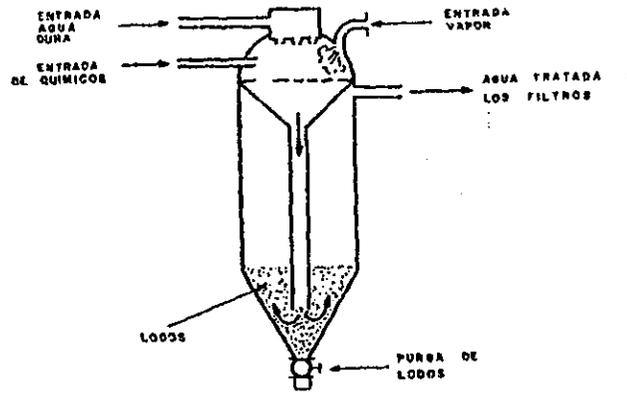
El ablandamiento o suavización del agua también se realiza agregando cal y soda ash al agua, mezclándose en un suavizador mecánico en un proceso frío.

FIGURA 15. Suavizador mecánico en un proceso frío



Otro tipo de suavizador es el que utiliza calor y químicos, el agua de recuperación y los químicos se calientan por el vapor, sin obtener una mezcla mecánica. El calor aligera la reacción del suavizador, en cierta cantidad a un tiempo dado; un suavizador de proceso caliente puede tratar más agua que un suavizador de proceso frío.

FIGURA 16. Suavizador que utiliza calor

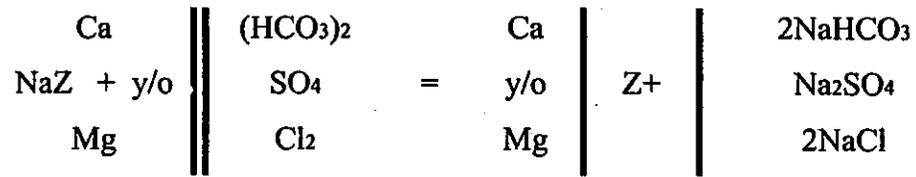


Además de la suavización con cal - soda, existe otra forma para remover la dureza del agua, se conoce con el nombre de intercambio iónico. Las impurezas en el agua se separan para formar partículas cargadas positiva y negativamente, estas partículas se llaman iones; estos iones existen en la solución y actúan casi independientemente. Una unidad de intercambio iónico tiene la habilidad de intercambiar un tipo de ion por otro tipo; para suavizar el agua se debe intercambiar iones de calcio por iones de sodio.

Este tipo de tratamiento de agua se logra realizar con descalcificadores a base de zeolita. Se conocen por zeolitas (Na_2Z) a los silicatos hidratados de sodio y aluminio, bien sean naturales o artificiales, su fórmula general es: $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$. Esta sustancia tiene la propiedad de absorber el calcio y el magnesio de las aguas que la atraviesan, debido a que sus bases son permutables.

De esta manera, en el proceso de ablandamiento o rectificación, el sodio de la zeolita pasa a la solución en forma de carbonato, sulfato o cloruro, debido a que el calcio

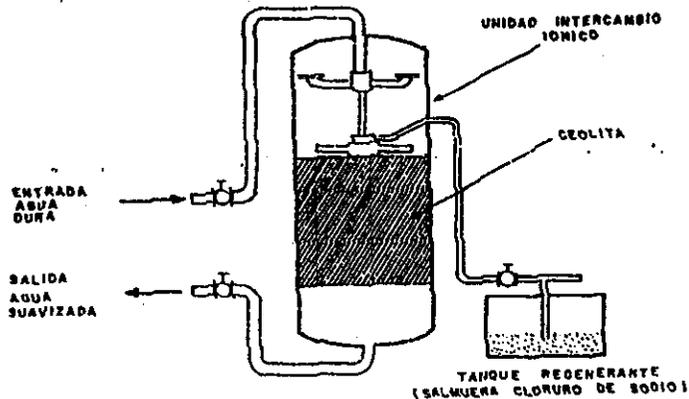
y magnesio del agua son absorbidos por la zeolita. Los cambios de bases son los siguientes no formándose precipitado.



El tratamiento con zeolita produce aguas con contenidos muy bajos de calcio y magnesio. Cuando la zeolita se vuelve inerte se regenera mediante un lavado con salmuera (una solución de NaCl), para restituir el sodio por intercambio.

Las zeolitas naturales (arenas verdes) están indicadas para tratar agua fría exenta de ácidos y se utilizan con éxito en ciertos casos. En otros, han sido desplazados por productos resinosos artificiales especiales fabricados para el rectificado de aguas. Estos productos pueden soportar altas temperaturas, ácidos y álcalis, y en determinadas condiciones pueden cambiar los aniones y cationes de las impurezas contenidas en el agua. En cualquier caso el agua que atraviesa el lecho de zeolita debe estar libre de detritus, lodo, cieno y precipitados finamente divididos, los cuales recubren y tapan las partículas de los materiales empleados para la rectificación, haciéndolos menos eficientes.

FIGURA 17. Vista en corte de un rectificador de agua a base de zeolita y corriente descendente



El agua entra por un distribuidor de tubos situados en la parte alta del aparato. La circulación es de arriba hacia abajo a través de un lecho de zeolita y de gránulos de cuarzo de tamaño creciente, que sirven de soporte al medio intercambiador de iones. Este lecho de zeolita sirve para quitar las materias en suspensión en el agua, si bien no es esta su misión, ya que dichas materias deben quitarse del agua antes de entrar en el rectificador de zeolitas. El agua rectificada sale por el haz de tubos situado en la parte inferior del aparato.

Durante su regeneración el lecho de zeolita se lava para quitarle las materias sedimentadas mediante el agua de lavado, la cual lo atraviesa en sentido contrario al de su funcionamiento, quedando de esta forma acondicionado. A continuación la solución de cloruro de sodio (NaCl) procedente del depósito de salmuera se distribuye mediante un inyector o bomba sobre la zeolita, circulando a través del mismo para efectuar el cambio de base. La etapa final de la regeneración consiste en el enjuague con agua para quitar el exceso de sal junto con los cloruros de calcio y magnesio formados. Los

caudales de agua a través del rectificador se controlan mediante una sola llave de varios pasos.

Una segunda manera de controlar la formación de incrustaciones es prevenir que los sólidos disueltos salgan de solución y formen incrustación en las superficies de transferencia de calor, en este caso, no es el agua de recuperación, sino el agua de circulación la que se trata.

Al agregar un ácido al agua de circulación se puede mantener la dureza disuelta; agregar ácido significa bajar el ph del agua. Al disminuir el PH, el agua forma menos incrustaciones. El ácido sulfúrico se usa para eliminar incrustaciones en el agua, pero es extremadamente corrosivo. Por lo que, la cantidad de ácido que se agrega al agua debe ser controlada adecuadamente.

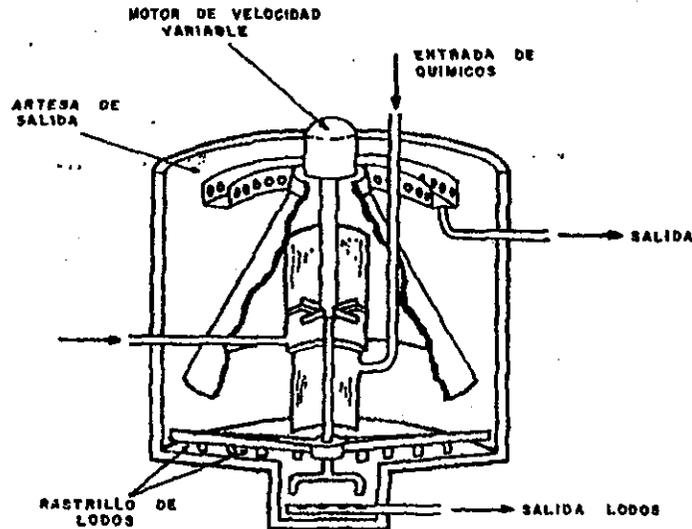
Una tercera forma de controlar la incrustación es permitiendo que las sales de dureza se precipiten o salgan de la solución, pero en un punto en el cual no se adhiera a las superficies de transferencia de calor.

Con este método se debe agregar químicos al agua de recuperación que harán que los materiales causantes de incrustación formen un lodo no pegajoso. El lodo entonces se asentará en la base de la torre, o puede descargarse de la torre; junto con otros materiales indeseables como parte de la purga.

3.4.2 Control de ensuciamiento

La clarificación es un proceso que remueve los sólidos suspendidos en el agua, haciendo que éstos se asienten. En la figura 18 se muestra un clarificador mecánico en el que, el agua que contiene los sólidos suspendidos y los químicos de tratamiento se alimentan por diferentes entradas.

FIGURA 18. Clarificador mecánico



El diseño del clarificador provoca que los químicos se mezclen completamente con el agua. Los químicos de tratamiento, llamados coagulantes, hacen que los sólidos suspendidos formen una masa que se asienta rápidamente. Los químicos coagulan los sólidos suspendidos haciéndolos pesados para sedimentar rápidamente el fondo del tanque de clarificación. Los sólidos se agrupan como lodo, una pala rotatoria lo mueve hacia el centro donde se encuentra la salida de lodos.

Otra forma de eliminar depósitos de ensuciamiento es filtrando agua, lo que no es práctico, por lo que se debe filtrar solo una porción del agua de circulación. Los filtros funcionan por gravedad o a presión.

FIGURA 19. Filtro que funciona por gravedad

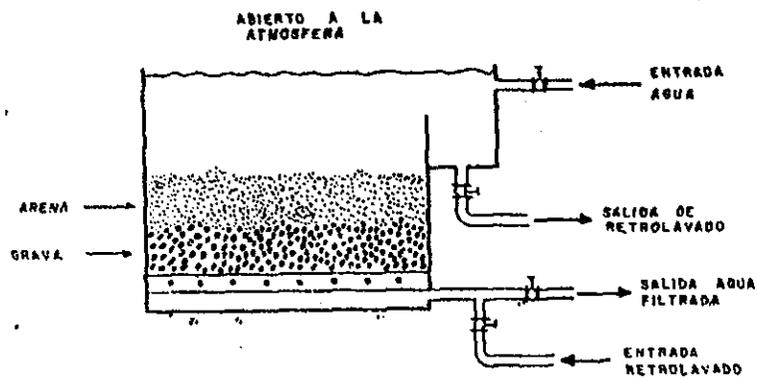
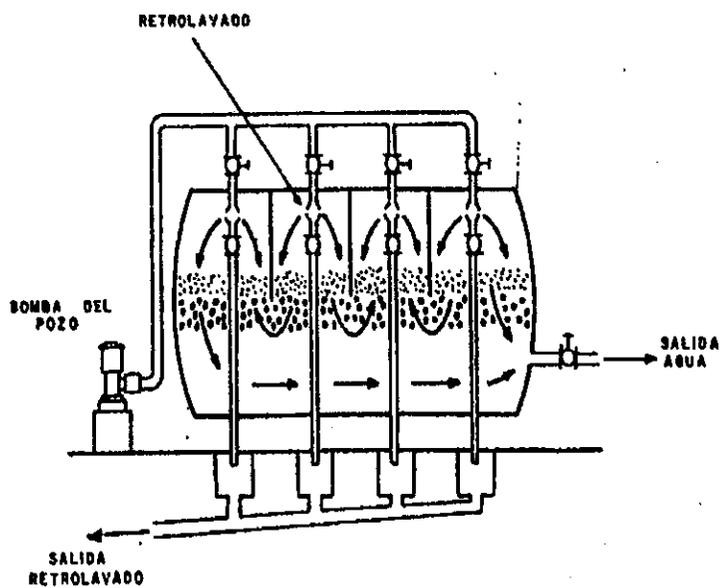


FIGURA 20. Filtro que funciona a presión



Para limpiar los filtros el agua se retrolava, es decir se empuja de regreso en la dirección opuesta al flujo normal. Los sólidos que han sido atrapados dentro y fuera de la cama del filtro se empujan fuera del sistema a través de la salida de retrolavado.

Los filtros usualmente se instalan en baterías de dos o más, de manera que el flujo del agua filtrada pueda continuar pasando por lo menos en un filtro mientras que el otro está siendo limpiado.

La filtración de corriente de lado es un método que se utiliza para arrastrar y filtrar una porción del agua de circulación. Entre 1 y 5% del flujo total pasa a través de un filtro y luego regresa al sistema. Este proceso mantiene la materia suspendida en la torre de enfriamiento a un nivel aceptable.

También podemos eliminar el ensuciamiento usando dispersantes; los dispersantes son químicos que previenen que las partículas se asienten para que luego puedan ser removidas por filtración o purga.

3.4.3 Control de corrosión

Corrosión es un desgaste anormal en el equipo mecánico de una torre, con una disminución de su resistencia mecánica. Las causas pueden ser:

1. Acción electrolítica.
2. Acidez o alcalinidad del agua.
3. Presencia de oxígeno.
4. Variaciones de concentración del electrólito.

Cuando se agrega al agua de circulación, los químicos llamados inhibidores de corrosión forman una película protectora en la superficie del metal. La película

protectora en el metal protege a éste de la corrosión, pero no interfiere con la transferencia de calor entre el agua de enfriamiento y el fluido en proceso.

Debido a las diferencias en las propiedades químicas y físicas de la corrosión, algunos inhibidores protegen las áreas catódicas mientras que otros protegen las áreas anódicas. Un programa completo de tratamiento debe incluir una combinación de inhibidores para proteger y aislar ambos electrodos de la corrosión.

Un inhibidor puede afectar un metal en forma diferente de otro metal. Por lo tanto, el inhibidor seleccionado dependerá del tipo de metal en el sistema. Algunos materiales como el níquel, son más resistentes a la corrosión que otros.

Los efectos de la corrosión pueden reducirse grandemente al usar metales resistentes a la corrosión como el níquel. Los recubrimientos protectores, como la pintura y el plástico, también pueden usarse para controlar la corrosión.

3.4.4 Pruebas de corrosión en plantas

No siempre resulta práctico o conveniente investigar problemas de corrosión en el laboratorio. En muchos casos es difícil descubrir cuáles son las condiciones de servicio y reproducirlas con exactitud. Esto sucede especialmente en el caso de los procesos que incluyen cambios en la composición y otras características de las soluciones, a medida que avanza el proceso, como por ejemplo, en la evaporación, la destilación, la polimerización, la sulfonación o la síntesis.

En el caso de muchas sustancias naturales, no se sabe con seguridad la naturaleza exacta del corrosivo y está sujeta a cambios que no se pueden controlar con facilidad en el laboratorio. En otros casos, la corrosividad de la solución se puede ver afectada considerablemente o deberse principalmente a un constituyente presente en proporciones

pequeñas. La masa disponible en el volumen limitado de solución corrosiva, que se puede utilizar en una configuración de laboratorio, se agotaría por la reacción de corrosión a comienzos de la prueba, y por consiguiente, los resultados obtenidos durante un periodo prolongado sería engañosos. A continuación se mencionan algunos métodos de prueba de corrosión.

3.4.4.1 Método de resistencia eléctrica

Si una muestra de prueba de corrosión está en forma de fleje o alambre delgado, su resistencia eléctrica aumenta a medida que la corrosión disminuye su sección transversal. Por consiguiente, se puede utilizar, para vigilar la corrosión, una medición periódica o continua de la resistencia longitudinal del espécimen. La medición de la resistencia eléctrica no tiene ninguna relación con la electroquímica de la reacción de corrosión. Se limita a medir una propiedad volumétrica que depende del área de sección transversal del espécimen. Existen para ello instrumentos comerciales. Las ventajas de la técnica de resistencia eléctrica son:

1. Medir la corrosión sin tener que ver ni retirar la muestra.
2. Hacer mediciones rápidas de la corrosión, en horas, días o en forma continua. Esto permite que se detecten los incrementos repentinos de la velocidad de corrosión. En algunos casos, será posible modificar el proceso para disminuir la corrosión.
3. Utilizar el método para vigilar un proceso, con el fin de indicar si la velocidad de corrosión depende de algunas variables fundamentales del proceso.
4. El material corrosivo no tiene que ser un electrolito (de hecho, no tiene necesariamente que ser un líquido).
5. Detectar velocidades bajas de corrosión que requerirían mucho tiempo para su determinación por métodos de pérdida de peso.

Las limitaciones de la técnica son:

1. Se limita por lo común a la medición de la corrosión uniforme y no resulta completamente satisfactoria para la corrosión localizada.
2. El diseño de este sistema de prueba deberá tener la forma adecuada para compensar variaciones de temperatura. Estos diseños han demostrado no tener éxito completo. Los resultados más confiables son aquellos que se obtienen en sistemas de temperatura constante.

3.4.4.2 Método de polarización lineal

La técnica de polarización lineal (o la resistencia a la polarización) da la velocidad de corrosión en un minuto, aproximadamente, sin necesidad de ninguna medición anterior. Este método se utiliza mucho en la actualidad para vigilar la corrosión en las plantas. Existen instrumentos comerciales y algunos dan una lectura directa (registro semicontinuo, si se desea).

La técnica depende de que la corrosión sea de naturaleza electroquímica. Se mide la cantidad de corriente externa necesaria para modificar en unos cuantos milivolts (por lo común 10 mV) el potencial de corrosión de un espécimen que se corroe libremente. Esta corriente se relaciona con la de corrosión y, por consiguiente, con la velocidad de corrosión de la muestra. Si el metal se corroe con rapidez, se necesitará una corriente externa considerable para modificar su potencial y viceversa.

El sistema de medición consiste en cuatro elementos básicos:

- *Electrodos:* electrodos de referencia y prueba y, en algunos casos, un electrodo auxiliar.
- *Sonda:* conecta los electrodos en el material corrosivo, en el interior del recipiente, a los conductores eléctricos.

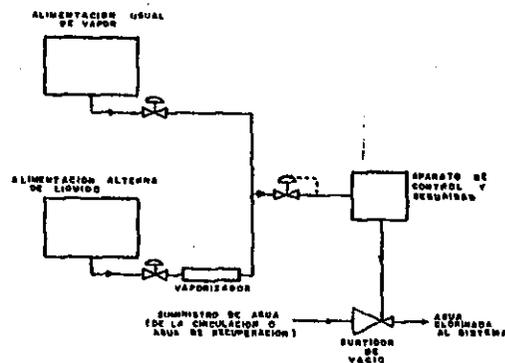
- *Conductores eléctricos:* van de la sonda a la fuente de corriente y al tablero de instrumentos.
- *Sistema de control:* fuente de corriente (pilas), amperímetro, tablero de instrumentos, etc.

Los instrumentos comerciales tienen dos o tres electrodos. Asimismo, hay diferentes tipos de sistemas de tres electrodos. La aplicación y las limitaciones de los instrumentos dependen, en gran parte, de esos sistemas.

3.4.5 Crecimiento microbiológico

El crecimiento de algas, hongos y bacterias puede controlarse usando biocidas. Estos son químicos que destruyen el crecimiento de microorganismos en el sistema de enfriamiento. Los biocidas oxidantes matan organismos por medio de una combustión húmeda; que es la oxidación que ocurre en presencia del agua. Los biocidas oxidantes queman los microorganismos en el agua de enfriamiento en circulación. El biocida oxidante más común es el cloro.

FIGURA 21. Sistema de cloración



El cloro usualmente se inyecta en el sistema como un vapor. Otros sistemas requieren la adición de un químico seco.

Por el contrario de los biocidas oxidantes los no oxidantes son aditivos químicos que destruyen los microorganismos por envenenamiento. Existen muchas clases de biocidas no oxidantes, dependiendo del tipo y porcentaje del ingrediente activo en el compuesto, la concentración recomendada varía. Los biocidas no oxidantes usualmente se usan para complementar la cloración cuando no ha sido completamente efectiva.

Los biocidas dispersantes se utilizan frecuentemente con los biocidas oxidantes y no oxidantes para aumentar su efectividad.

3.4.6 Protección de la madera de la torre de enfriamiento

El ataque de los químicos y los microorganismos en una torre de enfriamiento debilitan los componentes de la madera.

El ataque químico toma varias formas: el desgaste es un tipo de ataque químico. La acción del agua dentro de la torre desgasta o remueve los preservativos de la madera que la protege de la descomposición. El desgaste ocurre en las áreas inundadas de la torre.

El ataque microbiológico reduce la resistencia de la madera y la resistencia estructural de la torre. Existen dos tipos de ataque microbiológico: el ataque microbiológico a la superficie, que es el desgaste de la superficie de la madera en las áreas inundadas de la torre y el ataque interno que consiste en la descomposición interna de los miembros de la madera en las áreas no inundadas de la torre.

Se puede controlar el ataque químico y microbiológico en varias formas; manteniendo los niveles de ph y cloro constantes se minimizará el ataque químico y usando preservativos y tratamientos de atomización se reducirá el ataque microbiológico.

3.4.7 Tratamiento de purga

Las regulaciones ambientales requieren que la descarga a las aguas públicas de la purga de la torre de enfriamiento no contengan químicos en concentraciones tóxicas. El tratamiento de la purga es necesario debido a que algunos químicos del agua de enfriamiento son tóxicos.

Generalmente se utilizan dos métodos de tratamiento de purga que son: los químicos que pueden ser removidos y desechados, pero esto es un desperdicio de químicos valiosos, lo cual representa pérdida por el costo del producto, o los químicos que pueden recuperarse y utilizarse nuevamente para tratamiento.

Algunos de los métodos que se utilizan para remover impurezas del agua, tales como suavización e intercambio iónico, también se utilizan para remover los químicos para tratamiento de la purga de la torre.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Procedimiento

1. Se realizaron 15 pruebas de acuerdo a la tabla 1 de la página 59, en donde se especifica el equipo que estuvo en servicio.
2. Para cada prueba se especifica la división del flujo total para cada torre de enfriamiento. El flujo establecido para cada torre se fija con la válvula en la línea de retorno y con la indicación de la lectura obtenida con el medidor de velocidad lineal Doppler.
3. Después de fijar las condiciones establecidas en una prueba determinada, se deja que el sistema se estabilice durante un día, tiempo durante el cual se llenó un registro de temperaturas en la línea de salida general de retorno hacia las dos torres, y en la línea general de las torres hacia el proceso. También se realiza una medición de los parámetros establecidos en la tabla 2 de la página 59, un día después de haber fijado las condiciones de la prueba. Después de esta última medición, se fijarán las condiciones de la prueba siguiente, y se realizan las mediciones ya descritas. Procedimiento que se repite hasta cumplir las 15 pruebas.
4. Para las pruebas 14 y 15, en las cuales fue necesario arrancar una bomba de 200 HP, se recomienda que antes de arrancarla se ponga en servicio el generador eléctrico, para evitar aumentar la demanda en la facturación de la EEGSA.
5. Al obtener los datos de las 15 pruebas se procede a efectuar los cálculos de BTU / min. removidos y costos.

6. En base a costos y remoción de calor se debe establecer la operación óptima del sistema de enfriamiento.

TABLA No.I Descripción de las pruebas que se llevaron a cabo en la evaluación del sistema de enfriamiento

PRUEBA	GA-704 A			GA-704 B			GA-710 A			GA-710 B			GA-701 A			GA-701 B			GA-701 C			GA-701 D			GA-702 A			GA-702 B			GA-702 C			GA-702 D										
	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s														
1	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0								
2	4.2	0.91	6.1	4.15	1.58	5.88	4.15	1.58	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88					
3	4.25	5.1	3.85	4.25	5.19	3.83	4.25	5.19	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83		
4	4.25	3.03	5	4.2	2.71	3.7	4.2	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7		
5	4.25	7.88	2.3	4.2	7.56	2.35	4.2	7.56	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35		
6	4.2	5.94	3.3	4.1	5.84	3.25	4.1	5.84	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89			
7	4.1	2.98	4.8	4.2	3.25	4.8	4.2	3.25	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1			
8	4.2	7.2	2.8	4.2	7.29	2.98	4.2	7.29	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98	4.15	7.25	2.98		
9	4.3	4.97	4	4.2	3.3	3.6	4.2	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6		
10	4.15	3.48	4.6	4.2	1.81	5.1	4.2	1.81	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64
11	4.15	2.39	5.2	4.15	2.03	5.3	4.15	2.03	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3		
12	3.8	2.65	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	
13	3.8	5.95	6.8	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	
14	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6		
15	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6		

TABLA No. II Parámetros a monitorear en cada prueba

Estudio	MEDICIONES INICIALES			MEDICIONES FINALES			PROMEDIOS			PORCENTAJES			
	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	Vel. Lineal Recirculación F/s	Vel. Lineal T. Antigua F/s	Vel. Lineal T. Nueva F/s	% T. Nueva
1	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	4.2	11.87	0	100
2	4.2	0.91	6.1	4.15	1.58	5.88	4.18	1.24	5.88	4.18	1.24	5.88	10.53
3	4.25	5.1	3.85	4.25	5.19	3.83	4.25	5.14	3.83	4.25	5.14	3.83	42.78
4	4.25	3.03	5	4.2	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	4.23	2.71	3.7	44.32
5	4.25	7.88	2.3	4.2	7.56	2.35	4.23	7.72	2.35	4.23	7.72	2.35	64.64
6	4.2	5.94	3.3	4.1	5.84	3.25	4.15	5.89	3.25	4.15	5.89	3.25	60.21
7	4.1	2.98	4.8	4.2	3.25	4.8	4.15	3.1	4.8	4.15	3.1	4.8	28.46
8	4.2	7.2	2.8	4.2	7.29	2.98	4.2	7.25	2.98	4.2	7.25	2.98	81.02
9	4.3	4.97	4	4.2	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	4.27	3.3	3.6	81.04
10	4.15	3.48	4.6	4.2	1.81	5.1	4.18	2.64	5.1	4.18	2.64	5.1	22.33
11	4.15	2.39	5.2	4.15	2.03	5.3	4.15	2.21	5.3	4.15	2.21	5.3	18.8
12	3.8	2.65	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	3.8	2.85	4.5	24.71
13	3.8	5.95	6.8	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	6.3	5.95	6.3	33.39
14	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	34.07
15	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	5.4	5.2	5.6	65.93

4.2 Resultados

TABLA No. III

ESTUDIO	COSTO TOTAL US\$ / mes	BTU/min Removidos Torre Antigua	BTU/min Removidos Torre Nueva	BTU/min Removidos General	US\$ / 1000 BTU/min
1	18486.98	581786	0	581786	31.7762545
2	18783.71	0	821525.13	821525.13	22.8644375
3	19774.64	353118.3	487381.72	840500.02	23.5272332
4	19823.42	379234.83	439086.58	818321.41	24.2244915
5	19405.88	446588.69	331030.85	777619.54	24.9554943
6	23180.71	324957.88	512549.85	837507.73	27.6782042
7	23044.52	155994.98	722892.23	878887.21	26.2201108
8	22962.14	373151.79	426176.62	799328.41	28.7267908
9	21062.18	290713.44	625729.29	916442.73	22.9825381
10	21139.81	113041.53	694953.3	807994.83	26.1632986
11	20989.15	187079.66	650534.2	837613.86	25.0582649
12	20425.05	86133.14	696694.27	782827.41	26.0913833
13	21268.37	174028.2	623631.31	797659.51	26.6634695
14	26171.76	345806.91	819081.13	1164888.04	22.4671892
15	26435.77	314801.39	725945.46	1040746.85	25.4007687

4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con base a los resultados obtenidos se puede observar que en las pruebas uno a trece, en las que se utilizaron las bombas GA-704 A y GA-704 B (3600 a 3900 GPM), se hallan las tres pruebas donde se obtuvo la máxima cantidad de BTU/min. removidos y fueron las siguientes:

PRUEBA	BTU/min. REMOVIDOS
9	916471.64
7	878944.36
3	840500.16

Asimismo se establece que las tres pruebas con menor costo en US\$ / (BTU/min.) removidos, son las siguientes:

PRUEBA	US\$ / (BTU/min.) REMOVIDOS
2	22.86
9	22.98
3	23.53

Aquí puede notarse que la prueba más eficiente en lo que a costo se refiere, es la prueba 2 (torre nueva con 90% del flujo, tres ventiladores en alta velocidad y torre antigua con 10% del flujo y ventiladores apagados). Sin embargo en esta prueba, sólo se logran remover 821525.13 BTU/min.

La prueba 9, la cual aparte de ser la segunda prueba de menor costo en US\$/(BTU/min.) removidos, es la prueba en la cual se logra la mayor remoción en BTU/min. (916471.64); con lo que se tiene un costo mensual de operación de 21062.14 US\$/mes.

Con esta cantidad de BTU/min. removidos se obtuvieron las siguientes temperaturas en los acumuladores, las cuales se comparan con las que se tenían con una sola torre:

ACUMULADOR	PRUEBA 9	TORRE ANTIGUA SOLA
FA-101	116 °F	122 °F
FA-201	89 °F	112 °F
FA-301	111 °F	126 °F
FA-401	84 °F	99 °F

En la prueba 9, se fijó un 60% del flujo para la torre nueva, y 40% del flujo para la torre antigua. Los tres ventiladores de la torre nueva se encontraban arrancados en el modo de alta velocidad. De la torre antigua se encontraban arrancados tres de sus cuatro ventiladores.

Al dejar operando los ventiladores de esta forma (135 HP), habría que colocarle lona al ventilador apagado de la torre antigua, y los ventiladores de la torre nueva estarían a su máxima capacidad. Con ello no se tendría flexibilidad de aumentar la remoción de BTU/min. durante las horas de la tarde, que es cuando las temperaturas del sistema aumentan hasta 4 °F.

Para contrarrestar este aumento de temperatura, para un flujo de recirculación de 4000 GPM, se requiere aumentar la remoción de calor aproximadamente 130000 BTU/min. Esto equivaldría, para la prueba 9, en aumentar la potencia de los

ventiladores en 19 HP. (de acuerdo a la tabla 13 de BTU/min. removidos / HP aplicados).

Para tener esta flexibilidad se propone tener arrancado el cuarto ventilador de la torre antigua (20 HP más), y operar un ventilador de la torre nueva en baja velocidad, en lugar de los tres en alta velocidad (18.8 HP menos). Con ello se estaría trabajando con 136.2 HP en los ventiladores en lugar de 135 HP.

En la tarde (14:00 horas), se puede pasar el ventilador en baja velocidad de la torre nueva a alta velocidad, con lo que se ganaría 18.8 HP, y se estaría contrarrestando el incremento de 4 °F antes mencionado.

Las opciones de trabajar con mayor flujo (5500 GPM) obtenidos en la prueba 14 (mejor prueba con bomba GA 710 y GA 704), a pesar de que aumentaría la remoción de calor en 248421.9 BTU/min. , también incrementaría el costo mensual de operación del sistema a 26171.76 US\$/mes (55109.58 US\$/mes, más que la prueba 9).

Con las temperaturas obtenidas en los acumuladores en la prueba 9, se observó una buena operación; por lo que se considera que con los 916471.64 BTU/min. que se lograron remover durante esta prueba, es suficiente.

La ventaja que se tiene al trabajar con mayor flujo, es mejorar la velocidad lineal en los intercambiadores, con lo cual disminuye la incrustación en los tubos de los mismos. Sin embargo, no se logra llegar a los 3 ft/min. recomendados por manuales de la empresa.

Por otro lado, hay que tomar en cuenta que el tratamiento químico del sistema de enfriamiento, ha mantenido éstos tubos sin problemas de incrustación, operándose a 4000 GPM.

CONCLUSIÓN

1. En base a la flexibilidad de operación del sistema de enfriamiento y costos del mismo, se recomienda operar las torres de enfriamiento de la siguiente manera:

	Flujo total (GPM)	DISTRIBUCIÓN	VENTILADORES
TORRE ANTIGUA	4000	40%	4
TORRE NUEVA		60%	2 EN ALTA, 1 EN BAJA

RECOMENDACIONES

1. Cuando no se dispone de agua en abundancia con un costo reducido, o de una fuente natural, es preciso regenerarla para poder utilizarla de nuevo. Por eso son necesarias las torres de enfriamiento.
2. El material que se emplee en la construcción de una torre de enfriamiento, debe de poseer propiedades especiales que soporten la acción química corrosiva, a la cual se someten.
3. El método utilizado para el tratamiento del agua, debe de ser estudiado cuidadosamente para lograr que el equipo de transferencia de calor no sufra daños por la acción química ya sea por corrosión, incrustación o ensuciamiento, obteniendo una mayor eficiencia en el sistema, además de mantener el equipo en buenas condiciones.
4. El mantenimiento que se lleva a cabo en una torre de enfriamiento, debe ser programado adecuadamente, para lograr un buen funcionamiento del equipo y no interrumpir la operación de éste, eliminando las posibilidades de avería.

BIBLIOGRAFÍA

1. AVENDAÑO Arenas, Oscar. Optimización del costo de operación de una torre de enfriamiento, disminuyendo el ataque de corrosión en intercambiadores por deposición de sólidos dentro o fuera de los tubos. Tesis Ing. Químico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1973.
2. FELDER M. Richard y Ronald Rousseau. **Principios elementales de los procesos químicos.** 2da ed. Estados Unidos: Editorial Addison Wesley. 1991.
3. GEANKOPLIS, Christic. **Procesos de transporte y operaciones unitarias.** 2da ed. México: Editorial CECSA. 1995.
4. MASTERTON L. William y Emil Slowinski. **Química general superior.** 6ta ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 1984
5. McCABE, Warren y Julian Smith. **Operaciones básicas de ingeniería química.** 4ta ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 1991.
6. MOLINA Thomae, Roberto. Consideraciones para el diseño, operación y mantenimiento de una torre de enfriamiento tipo industrial. Tesis. Ing. Mecánico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1985.
7. PERRY H., Robert y James Maloney. **Manual del ingeniero químico.** 6ta ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 1992
8. PETERS, Max y Klaus Timmerhaus. **Plant design and economics for chemical engineers.** 4th Edition. USA: Mc Graw Hill International Editions. 1991.
9. TREYBAL E., Robert. **Operaciones de transferencia de masa.** 2da ed. México: Editorial Mc Graw Hill. 1988
10. WELTY R., James y Charles Wicks. **Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa.** México: Editorial Limusa. 1994.

11. **TEXACO General Engineering Department. Cooling Towers. USA, 1996.**

12. **TEXACO General Engineering Department. Design of Heat Exchangers. USA, 1997.**

APÉNDICE

1. Muestra de cálculo

- **BTU / minuto removidos del sistema de enfriamiento**

El calor removido de los intercambiadores de calor se calcula a partir de la ecuación:

$$q = \int C_p dT \quad (1)$$

donde q es el calor removido del sistema en BTU/lb de agua, C_p es la capacidad calorífica del agua en BTU/Lb-°F, T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida respectivamente del agua en los diferentes intercambiadores de calor en °F.

El calor específico se calcula a partir del nomograma del anexo 1. Al ser C_p constante la ecuación (1) queda de la siguiente manera:

$$q = C_p (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Al tener el dato del calor removido, éste se multiplica por la densidad del agua a la temperatura promedio dentro del intercambiador de calor y luego se multiplica por el flujo de agua que está fluyendo dentro del mismo.

Por ejemplo, se tiene que la temperatura a la que entra el agua al intercambiador de calor es 81 °F y ésta sale a 127.9 °F. La temperatura promedio es 104.45 °F, con esta

temperatura se halla la capacidad calorífica en el nomograma del anexo 1, siendo ésta 1BTU/lb-°F. Introduciendo datos en la ecuación 2:

$$q = 1 (127.9 - 81)$$

$$q = 46.9 \text{ Btu / lb}$$

La densidad del agua a 104.45 °F es 7.967 lb / Gal (anexo 2) y el flujo de agua que esta fluyendo por el intercambiador es 192.6 GPM. Entonces se tiene:

$$\text{BTU / min. removidos} = 46.9(\text{BTU/lb}) * 7.967(\text{lb/Gal}) * 192.6(\text{Gal/min.})$$

$$\text{BTU / min. removidos} = 71965.433$$

- **Costo de operación de bombas**

Los costos de bombeo se calculan a partir de la tabla 7 de la sección de datos originales. La potencia a la que opera la bomba está dada en HP y se debe hallar su equivalente en J/s. Como base de cálculo se toma lo que se consume de energía en un mes (30 días) y se debe hallar su equivalente en Kilowatt - hora. Conociendo el precio del KWH se encuentra el costo de bombeo mensualmente.

Por ejemplo una bomba que opera a una potencia de 100 HP, su equivalente en J/s es 74569.99 (745.6999 J/s = 1 HP).

$$\text{Consumo de energía por mes} = 74569.99 \text{ J/s} * 86400 \text{ s/día} * 30 \text{ días/mes}$$

$$\text{Consumo de energía por mes} = 193285414080 \text{ J}$$

Su equivalente en KWH es 53690.3928 (1 KWH = 3.6E6 J) y el precio del KWH es de 0.10 US\$.

$$\text{Costo mensual de bombeo} = 53690.3928 \text{ KWH} * 0.10 \text{ US\$/KWH}$$

$$\text{Costo mensual de bombeo} = 5369.04 \text{ US\$}$$

- **Costo de operación de ventiladores**

Los costos de operación de los ventiladores se calculan a partir de la tabla 7 de la sección de datos originales. La potencia a la que operan los ventiladores está dada en HP y se debe hallar su equivalente en J/s. Como base de cálculo se toma lo que se consume de energía en un mes (30 días) y se debe hallar su equivalente en Kilowatt - hora. Conociendo el precio del KWH se encuentra el costo de operación de los ventiladores mensualmente.

Por ejemplo un ventilador que opera a una potencia de 25 HP, su equivalente en J/s es 18642.497 (745.6999 J/s = 1 HP).

Consumo de energía por mes = $18642.497 \text{ J/s} * 86400 \text{ s/día} * 30 \text{ días/mes}$

Consumo de energía por mes = 48321352224 J

Su equivalente en KWH es 13422.598 (1 KWH = $3.6E6 \text{ J}$) y el precio del KWH es de 0.10 US\$.

Costo mensual de operación del ventilador = $13422.598 \text{ KWH} * 0.10 \text{ US\$/KWH}$

Costo mensual de operación del ventilador = 1342.260 US\$

- **Costo de químicos**

Los costos de los químicos utilizados en el sistema de enfriamiento se calculan a partir de la tabla 8 de la sección de datos originales. La dosificación mensual de cromatos, dispersante de sólidos, alguicida AG-451, alguicida AG-480, ácido sulfúrico e hipoclorito de calcio que está dada en Gal / mes (tabla 9) se debe multiplicar por el costo de cada producto que está dado en US\$ / Gal. Por ejemplo:

MATERIALES	Gal / mes	US\$/Gal	US\$ / mes
Cromatos	40.10	26.70	1070.67
Dispersante de sólidos	109.97	14.32	1574.77
Alguicida AG-451	10.11	40.42	408.65
Alguicida AG-480	2.51	45.32	113.75
Ácido sulfúrico	299.60	1.04	311.58
Hipoclorito de calcio	2.00	20.43	40.86

2. Datos Originales

TABLA No. IV Temperaturas del agua dentro de los intercambiadores de calor en las distintas pruebas (°F)

Estudio	TEMPERATURAS DE ACUMULADORES			
	FA 101	FA 201	FA 301	FA 401
1	122	112	126	99
2	114	100	118	88
3	116	98	117	88
4	114	100	118	90
5	115	98	99	88
6	113	93	97	84
7	110	95	114	85
8	110	96	114	85
9	116	89	111	84
10	109	94	109	88
11	112	97	96	85
12	110	97	95	88
13	112	98	111	85
14	107	90	90	79
15	108	92	91	80

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES					
		EA 104	EA 105	EA 106	EA 108	EA 109	EA 110
1	100	114.9	128.5	110	111.6	119	100
2	86.5	109.5	123.1	104.6	106.2	113.6	88.5
3	87	110.8	124.4	105.9	107.6	114.9	87
4	87.5	109.5	123.1	104.6	106.2	113.6	87.5
5	86.5	110.1	123.7	105.2	106.9	114.2	86.5
6	82.5	108.8	122.4	103.9	105.6	112.9	82.5
7	82.5	108.8	120.4	101.9	103.5	110.9	82.5
8	85.5	106.8	120.4	101.9	103.5	110.9	85.5
9	79	110.8	124.4	105.9	107.6	114.9	79
10	82	106.1	119.7	101.2	102.9	110.2	82
11	82.5	108.1	121.7	103.2	104.9	112.2	82.5
12	84	106.8	120.4	101.9	103.5	110.9	84
13	83	108.1	121.7	103.2	104.9	112.2	83
14	81.5	104.8	118.4	99.9	101.5	108.9	81.5
15	81	105.4	119	100.5	102.2	109.5	81

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES								
		EA202A/B	EA203A/B	EA206	EA207	EA302A/B	EA304A	EA304B	EA305A	EA305B
1	100	132.5	126	100	100	128.5	103.5	103.5	104.5	105.5
2	86.5	129.7	123.2	86.5	86.5	123.9	98.9	98.9	99.9	100.9
3	87	129.3	122.8	87	87	124.3	99.3	99.3	100.3	101.3
4	87.5	129.7	123.2	87.5	87.5	124.8	99.8	99.8	100.8	101.8
5	86.5	129.3	122.8	86.5	86.5	116	91	91	92	93
6	82.5	128.1	121.8	82.5	82.5	115.1	90.1	90.1	91.1	92.1
7	82.5	128.6	122.1	82.5	82.5	122.9	97.9	97.9	98.9	99.9
8	85.5	128.8	122.3	85.5	85.5	122.9	97.9	97.9	98.9	99.9
9	79	127.2	120.7	79	79	121.6	96.6	96.6	97.6	98.6
10	82	128.4	121.9	82	82	120.6	95.6	95.6	96.6	97.6
11	82.5	129	122.5	82.5	82.5	114.6	89.6	89.6	90.6	91.6
12	84	129	122.5	84	84	114.1	89.1	89.1	90.1	91.1
13	83	129.3	122.8	83	83	121.6	96.6	96.6	97.6	98.6
14	81.5	127.5	121	81.5	81.5	111.8	86.8	86.8	87.8	88.8
15	81	127.9	121.4	81	81	112.3	87.3	87.3	88.3	89.3

TABLA No. IV Continuación

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES							
		EA402A/B	EA404	EA406AB	EA407A	EA407B	EA411	EA416	EA418
1	100	137.5	108	140	113	118	113	108	118
2	86.5	130.8	101.3	133.3	106.3	111.3	106.3	101.3	111.3
3	87	130.8	101.3	133.3	106.3	111.3	106.3	101.3	111.3
4	87.5	132	102.5	134.5	107.5	112.5	107.5	102.5	112.5
5	86.5	130.8	101.3	133.3	106.3	111.3	106.3	101.3	111.3
6	82.5	128.3	98.8	130.8	103.8	108.8	103.8	98.8	108.8
7	82.5	128.9	99.4	131.4	104.4	109.4	104.4	99.4	109.4
8	85.5	128.9	99.4	131.4	104.4	109.4	104.4	99.4	109.4
9	79	128.3	98.8	130.8	103.8	108.8	103.8	98.8	108.8
10	82	130.8	101.3	133.3	106.3	111.3	106.3	101.3	111.3
11	82.5	128.9	99.4	131.4	104.4	109.4	104.4	99.4	109.4
12	84	130.8	101.3	133.3	106.3	111.3	106.3	101.3	111.3
13	83	128.9	99.4	131.4	104.4	109.4	104.4	99.4	109.4
14	81.5	125.2	95.7	127.7	100.7	105.7	100.7	95.7	105.7
15	81	125.8	96.3	128.3	101.3	106.3	101.3	96.3	106.3

TABLA No. V Flujos de agua por los intercambiadores de calor (GPM)

ESTUDIO	FLUJO TOTAL	FLUJO U-100	EA104	EA105	EA106	EA108	EA109	EA110
1	3638.2	1478.113	644.5	85.2	198.9	435.8	115.7	0
2	3618.54	1469.315	640	84.7	195.7	433.2	115	0
3	3681.51	1495.71	652.2	86.2	199.2	441	117.1	0
4	3659.86	1488.912	648.3	85.7	198.1	438.4	116.4	0
5	3659.86	1488.912	648.3	85.7	198.1	438.4	116.4	0
6	3594.89	1460.517	638.8	84.2	194.6	430.6	114.3	0
7	3594.89	1460.517	638.8	84.2	194.6	430.6	114.3	0
8	3638.2	1478.113	644.5	85.2	198.9	435.8	115.7	0
9	3248.39	1319.744	575.4	78.1	175.8	389.1	103.3	0
10	3291.71	1337.341	583.1	77.1	178.1	394.3	104.7	0
11	3618.54	1469.315	640.6	84.7	195.7	433.2	115	0
12	3594.89	1460.517	638.8	84.2	194.6	430.6	114.3	0
13	3291.71	1337.341	583.1	77.1	178.1	394.3	104.7	0
14	5457.3	2217.17	968.7	127.8	295.4	653.7	173.8	0
15	4677.89	1900.431	828.8	109.6	253.2	560.3	148.8	0

ESTUDIO	FLUJO TOTAL	FLUJO U-200	EA202A/B	EA203A/B	EA206	EA207	FLUJO U-300	EA302A/B	EA304A	EA304B	EA305A	EA305B
1	3638.2	256.856	149.8	85.6	10	11.4	923.2	440.9	72.8	58.5	125.6	225.5
2	3618.54	255.3271	148.9	85.1	9.9	11.3	917.8	438.3	72.3	58.2	124.8	224.1
3	3681.51	259.9138	151.6	86.6	10.1	11.6	934.2	446.2	73.6	59.2	127.1	228.1
4	3659.86	258.3849	150.7	86.1	10	11.5	928.8	443.6	73.2	58.9	126.3	226.8
5	3659.86	258.3849	150.7	86.1	10	11.5	928.8	443.6	73.2	58.9	126.3	226.8
6	3594.89	253.7982	148	84.6	9.9	11.3	912.3	435.7	71.9	57.8	124.1	222.8
7	3594.89	253.7982	148	84.6	9.9	11.3	912.3	435.7	71.9	57.8	124.1	222.8
8	3638.2	256.852	149.8	85.6	10	11.4	923.3	440.9	72.8	58.5	125.6	225.5
9	3248.39	229.3357	133.6	78.4	8.9	10.2	824.3	393.7	65	52.2	112.1	201.3
10	3291.71	232.3935	135.6	77.5	9	10.3	835.3	398.9	65.8	52.9	113.6	204
11	3618.54	255.3271	148.9	85.1	9.9	11.3	917.8	438.3	72.3	58.2	124.8	224.1
12	3594.89	253.7982	148	84.6	9.9	11.3	912.3	435.7	71.9	57.8	124.1	222.8
13	3291.71	232.3935	135.6	77.5	9	10.3	835.3	398.9	65.8	52.9	113.6	204
14	5457.3	385.284	224.7	128.4	15	17.1	1384.9	681.4	109.2	87.6	188.4	338.2
15	4677.89	330.2434	192.8	110.1	12.8	14.7	1187	588.9	93.6	75.2	161.5	289.9

ESTUDIO	FLUJO TOTAL	FLUJO U-400	EA402A/B	EA404	EA406A/B	EA407A	EA407B	EA411	EA416	EA418
1	3638.2	979.9769	415.3	78.5	139.8	49.9	18.8	44.2	101.3	134.1
2	3618.54	974.1437	412.8	78	139	49.6	18.7	44	100.7	133.3
3	3681.51	991.6433	420.2	79.4	141.5	50.5	17	44.8	102.5	135.7
4	3659.86	985.8101	417.7	79	140.7	50.2	18.9	44.5	101.9	134.9
5	3659.86	985.8101	417.7	79	140.7	50.2	18.9	44.5	101.9	134.9
6	3594.89	968.3105	410.3	77.5	138.7	49.3	18.6	43.7	100.1	132.5
7	3594.89	968.3105	410.3	77.5	138.2	49.3	18.6	43.7	100.1	132.5
8	3638.2	979.9769	415.3	78.5	139.8	49.9	18.8	44.2	101.3	134.1
9	3248.39	874.9784	370.8	70.1	124.9	44.8	18	39.5	90.5	119.8
10	3291.71	886.6458	375.7	71	126.5	45.2	18.2	40	91.7	121.4
11	3618.54	974.1437	412.8	78	139	49.8	18.7	44	100.7	133.3
12	3594.89	968.3105	410.3	77.5	138.2	49.3	18.6	43.7	100.1	132.5
13	3291.71	886.6458	375.7	71	126.5	45.2	18.2	40	91.7	121.4
14	5457.3	1489.965	622.9	117.7	209.8	74.9	25.2	66.4	152	201.2
15	4677.89	1269.97	533.9	100.9	179.8	64.2	21.6	56.9	130.2	172.5

TABLA No. VII Potencia a la que operan las bombas y ventiladores

BOMBA	Potencia (HP)
GA-704 A	100
GA-704 B	100
GA-710 A	200
GA-710 B	200

	V. Alta	V. Baja
VENTILADOR	Potencia (HP)	Potencia (HP)
EF-701 A	20	
EF-701 B	20	
EF-701 C	20	
EF-701 D	20	
EF-702 A	25	6
EF-702 B	25	6
EF-702 C	25	6

Costo del KWH (US\$)	0.1
----------------------	-----

Fuente: manuales de Texas Petroleum Company

TABLA No. VIII Costo de sustancias químicas añadidas al agua en el sistema de enfriamiento

SUSTANCIA	US\$/GAL	US\$/Lb	DENSIDAD Lb/GAL
CROMATOS	26.7	3.2	13.3
DISPERSANTE DE SÓLIDOS	14.32	1.72	9.7
ALGUICIDA AG-451	40.42	4.84	9.5
ALGUICIDA AG-480	45.32	5.43	8.5
ACIDO SULFÚRICO	1.04	0.07	15.02
HIPOCLORITO DE CALCIO	20.43	1.02	20

Fuente: facturas de la empresa Texas Petroleum Company

TABLA No. IX Dosificación mensual de sustancias químicas al agua del sistema de enfriamiento

ESTUDIO	PURGA GPM	GALONES / MES					
		Cromatos	Dispersante sólidos	Algucida AG-451	Algucida AG-480	Acido Sulfúrico	Hipoclorito de Calcio
1	58.17	39.416	108.093	9.937	2.467	294.487	1.966
2	67.8	45.941	125.988	11.583	2.876	343.239	2.291
3	63.1	42.756	117.254	10.780	2.676	319.445	2.132
4	63.93	43.319	118.797	10.921	2.711	323.647	2.161
5	56.81	38.494	105.566	9.705	2.409	287.602	1.920
6	69.54	47.120	129.221	11.880	2.949	352.048	2.350
7	67.22	45.548	124.910	11.484	2.851	340.303	2.272
8	65.81	44.592	122.290	11.243	2.791	333.165	2.224
9	51.73	35.052	96.126	8.837	2.194	261.884	1.748
10	53.06	35.953	98.598	9.064	2.250	268.617	1.793
11	68.79	46.612	127.828	11.752	2.918	348.251	2.325
12	59.18	40.100	109.970	10.110	2.510	299.600	2.000
13	54.15	36.692	100.623	9.251	2.297	274.136	1.830
14	46.21	31.312	85.869	7.894	1.960	233.939	1.562
15	50.71	34.361	94.231	8.663	2.151	256.720	1.714

3. Datos Calculados

TABLA No. X Deltas de temperatura dentro de los intercambiadores de calor en las distintas pruebas (°F)

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES					
		EA 104	EA 105	EA 106	EA 108	EA 109	EA 110
1	100	14.9	28.5	10	11.6	19	0
2	86.5	23	36.6	18.1	19.7	27.1	0
3	87	23.8	37.4	18.9	20.6	27.9	0
4	87.5	22	35.6	17.1	18.7	26.1	0
5	86.5	23.6	37.2	18.7	20.4	27.7	0
6	82.5	26.3	39.9	21.4	23.1	30.4	0
7	82.5	24.3	37.9	19.4	21	26.4	0
8	85.5	21.3	34.9	16.4	18	25.4	0
9	79	31.6	45.4	26.9	28.6	35.9	0
10	82	24.1	37.7	19.2	20.9	28.2	0
11	82.5	25.6	39.2	20.7	22.4	29.7	0
12	84	22.8	36.4	17.9	19.5	26.9	0
13	83	25.1	38.7	20.2	21.9	29.2	0
14	81.5	23.3	36.9	18.4	20	27.4	0
15	81	24.4	38	19.5	21.2	28.5	0

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES								
		EA202A/B	EA203A/B	EA206	EA207	EA302A/B	EA304A	EA304B	EA305A	EA305B
1	100	32.5	26	0	0	28.5	3.5	3.5	4.5	5.5
2	86.5	43.2	36.7	0	0	37.4	12.4	12.4	13.4	14.4
3	87	42.3	35.8	0	0	37.3	12.3	12.3	13.3	14.3
4	87.5	42.2	35.7	0	0	37.3	12.3	12.3	13.3	14.3
5	86.5	42.8	36.3	0	0	29.5	4.5	4.5	5.5	6.5
6	82.5	45.6	39.1	0	0	32.6	7.6	7.6	8.6	9.6
7	82.5	46.1	39.6	0	0	40.4	15.4	15.4	16.4	17.4
8	85.5	43.3	36.8	0	0	37.4	12.4	12.4	13.4	14.4
9	79	48.2	41.7	0	0	42.6	17.6	17.6	18.6	19.6
10	82	46.4	39.9	0	0	36.6	13.6	13.6	14.6	15.6
11	82.5	46.5	40	0	0	32.1	7.1	7.1	8.1	9.1
12	84	45	36.5	0	0	30.1	6.1	6.1	6.1	7.1
13	83	46.3	39.6	0	0	36.6	13.6	13.6	14.6	15.6
14	81.5	46	39.5	0	0	30.3	6.3	6.3	6.3	7.3
15	81	46.9	40.4	0	0	31.3	6.3	6.3	7.3	8.3

Estudio	Temp. Entrada °F	INTERCAMBIADORES							
		EA402A/B	EA404	EA406A/B	EA407A	EA407B	EA411	EA416	EA418
1	100	37.5	8	40	13	18	13	8	18
2	86.5	44.3	14.8	46.8	19.8	24.6	19.8	14.8	24.8
3	87	43.8	14.3	46.3	19.3	24.3	19.3	14.3	24.3
4	87.5	44.5	15	47	20	25	20	15	25
5	86.5	44.3	14.8	46.8	19.8	24.6	19.8	14.8	24.8
6	82.5	45.8	16.3	48.3	21.3	26.3	21.3	16.3	26.3
7	82.5	46.4	16.9	48.9	21.9	26.9	21.9	16.9	26.9
8	85.5	43.4	13.9	45.9	18.9	23.9	18.9	13.9	23.9
9	79	49.3	19.8	51.8	24.8	29.8	24.8	19.8	29.8
10	82	48.6	19.3	51.3	24.3	29.3	24.3	19.3	29.3
11	82.5	46.4	16.9	48.9	21.9	26.9	21.9	16.9	26.9
12	84	46.8	17.3	49.3	22.3	27.3	22.3	17.3	27.3
13	83	45.9	16.4	48.4	21.4	26.4	21.4	16.4	26.4
14	81.5	43.7	14.2	46.2	19.2	24.2	19.2	14.2	24.2
15	81	44.8	15.3	47.3	20.3	25.3	20.3	15.3	25.3

TABLA No. XI BTU/min removidos en los intercambiadores de calor en las distintas pruebas

ESTUDIO	EA-104	EA-105	EA-106	EA-108	EA-109	EA-110	BTU/MIN U-100
1	79871.2	20228.5	16351.4	42190.3	18301.4	0	176942.8
2	122829.9	25850.3	29523.6	71309.4	25991.4	0	275504.6
3	129628.3	26921.7	31458.9	75695.4	27283.2	0	290985.5
4	118891	25444.7	28224.4	68505.2	25331.6	0	266396.9
5	127935.8	26640.4	30987.7	74821.3	26955.7	0	287140.9
6	139779.4	28033.5	34749.9	82841	29011.7	0	314415.5
7	129068.3	26617.5	31477.5	75598	27088.3	0	289849.8
8	114489.7	24805.2	26927.6	65599.3	24517.7	0	258339.5
9	152791.3	28832.9	39492	92765.3	30971.1	0	344852.6
10	117364.6	24262	28567.2	68656.8	24653.6	0	263504.2
11	137029.6	27727.5	33861.9	80911.2	28541.5	0	308071.7
12	121097.5	25563.7	29042.3	70208.3	25657.1	0	271568.9
13	122288.7	24915.4	30077.1	71998.6	25541	0	274820.8
14	187741.5	39324	45281.8	109223	39650.8	0	421221.1
15	169024.3	34777.6	41288.6	99088.9	35441.4	0	379630.8

ESTUDIO	EA 202A/B	EA 203A/B	EA 206	EA 207	BTU/MIN U-200	EA 302A/B	EA 304A	EA 304B	EA 305A	EA 305B	BTU/MIN U-300
1	40581	18545.2	0	0	59126.2	104925.8	2135.9	1717.1	4733.4	10379.9	123892.1
2	53727.7	26085.3	0	0	79813	136699.2	7470.4	6005.7	13931.8	26884.1	190991.2
3	53485.2	25863.8	0	0	79349	139021.6	7582.6	6095.9	14144.1	27298.9	194143.1
4	53113.5	25679	0	0	78792.5	138071.3	7516.2	6042.4	14023.2	27070.5	192723.8
5	53799.4	26071	0	0	79870.4	109128	2739.2	2202	5760.4	12271	132120.6
6	53381.9	27629.7	0	0	81011.8	118357.9	4533.6	3644.7	8858.1	17763.2	153157.5
7	58943.8	27950.6	0	0	84894.2	147047.7	9268.8	7451.4	17028.6	32433.1	213229.8
8	54183	26306.4	0	0	80489.4	137781.2	7558.7	6076.6	14090.2	27179.8	192686.5
9	53839.7	26819.2	0	0	80458.9	139797.6	9518.1	7651.8	17359	32847	207173.5
10	52449.6	25769.6	0	0	78219.2	128584	7486.6	6018.6	13866.1	26598.1	182553.4
11	57851.6	28441.8	0	0	88293.4	117373.1	4280.6	3441.3	8427.1	17002.1	150524.2
12	55652.1	27212.8	0	0	82864.7	109529.2	3076.4	2473.2	6343.8	13248.9	134671.5
13	52346.9	25710.9	0	0	78057.8	128345.7	7447.2	5987	13798.2	26476.2	182054.3
14	86188.4	42284.7	0	0	128473.1	187281.2	4833.3	3885.6	9911.6	20617.9	206509.6
15	75410.3	37120.9	0	0	112531.2	147928	4885.7	3935.7	9784.7	20004.8	186568.9

ESTUDIO	EA 402A/B	EA 404	EA 406A/B	EA 407A	EA 407B	EA 411	EA 416	EA 418	BTU/MIN U-400
1	130076.7	5285.2	46723.2	5434.4	2524	4813.3	6796.9	20191.6	221825.3
2	152485.5	9615.5	54252.4	8190.4	3445	7254.3	12412.8	27560.1	275216
3	153471.6	9456.9	54636.6	8126.6	3436.1	7197.9	12208	27488.9	276022.6
4	155116.1	9882.7	55173.1	8385.2	3518.6	7426.9	12757.7	28150.1	280410.6
5	154311.6	9730.7	54902.2	8289.5	3486.3	7341.2	12581.4	27890.2	278512.1
6	158839.6	10553.5	55701.4	8774.8	3837.1	7772	13623.6	29096.6	285998.5
7	158946.6	10951.7	58411	9028.2	3722.1	7986.4	14137.6	29777.1	290970.7
8	150486.4	9118.7	53589.9	7886.7	3347.3	6985.4	11771.7	26779	269644.1
9	152550.6	11582.8	53979.2	9231.4	3723.7	8178.4	14952.4	29789.8	283986.5
10	152896.9	11418.3	54130.5	9151.5	3705.2	8105.6	14739.9	29641.8	283789.7
11	159904.1	11017.7	58750.8	9082.6	3744.8	8044.8	14222.8	29956.5	292723.7
12	160131.9	11175.7	58810.2	8170.8	3770	8122.7	14426.8	30160	292768.1
13	143973.9	9731.8	51125.5	8078.3	3344.9	7155.1	12562.9	26759.5	262731.9
14	227298.4	13990.8	80923.2	12022.4	5085.4	10648.4	18047.8	40683.5	406889.5
15	199796.4	12922.5	71036.2	10902.8	4559.6	9656.6	16681.8	36476.7	362032.4

TABLA No. XII BTU/min totales removidos del sistema de enfriamiento en las distintas pruebas

ESTUDIO	BTU/min U-100	BTU/min U-200	BTU/min U-300	BTU/min U-400	BTU/min TOTAL
1	176942.5	59126.2	123892	221825.2	581785.9
2	275504.9	79813.1	190991.2	275216	821525.2
3	290985.5	79349	194143.1	276022.7	840500.3
4	266396.8	78792.5	192723.6	280410.6	818323.5
5	287140.9	79870.4	132120.6	278512	777643.9
6	314415.6	84011.6	153157.4	285998.4	837583
7	289849.7	84894.1	213229.7	290970.9	878944.4
8	256339.6	80469.4	192686.4	269944.3	799439.7
9	344852.6	80458.9	207173.5	283986.7	916471.7
10	263486.2	78219.1	182553.4	283789.8	808048.5
11	308071.7	86293.4	150525.1	292723.7	837613.9
12	271568.8	82864.7	134671.5	293768.2	782873.2
13	274820.9	78057.7	182054.3	262731.9	797664.8
14	421221.2	128473.2	206509.7	408689.5	1164893.6
15	379630.9	112531.2	186558.9	362032.4	1040753.4

TABLA No. XIII BTU/min removidos / potencia aplicada en ventiladores

Estudio	Flujo Hacia T. Antigua (GPM)		Flujo Hacia T. Nueva (GPM)		Flujo de Recirculación (GPM)	HP Aplicados (Ventiladores)				BTU/min REMOVIDOS				BTU/min REMOVIDOS / HP APLICADO EN VENTILADORES					
	T. Antigua		T. Nueva			Torre		Sistema General		Torre Nueva		Torre Antigua		Sistema General		Torre Nueva		Torre Antigua	
1	3638.2	0	3638.2	0	3638.2	80	0	3392.44	0	3180.41	3392.44	581786	0	821525.13	0	10953.6684	7272.325	0	10953.6684
2	380.92	3235.62	3616.54	0	3616.54	75	75	3392.44	788.74	3180.41	3180.41	0	0	487381.72	487381.72	28203.3183	4413.97875	28203.3183	30617.297
3	1574.92	2106.6	3681.52	80	3681.52	80	18.6	3392.44	788.74	3180.41	4181.18	353118.3	4181.18	840500.02	840500.02	23606.8054	4740.43538	23606.8054	28347.2408
4	1822.1	2037.75	3659.85	80	3659.85	80	18.6	3392.44	788.74	3180.41	4181.18	446588.69	4181.18	777619.54	777619.54	17797.3575	5582.35863	17797.3575	23379.7162
5	2385.61	1294.25	3659.86	80	3659.86	80	18.6	3392.44	788.74	3180.41	4181.18	446588.69	4181.18	777619.54	777619.54	17797.3575	5582.35863	17797.3575	23379.7162
6	1804.97	1789.92	3594.89	80	3594.89	80	75	3392.44	3180.41	3180.41	8572.85	324957.88	8572.85	872892.23	872892.23	9638.56307	1949.39725	9638.56307	10895.9715
7	951.32	2643.57	3594.89	80	3594.89	80	75	3392.44	3180.41	3180.41	8572.85	324957.88	8572.85	872892.23	872892.23	9638.56307	1949.39725	9638.56307	10895.9715
8	2220.03	1418.17	3638.2	80	3638.2	80	75	3392.44	3180.41	3180.41	8572.85	324957.88	8572.85	872892.23	872892.23	9638.56307	1949.39725	9638.56307	10895.9715
9	1265.71	1982.88	3248.39	60	3248.39	60	75	2544.33	3180.41	3180.41	5724.74	280713.44	5724.74	916442.73	916442.73	8343.0572	4864.39738	8343.0572	10346.7523
10	758.28	2533.42	3291.7	60	3291.7	60	75	2544.33	3180.41	3180.41	5724.74	280713.44	5724.74	916442.73	916442.73	8343.0572	4864.39738	8343.0572	10346.7523
11	807.75	2808.8	3616.95	40	3616.95	40	75	1896.22	3180.41	3180.41	4876.63	187079.66	4876.63	807994.83	807994.83	9266.044	1884.0755	9266.044	11150.0695
12	675.94	2918.94	3594.88	40	3594.88	40	75	1896.22	3180.41	3180.41	4876.63	187079.66	4876.63	807994.83	807994.83	9266.044	1884.0755	9266.044	11150.0695
13	813.36	2478.35	3281.71	80	3281.71	80	56.2	3392.44	2383.19	2383.19	5775.63	174028.2	5775.63	797659.51	797659.51	11096.5425	2153.3285	11096.5425	13271.995
14	1822.39	3634.91	5457.3	80	5457.3	80	56.2	3392.44	2383.19	2383.19	5775.63	174028.2	5775.63	797659.51	797659.51	11096.5425	2153.3285	11096.5425	13271.995
15	1593.52	3084.17	4677.69	80	4677.69	80	56.2	3392.44	2383.19	2383.19	5775.63	174028.2	5775.63	797659.51	797659.51	11096.5425	2153.3285	11096.5425	13271.995

TABLA No. XIV Costos de operación de bombas y ventiladores en las distintas pruebas

ESTUDIO	BOMBAS ARRANCADAS				COSTO US\$				TOTAL US\$
	GA-704 A	GA-704 B	GA-710 A	GA-710 B	GA-704 A	GA-704 B	GA-710 A	GA-710 B	
1	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
2	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
3	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
4	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
5	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
6	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
7	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
8	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
9	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
10	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
11	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
12	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
13	I	I	O	O	5369.04	5369.04	0	0	10738.08
14	I	O	I	O	5369.04	0	10738.08	0	16107.12
15	I	O	I	O	5369.04	0	10738.08	0	16107.12

ESTUDIO	VENTILADORES TORRE ANTIGUA				COSTO US\$				TOTAL US\$
	EF-701 A	EF-701 B	EF-701 C	EF-701 D	EF-701 A	EF-701 B	EF-701 C	EF-701 D	
1	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
2	O	O	O	O	0	0	0	0	0
3	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
4	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
5	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
6	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
7	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
8	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
9	I	I	I	O	1073.81	1073.81	1073.81	0	3221.43
10	I	I	I	O	1073.81	1073.81	1073.81	0	3221.43
11	I	I	O	O	1073.81	1073.81	0	0	2147.62
12	I	I	O	O	1073.81	1073.81	0	0	2147.62
13	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
14	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24
15	I	I	I	I	1073.81	1073.81	1073.81	1073.81	4295.24

ESTUDIO	VENTILADORES TORRE NUEVA						COSTOS US\$			TOTAL US\$
	ALTA VELOCIDAD			BAJA VELOCIDAD			EF-702 A	EF-702 B	EF-702 C	
	EF-702 A	EF-702 B	EF-702 C	EF-702 A	EF-702 B	EF-702 C				
1	O	O	O	O	O	O	0	0	0	0
2	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
3	O	O	O	I	I	I	332.88	332.88	332.88	998.64
4	O	O	O	I	I	I	332.88	332.88	332.88	998.64
5	O	O	O	I	I	I	332.88	332.88	332.88	998.64
6	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
7	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
8	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
9	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
10	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
11	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
12	I	I	I	O	O	O	1342.26	1342.26	1342.26	4026.78
13	I	O	I	O	I	O	1342.26	332.88	1342.26	3017.4
14	I	O	I	O	I	O	1342.26	332.88	1342.26	3017.4
15	I	O	I	O	I	O	1342.26	332.88	1342.26	3017.4

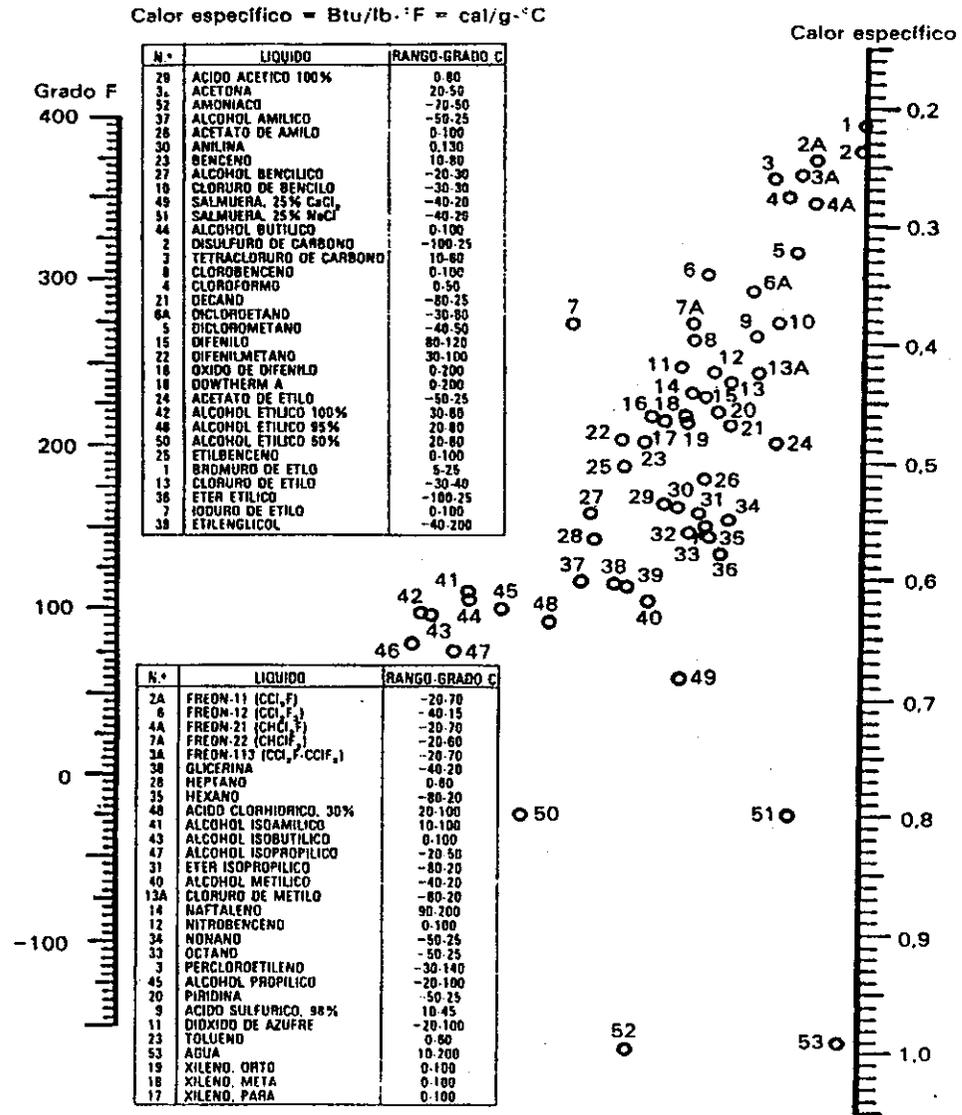
I: encendido O: apagado

TABLA No. XV Costos de químicos añadidos al agua del sistema de enfriamiento

ESTUDIO	PURGA GPM GENERAL	COSTO DE QUÍMICOS US\$ / MES						TOTAL US\$
		CROMATOS	DISPERSANTES SÓLIDOS	ALGUICIDA AG-451	ALGUICIDA AG-480	ÁCIDO SULFÚRICO	COLORO	
1	58.17	1052.425	1547.865	401.492	111.8054	299.227	40.85714	3453.67154
2	67.8	1226.712	1804.198	467.9809	130.3209	348.780368	40.85714	4018.849308
3	63.1	1141.55	1678.945	435.4922	121.2736	324.566916	40.85714	3742.684856
4	63.93	1156.593	1701.071	441.2313	122.8717	328.84418	40.85714	3791.46832
5	56.81	1027.833	1511.695	392.1101	109.1927	292.234765	40.85714	3373.922705
6	69.54	1258.095	1850.355	479.9533	133.6548	357.70322	40.85714	4120.61846
7	67.22	1216.099	1788.588	463.932	129.1933	345.762785	40.85714	3984.432225
8	65.81	1190.693	1751.222	454.2399	126.4943	338.539339	40.85714	3902.045679
9	51.73	935.9282	1376.525	357.0492	99.42918	266.104368	40.85714	3075.893088
10	53.08	959.8675	1411.734	366.1819	101.9724	272.910836	40.85714	3153.523776
11	68.79	1244.543	1830.423	474.7832	132.2151	353.850035	40.85714	4076.671475
12	59.18	1070.591	1574.582	408.422	113.7352	304.391854	40.85714	3512.579194
13	54.15	979.6439	1440.821	373.7265	104.0734	278.533684	40.85714	3217.855624
14	46.21	836.051	1229.63	318.9469	88.81864	237.707151	40.85714	2752.010831
15	50.71	917.4651	1349.371	350.0057	97.46774	260.854919	40.85714	3016.021599

ANEXOS

1. Capacidades caloríficas para líquidos



† Por cortesía de T. H. Chilton

TABLA No. XVI Densidad del agua líquida a diferentes temperaturas

Temperatura °C	Densidad Kg/m³	Densidad lb/gal
0	999.870	8.346
10	999.730	8.345
20	998.230	8.332
30	995.670	8.311
40	992.240	8.282
50	988.070	8.247
60	983.240	8.207
70	977.810	8.162
80	971.830	8.112
90	965.340	8.058
100	958.380	7.999
110	951.000	7.938
120	943.400	7.874
130	935.200	7.806
140	926.400	7.733
150	917.300	7.657

Fuente: manual del ingeniero químico. 6ta ed.